



Usu de la enerxía solar nel ámbitu de la metalurxa ya la ciencia de los materiales

*Pintura de Giulio Parigi onde s'amuesa l'emplegu d'espeyos pa fundir
barcos nel Asediu de Siracusa. (Fonte: Dominiu públicu,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9007560>)*

Por **Daniel Fernández-González**

Investigador Juan de la Cierva Formación

Centru d'Investigación en Nanomateriales ya Nanoteunoloxía (CINN)

CSIC, Universidá d'Uviéu, Gobiernu del Principáu d'Asturies

L'Entregu (Samartín del Rei Aurelio, Asturias)

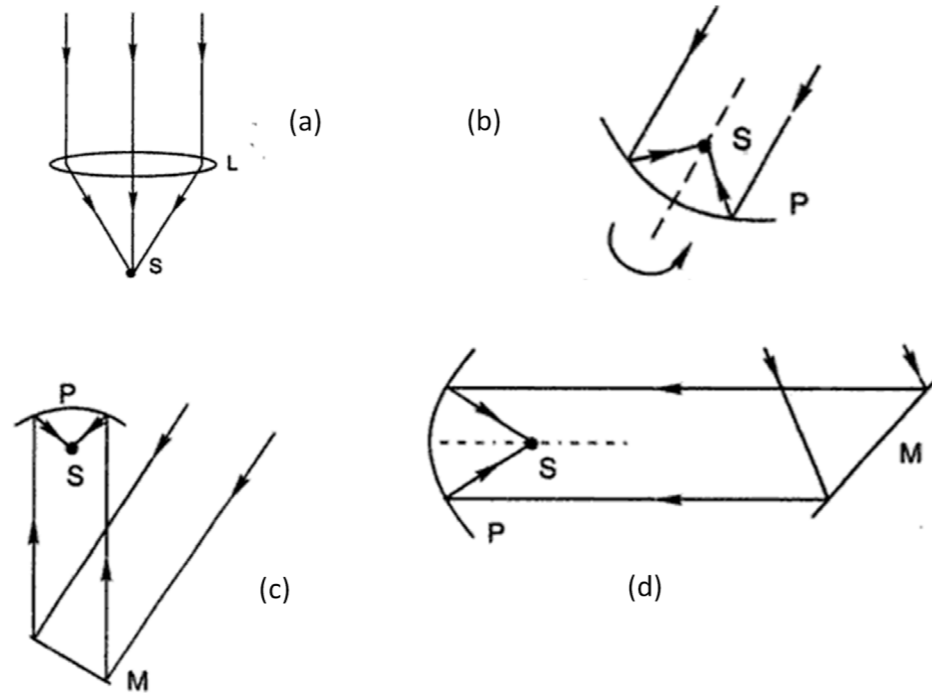
Esti trabayu ye un resume de la tesis doctoral *Aplicaciones de la enerxía solar concentrada en Metalurxia ya Ciencia de los Materiales* defendida en 2019 y que pue atopase en <http://hdl.handle.net/10651/54017>

El consumu d'enerxía ye una de les midies del progresu ya'l bienestar de les sociedaes modernes. Ye, por esti motivu, qu'en cuantes hai una guerra, cambeos nel mercáu o cualesquier otra torga nel afluyir socioeconómicu, xurden crisis enerxétiques o de materiales con consecuencies mui significatives. Un exemplu claru foron les crisis del petroleu de 1973 ya 1979, responsables del esporpolle de la investigación na enerxía solar, n'especial nel ámbitu del aprovechamientu enerxéticu, ya, por esti motivu, de la construcción de numberoses instalaciones solares nesti periodu.

Güei, los conceutos «transición enerxética», «economía circular» o «eficiencia enerxética» tán en boca de persones de tolos campos, amás d'en polítiques d'investigación de países, especialmente nos desarrollaos, ya n'empresas. Nestes últimes apaecen col envís d'aforrar perres ya enerxía, asina como p'ameyorar la salú ya calidá de vida de la xente que vive na redolada de les industries. Busquen tamién amenorgar el volume de residuos xeneraos nos procesos industriales, mesmo qu'atopar nuevos materiales que puean reemplazar otros nuna xera determinada.

Munches son les formes d'enerxía nomaes renovables por atopase en cantidaes escomanaes, que les faen cuasi inacabables o que se puen rexenerar d'un mou natural. Esto fai que seya posible falar de biocombustibles, biomasa, xeotermia, enerxía hidráulico, solar o eólico, ente otres formes d'enerxía renovable. Sicasí, la enerxía solar ye la más interesante nel ámbitu de la metalurxa ya na ciencia de materiales, yá que, pola mor de la concentración d'esta enerxía, puen algamase temperatures mui altes col usu de lentes o espeyos.

Les lentes concentren la radiación gracias a mecanismos de refracción, mientras que los es-



ARRIBA
Figura 2. (a) Forno solar de tipu direutu ya una sola lente. L, lente; S, muestra; (b) Reflector parabólicu. P, espeyu parabólicu; S, muestra; (c) Concentrador parabólicu d'axe vertical; (d) concentrador parabólicu d'axe horizontal. P, espeyu parabólicu; M, heliostatu; S, muestra.

peyos, basaos en dellos planos o curvos, puen ser direutos, si la radiación cambia de direición namás una vegada, como por exemplu nos reflectores parabólicos, los discos Stirling o los reflectores parabólicos lliniales, o indireutos, si lo fai más d'una vez, xeneralmente dos. Pa esti últimu casu, los espeyos empleguen un heliostatu, ye dicir, un reflector planu ya un concentrador parabólicu que faen converxer la radiación nuna superficie d'unos centímetros cuadraos. Na Figura 2 resúmense los principales tipos de concentradores o fornos solares.

DELLES NOTES HISTÓRIQUES

Primero d'entamar coles aplicaciones modernes nel campu de la metalurxa ya la ciencia de materiales, vamos establecer los oríxenes del emplegu de la enerxía solar con estes aplicaciones. Dende'l puntu de vista históricu, el primer usu pue atopase nel periodu romanu, concretamente nel asediu de Siracusa (Segunda Guerra Púnica, 215 enantes de Xesucristu), nel que, cuenta la lleenda, Arquímedes emplegó espeyos pa destruir la flota Romana (Rossi, 2010): ver portada del artículu.

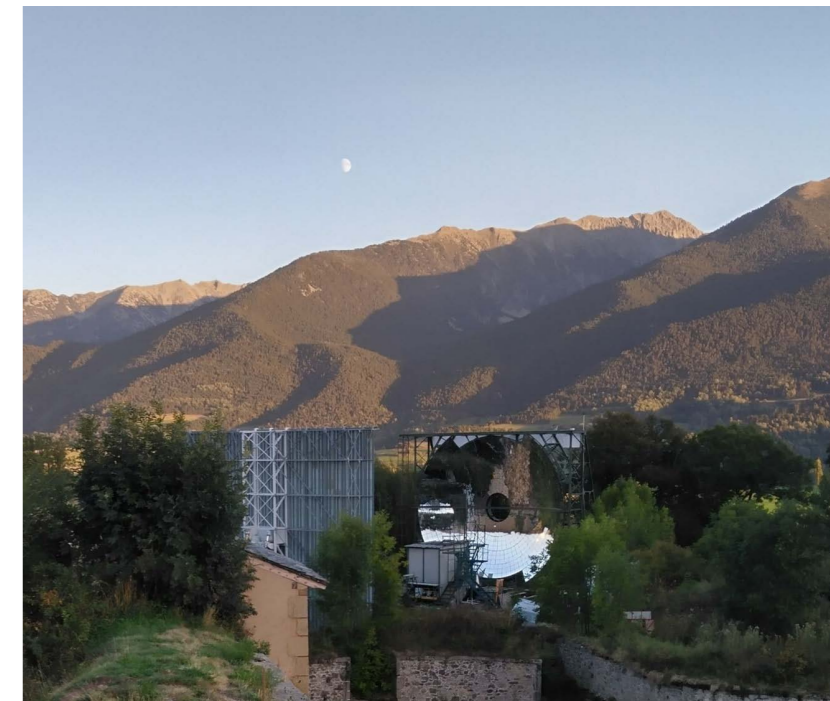
Sin embargu, la primer ya más importante aplicación de la enerxía solar nel tratamientu de materiales foi, ya ye, el secáu al sol de los lladriyos d'adobe, que se fai dende

va polo menos 10.000 años (Revuelta-Acosta *et al.*, 2010, Rodríguez & Soroza, 2006). No que cinka a la investigación de llaboratoriu, los primeros trabayos son del xermanu E. W. Von Tschirnhaus. El matemáticu diseñó, construyó ya trabayó con lentes ya espeyos pa concentrar la enerxía solar ya asina fundir fierro ya fabricar cerámica. Otros investigadores tamién trabayaron con espeyos ya lentes na Edá Moderna ya Contemporánea (Fernández-González *et al.*, 2018a):

- Cassini, nel sieglu XVII, diseñó una lente d'un metru de diámetru cola qu'algamó temperatures penriba de los 1.273 K ya fundió fierro ya plata.
- Lavoisier, nel sieglu XVIII, tamién fundió fierro ya averóse al puntu de fusión del platin. Esti mesmu investigador amosó que ye posible'l tratamientu de metales emplegando atmósferes especiales como, por exemplu, el nitróxenu.
- Félix Trombé, tres de la Segunda Guerra Mundial, foi quien a algamar el puntu de

fusión de cerámiques refractaries (alúmina, óxidu de cromu, zirconia, hafnia ya toria).

Foi precisamente Felix Trombé, xunto con Marc Foex ya Charlotte Henry La Blanchetais, el que siguió coles investigaciones de Lavoisier nel periodu 1946-1949 en Meudon (Francia). Ellí construyeron un fornu solar de concentrador parabólicu de 2 kW qu'emplegaron na química ya metalurxa d'altas temperatures pa dempués construir otru en Mont-Louis (Figura 3) de 50 kW. Poro, pue dicise qu'estos fornos foron los precursores del llevantáu más alantre n'Odeillo, que supón el centru francés de referencia pa la investigación nel ámbitu de la enerxía solar. Por embargu, la mayor parte de los fornos solares



ARRIBA
Figura 3. Forno de Mont-Louis. El que fora la primer instalación solar tres de la Segunda Guerra Mundial, ya precursora del fornu solar d'Odeillo, ye güei un llugar d'interés turísticu que se pue visitar.

foron construyíos dempués de la primer crisis del petroleu nos años 70 (Fernández-González *et al.*, 2018a):

- PSA, Plataforma Solar de Almería (entamos de los 80, fornu solar de 60 kW, torre solar de 3.360–7.000 kW), dedicada, sobre too, a la investigación nel campu de l'aplicación enerxética.
- CENIM-CSIC ya UCLM (años 90, equipu de lente de Fresnel de 0,6 kW).
- PROMES (Procédés, Matériaux et Énergie Solaire, CNRS), centru d'investigación principal dedicáu a la pareya enerxía solar-materiales, que tien el so orixe en Mont-Louis, aunque'l fornu solar d'Odeillo ye la instalación que s'emplega anguaño (finales de los 60, diferentes fornos de 0,9 kW, 1,5 kW, 6 kW ya 1.000 kW) (Figura 4).
- Fornu solar de L'Uzbequistán (construyíu en 1981, 1.000 kW).
- DLR (Centru Aeroespacial Xermanu), fornu solar d'altu fluxu en Colonia-Porz (1994, potencia > 22 kW) onde tienen abonda experiencia na prueba de materiales.
- Llaboratoriu de Teunoloxía Solar nel Paul Scherrer (PSI), entamáu en 1988 en Villigen (Suiza). Nesti centru ye posible atopar un fornu solar d'altu fluxu (1997, 40 kW), ya una planta pilotu solar de 300 kW (encargada en 2005, proyeutu de la EU SOLZINC) pa facer la reducción carbotérmica del óxidu de cinc. Cuenta tamién con una planta solar pilotu de 100 kW (encargada en 2011, proyeutu BFE Solar2Zinc) pa llograr la disociación térmica del óxidu de cinc y, d'esta manera, producir cinc ya gas de síntesis.
- Weizmann Institute of Science d'Israel (torre solar de 3.000 kW, de finales de los 80 ya fornu solar de 50 kW d'entamos de los 80).

- National Solar Thermal Test Facility (NSTTF) del Departamentu d'Enerxía de los Estaos Xuníos (1979, fornu solar de 16 kW).
- National Renewable Energy Laboratory (NREL) (1977), tien un fornu solar d'altu fluxu de 10 kW en funcionamientu dende 1990 en Golden (Colorado, Estaos Xuníos).
- Korea Institute of Energy Research (KIER) (d'entamu del sieglu XXI, fornu solar de 40 kW ya concentrador de tipu discu de 10 kW), dedicáu a aplicaciones de la enerxía solar nel campu de la xeneración enerxética.
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) (entamu del sieglu XXI, torre solar de 500 kW), que, amás de con materiales, trabaya les aplicaciones de la enerxía solar na xeneración enerxética.

Dalgunos d'estos llaboratorios entamaron delles investigaciones nel campu de los materiales cola prueba de materiales baxo condiciones de mui alta temperatura, por exemplu, el sistema de proteición térmica del tresbordador espacial Hermes probóse na Plataforma Solar d'Almería al empiézu de los 90. Sicasí, aliances como Sol-lab (Alliance of European Laboratories for Research and Technology on Solar Concentrating



ARRIBA

Figura 4. El Fornu Solar d'Odeillo, asitiáu na llocalidá de Font Roméu-Odeillo-Via (Francia), ye ún de los más grandes centros d'investigación nel campu de la enerxía solar. Pertenez al PR0cédés Matériaux et Énergie Solaire del Centre National de la Recherche Scientifique (PROMES-CNRS). Ellí puen atopase bien de fornos más pequeños dedicaos a la investigación básica nos campos de la enerxía ya los materiales.

Systems, 2004) ya programes d'investigación de la Xunión Europea (SFERA, Solar Facilities for the European Research Area, 2009–2023) dieron un emburrión, sobre too nel continente européu, a la investigación nel campu. Nesti artículu van presentase delles investigaciones d'enerxía solar venceyaes al ámbitu de la metalurxa ya la ciencia de materiales.

DESENVOLVIMIENTU DE LA ENERXÍA SOLAR PA COLA METALURXA YA LA CIENCIA DE MATERIALES

Darréu van despicase dalgunos de les aplicaciones de la enerxía solar nel ámbitu de la metalurxa ya la ciencia de materiales:

- Siliciu: esti elementu emplégase en bien de campos, por exemplu, na electrónica, la metalurxa (aleaciones) ya na industria fotovoltaica. El siliciu fabricase anguaño por reducción carbotérmica de siliz en fornos llétricos. Existen distintes calidaes dependiendo del usu al que tean destinaes; el grau electrónicu (99,99999% Si), el metalúrxicu (99% Si), ya'l solar, de calidá intermedia ente los otros dos. Sicasí, toos ellos comparten l'emplegu de procesos enerxéticamente intensivos, ye dicir, necesiten muncha enerxía p'algamar l'elementu. Esti material foi oxetu d'estudiu de dellos investigadores que trataron de producilo al traviés d'enerxía solar concentrao. Exemplu d'esto ye la propuesta de Murray *et al.* (2006), que trabayó nun procesu basáu en dos etapes. Na primera produciríase nitruru de siliciu (Si_3N_4) per aciú de la reducción del óxidu de siliciu (SiO_2) emplegando carbonu 4 hores a temperatures perriba los 1.173 K n'atmósfera de nitróxenu. Na segunda disociaríase'l nitruru de siliciu en siliciu ya nitróxenu. Otru exemplu d'investigación ye'l de Lotzenhiser *et al.* (2010), que fai la reducción carbotérmica del SiO_2 a temperatures nel rangu de 1.997-2.263 K en condiciones de vacíu ya emplegando enerxía solar. Aunque l'emplegu de la enerxía solar podría tener sentíu na producción de siliciu por mor de les altes temperatures que se requieren anguaño pa producilo, entovía nun ye

posible algamar los valores de calidá que demanden les industries.

- *Aluminiu*: la producción d'esti metal tamién ye enerxéticamente intensiva ensin qu'importe la teunoloxía que s'emplegue. Industrialmente, el procesu Halt-Hérault ye'l más importante pa la producción del aluminiu, aunque hai bien d'investigaciones qu'entá nun salieron del llaboratoriu. Nesti ámbitu tamién s'emplegó la enerxía solar concentrao, por exemplu, Murray (2001) fizo dellos trabayos nel fornu solar d'Odeillo col envís de producir aluminiu ya aleaciones d'aluminiu-siliciu por reducción carbónica d'óxidos d'aluminiu ya siliciu. Otru trabayu d'importancia ye'l del investigador Lytvynenko (2013), onde, gracias al procesu Halt-Hérault, s'algamó aluminiu por electrólisis. Gracias a esti estudiu, los costes enerxéticos podríen reducise cuasi un 40% asina como les emisiones de gases d'efeutu iverneru venceyaes a la xeneración enerxética.
- *Cinc*: de la mesma manera que nos otros metales, la producción d'esti metal tamién ye enerxéticamente intensiva, por exemplu, como informaba'l diariu *La Nueva España*, Asturiana de Zinc consume tanta enerxía llétrica como la comunidá autónoma de La Rioja (La Nueva España, 2020). Nesti casu, aparte de la producción del metal, la pareya cinc-enerxía solar tien interés en cuantes al almacenaxe d'enerxía. El cinc pue emplegase pa dixebrar la molécula d'agua ya, asina, xenerar hidróxenu, o tamién como material pa bateríes. D'esta miente, les investigaciones nesti campu xurden nos años 80 ya siguen anguaño (Fletcher & Noring, 1983, Fletcher *et al.*, 1985, Palumbo & Fletcher, 1988). En dellos casos, la inves-

tigación aportó al nivel de planta pilotu, como'l casu de la investigación d'Osinga *et al.* (2004), qu'estudió la reducción carbónica del ZnO con carbonu sólidu nun fornu solar de 5-10 kW emplegando un dispositivu de dos cámares, una como absorbedor solar ya otra como cámara de reación. L'equipu tenía un dispositivu pa recoyer los gases ya'l cinc que condensaba n'otra parte por separao. Los esperimentos duraben ente 30 ya 75 minutos con 20 o 30 minutos p'algamar les condiciones estacionaries, que yeren de 1.350 a 1.550 K de temperatura, ya, d'esta manera, llograr un rindimientu del 80%. Pa reducir l'óxidu de cinc empléguense materiales estremaos como'l grafitu (Adinberg & Epstein, 2004), gas natural (Steinfeld *et al.*, 1998) o feroreducción (Epstein *et al.*, 2004). Como comentaba al empiézu del párrafu, dellos proyeutos consiguieron nivel de planta pilotu (Wieckert *et al.*, 2006), como'l EU-SOLZINC, de 0,3 MW, una producción de 50 kg Zn/h, un 95% de pureza algamáu con 2,5-5 μm de tamañu de partícula ya un reactor de dos cámares. Al emplegu d'óxidu de cinc xúntase la posibilidá del recicláu d'óxidu Waelsz, que ye un polvu que se xenera nos fornos llétricos emplegaos nel reciclaxe d'aceros galvanizaos ya que contién un 55-65% de cinc (Tzouganatos *et al.*, 2013).

- *Fierro*: nel campu de la producción de fierro ya aceru tamién hai delles investigaciones, magar que venceyaes a la reducción d'óxidos de fierro, como, por exemplu, el trabayu de Sibieude *et al.*, (1982). Esti estudiu céntrase nel efeutu de la temperatura, la presión d'oxíxenu ya la velocidá de calentamientu nel rindimientu de la descomposición de la magnetita (Fe_3O_4). Ruiz-Bustanza *et al.*,

(2013) investigaron el desenvolvimientu d'un procesu basáu n'enerxía solar col envís de reciclar la cascariella de llaminación, que ye un residuu xeneráu na producción de llámines d'aceru. Ellos emplegaron un fornu de llechu afluyíu calentáu per aciú de la enerxía solar (4 hores a 1.023 K) onde algamaron *pellets* de magnetita que podríen emplegase na soldadura aluminotérmica.

- *Procesáu de materiales*: referímonos equí al tratamientu de materiales, sobre too de los metálicos, qu'inclúin la soldadura, la pulvimetalurxa o l'aplicación de tratamientos superficiales pa, asina, incluir los primeros estudios basaos na fusión de materiales mentaos al entamu d'esti trabayu. Siguiéron esta llinia delles investigaciones de los años 80 col oxetivu de fundir metales como l'aluminiu, l'estañu o'l cinc (Gopalakrishna & Seshan, 1984, Suresh & Rohatgi, 1979, 1981). Sicasí, existen otros trabayos qu'estudien la deposición química en fase vapor de NbB_2 ya TaB_2 emplegando enerxía solar concentrao (Armas *et al.*, 1976).

Quedando afitaos los materiales que podríen ser receptores del usu de la enerxía solar concentrao, entramos agora nes metodoloxíes ya trabayos venceyaos al procesamientu d'esos materiales con esta práutica renovable.

- *Espluma d'aluminiu*: esti ye un material poroso que s'emplega nel campu del aisllamientu sonoru. García-Cambronero *et al.* (2008) ya García-Cambronero *et al.* (2010) emplegaron enerxía solar concentrao pa fabricar estes esplumes. AlSi_{10} con TiH_2 como axente esplumante foron les materíes primes que se trataron nun

fornu de llechu afluyíu calentáu con enerxía solar ente 923 ya 1.023 K. El procesu d'esplumáu duraba ente 2 ya 5 minutos, un tiempu muncho más curtiu que'l que se precisa nos fornos llétricos con temperatures más baxes. Los mesmos autores ficiéron trabayos con otres mestures como Al_3Si ya mármole como axente esplumante (García-Cambronero *et al.*, 2004).

- *Sinterización*: nesti casu, l'oxetivu de los investigadores yera emplegar enerxía solar concentrao col envís d'algamar un productu aglomeráu ya, d'esta mena, amenorgar el tiempu de tratamientu ya'l coste enerxéticu. La investigación más destacada nesta dómina ye la sinterización de ferrites de Ni-Zn; un material blandio ya magnético emplegao n'equipos electrónicos. Nesti casu, la reducción de tiempu al respetive del fornu solar foi del 90%, algamando un productu con mayor densidá ya meyores propiedaes magnétiques (Gutiérrez-López *et al.*, 2010). Tamién ye posible falar de la sinterización d'aceros rápidos, un tipu d'aceru que s'emplega pa facer ferramienta p'arrincar virutes de metal xirando a gran velocidá. Herranz *et al.* (2013) trabayaron con polvos d'aceros rápidos AISI M2 tratándolos nun fornu solar de la Plataforma Solar de Almería ya nuna lente de Fresnel na Universidad de Castiella-La Mancha. El material tratóse n'atmósferes de N_2 -5% H_2 a temperatures de 1.388-1.473 K con velocidaes de calentamientu de 323 K/min ya permanencies de 30 minutos a la temperatura máxima. Esti estudiu permitió llograr pieces sinterizaes a temperatures 423 K más baxes que nun fornu llétricu en tiempos mun-

cho más curtios, en concreto 90 minutos en fornu solar, 30 minutos emplegando lente de Fresnel ya 10 horas nun fornu convencional. Otru aspeutu positivu foi l'endurecimientu del material, consiguíu gracias a les altes velocidaes de calentamientu ya enfriamientu que torgaron que nitruros de vanadiu somicroscópicos se tresformaren de la qu'esfrecía.

- Soldadura: l'emplegu de la enerxía solar na soldadura ye un campu d'estudiu afitáu dende va munchos años. Asina, Kaddou & Abdul-Latif (1969) trabayaron con lentes de Fresnel pa soldar diferentes materiales (aceru dulce, llatón o cobre) emplegando material d'aporte ya estudiando diferentes xeometrías. Hai dellos trabayos más de recién nel campu de los polímeros (Kim *et al.*, 2004), de les aleaciones d'aluminiu (Karalis *et al.*, 2005) o de los aceros (Romero *et al.*, 2013).
- Tratamientos superficiales: l'aplicación de películes superficiales de materiales duros ye mui habitual p'ameyorar les propiedaes superficiales de les pieces como la resistencia a la corrosión o al desgaste. Nesti campu tamién s'emplegó la enerxía solar concentrao como fonte de calor pa llograr les altes temperatures necesaries. L'emplegu d'esta fonte d'enerxía permitió, en tiempos muncho más curtios, consiguir les mesmes propiedaes qu'usando fornos llétricos. Asina, por exemplu, Rodríguez *et al.* (2013) nitruraron superficialmente pastilles de titaniu en 15 minutos pa lo que sedrien necesaries 8 horas nel casu d'emplegar un fornu llétricu. Na llinia d'ameyorar les propiedaes superficiales de los metales, el temple su-

perficial d'aceros ye un ámbitu d'interés dende fai cuasi cuarenta años (Yu *et al.*, 1982) nel que s'estudien diferentes tipos de fornos solares, xeometrías o aceros.

- *Cerámiques*: ye posible atopar investigaciones nel campu de la sinterización de cerámiques dando-y usu a la enerxía solar, como ye'l casu de la sinterización de cordierita. Esti cerámica emplégase por mor del baxu coeficiente d'expansión térmicu ya pola resistencia al choque térmicu en filtros de partícules en motores térmicos, en fornos o como aislante térmicu. Nel campu de la cordierita, Costa-Oliveira *et al.* (2009) ficeron sinterización reactiva de polvos comerciales de magres, talcu, feldspatu, alúmina ya síliz en fornu solar a temperatures penriba los 1.573 K en tiempos muncho más curtios (60 minutos) qu'emplegando métodos convencionales (24 horas), algamando propiedaes que yeren bien asemeyaes. De toles maneres, ya, aunque la sinterización de cerámiques emplegando enerxía solar podría tener interés, ye la síntesis de cerámiques refractaries dures la que tien mayor relevancia na dómina de la enerxía solar ya'l material cerámico.

Estos carburos ya nitruros d'eleváu puntu de fusión ufren gran dureza, resistencia a la corrosión o baxu coeficiente d'expansión térmica. Estes propiedaes apurren a les cerámiques refractaries dures numerosos campos d'aplicación qu'inclúin turbinas, partes de motores o recubrimientos proteutores. No que cinca a la investigación qu'emplega enerxía solar concentrao, pue falase de dos árees: la síntesis o la sinterización. Darréu van citase dalgunes de les investigaciones nesti campu:

- Carburu de siliciu (SiC): Cruz-Fernandes *et al.* (1998) sintetizaron SiC nun fornu solar de la Plataforma Solar d'Almería emplegando siliciu ya carbonu amorfo nuna rellación C/Si:1,5. El compuestu calentó hasta la temperatura máxima (1.893 K) en 3 minutos ya mantúvose asina 30 minutos.
- Nitruru de siliciu (Si₃N₄): Zhilinska *et al.* (2003) sinterizaron polvos de Si₃N₄ na Plataforma Solar d'Almería con velocidaes de calentamientu perrápides ya permanencies a la temperatura máxima (1.873-2.023 K) de 10 a 60 minutos. Les propiedaes del material sinterizao yeren mui paecies a les del productu algamáu emplegando téuniques convencionales, aunque en tiempos muncho más curtios.
- Carburos de titaniu: Cruz-Fernandes *et al.* (2002) investigaron diferentes carburos de titaniu, estequiométricos ya non estequiométricos, consiguíos en forma de discos. Pa ello emplegaron como materia prima polvos de titaniu ya grafitu. Los trabayos foron fechos na Plataforma Solar d'Almería 30 minutos baxo atmósfera d'argón a 1.773 K. Asina algamaron un productu con bona cristalinidá en tiempos que, como n'otros casos yá comentaos, foron muncho más curtios ya ensin consumir enerxía llétricu.
- Carburu de tungsteniu: nesti casu, ya como s'apuntaba al entamu, puen atopase trabayos basaos na sinterización. Un exemplu d'esto ye'l de Guerra-Rosa *et al.* (2002), que sinterizó polvos de WC con cobaltu como aditivu a altes temperatures (1.773 K) en tiempos de 5 minutos. Esta téunica consiguíu que'l productu tuviere propiedaes iguales a les esperables nuna

fabricación convencional. Por embargu, tamién hebo dellos trabayos basaos na síntesis del productu a partir de polvos de tungsteniu ya carbonu a temperatures averaes a los 2.173 K baxo atmósfera d'argón (Dias *et al.*, 2007; Costa-Oliveira *et al.*, 2008).

- Carburu de tantaliu: esti carburu tamién se fabrica por calentamientu a temperatures bien altes (>1.873 K) baxo condiciones de vacíu o d'atmósfera d'argón a partir de mestures d'óxidu de tantaliu ya carbonu. Como alternativa, tamién se pue reducir emplegando hidróxenu. Cruz-Fernandes *et al.* (2006) ficeron trabayos emplegando enerxía solar col envís d'algamar esti carburu.
- Carburu de molibdeno: esti carburu, amás d'emplegase como inxertu pa ferramientes de corte, pue usase tamién como catalizador col envís de fabricar hidróxenu. La enerxía solar plantégase como una de les alternatives pa la fabricación d'esti carburu por mor de les altes temperatures que son necesaries pa la so síntesis (Shohoji *et al.*, 2007; Granier *et al.*, 2008; Granier *et al.*, 2009).

– *Fulerenos ya nanotubos de carbonu*: el fulerenu ye una forma alotrópica de carbonu na que'l carbonu tien forma de balón de fútbol. Reparóse na so existencia en 1985 ya sintetizáronse per primer vegada en 1989. Dende esi momentu, adquirieron interés científicu por mor de les sos propiedaes químiques ya físiques que permitien aplicaciones potenciales nel ámbitu de la nanoteunoloxía (semiconductores, usos en medicina, superconductores, etc.). Asina, amás d'otros

L'emplegu d'enerxía solar concentrao podría consiguir les altes temperatures necesaries na metalurxa o la ciencia de los materiales ensin xenerar gases d'efeutu ivernaderu y otros contaminantes

munchos métodos (Fernández-González *et al.*, 2018a), la enerxía solar emplegóse col envís d'algamar fulerenos (Laplaze *et al.*, 1996), dende cantidaes de miligramos a primeros de la década de 1990 hasta decenes de gramos nel empiezu del sieglu XXI. Foi xusto nos nicios del sieglu XXI cuando Andre Geim ya Konstantin Novoselov aislaron grafenu per primer vegada. Esto acabó cola investigación na dómina de los fulerenos por mor de les interesantes propiedaes del grafenu, especialmente nel campu de la electrónica. Asemeyáu foi'l casu de los nanotubos de carbonu, que tamién se produxeron emplegando enerxía solar concentrao (Fernández-González *et al.*, 2018a).

– *Producción de cal:* esti ye ún de los procesos que s'estudió dende'l puntu de vista económicu emplegando una teunoloxía basada na enerxía solar. La descomposición térmica del carbonatu de calciu o del yelsu foi un tema estudiáu dende cuantayá cola fin d'amenorgar el consumu enerxéticu nel ámbitu de la producción de cal (Salman 1988, Flamant *et al.*, 1980; Imhof 1997). Por embargu, los trabayos más destacaos nesti sentíu foron los de Meier ya colaboradores (Meier *et al.*, 2004, 2005a, 2006), que diseñaron un fornu calcinador calentáu indireutamente con enerxía solar gracias a un sistema de tubos rotatorios. Pa ello, emplegaron un fornu solar de 15 kW que tardaba 1,5-2 hores n'algamar condiciones estacionaries.

El tratamientu duraba 30 minutos (1.200-1.400 K de temperatura) ya emplegaba una velocidá de rotación ente 8 ya 18 rpm, con una alimentación de 36-136 g/min y con un tamañu de partícula de 2-3 mm. El resultáu d'esti procedimientu foi un rindimientu de calcinación del 98,2% ya una productividá de 64,2 g/min a una temperatura de 1.395 K. Les emisiones de CO₂ podríen reducise un 20-40% nuna fábrica de cementu, asina como'l preciu de la cal, que yera dos vegaes el coste del procesu fechu por mor de métodos convencionales en 2004, 128-157 dólares por tonelada (Meier *et al.*, 2005b).

Como se pue ver en tolos trabayos d'investigación descritos nes llinies anteriores, los procesos de la metalurxa ya la ciencia de los materiales necesiten d'altas temperatures p'algamar l'ésitu. Antaño, el mou d'algamar eses temperatures yera cola quema de combustibles fósiles o emplegando enerxía llétrico, xenerao, a la fin, usando combustibles fósiles o nucleares. Asina, la producción de metales, la síntesis ya sinterización de cerámiques o l'aplicación de tratamientos térmicos faen usu d'altas temperatures algamaes xenerando grandes cantidaes de dióxidu de carbonu u otru tipu de residuos. L'emplegu d'enerxía solar concentrao podría sustituyir les téuniques convencionales pa consiguir les altes temperatures necesaries na metalurxa o la ciencia de los materiales ensin xenerar gases d'efeutu ivernaderu u otros contaminantes.

INVESTIGACIÓN NEL CAMPU DE LA ENERXÍA SOLAR FECHO N'ASTURIES

Nes llinies anteriores faciase un resume de les diferentes investigaciones que se desenvolvieron a lo llargo de los años nos diferentes llaboratorios qu'esisten nel mundu. Nesi ámbitu, Asturias inxértase con trabayos activos anguaño de gran interés.

Estos trabayos entamen con un proyeutu SFERA (Solar Facilities for the European Research Area) de la Xunión Europea, una convocatoria añal que permite a investigadores poder

industria del aceru (Fernández-González *et al.*, 2019a); l'algame de siliciu-manganesu, que ye una aleación d'interés na metalurxa del fierro ya l'aceru (Fernández-González *et al.*, 2019b); los trabayos entamaos col envís d'estudiar les posibilidaes de la enerxía solar concentrao na reducción d'óxidos de fierro, na sinterización o na fabricación d'arrabiu (Fernández-González *et al.*, 2018b) o nel tratamientu d'escories de convertidor siderúrxicu (Fernández-González *et al.*, 2019c). Pue atopase un estudiu más detalláu nes referencies que s'inclúin no cabero d'esti artículu.

Hai bien de trabayos espublizaos n' Asturias pol equipu del autor a lo llargo d'estos años venceyaos a la metalurxa: la síntesis de siliciu-calciu, l'algame de siliciu-manganesu o los trabayos pa estudiar les posibilidaes de la enerxía solar concentrao na reducción d'óxidos de fierro, na sinterización o na fabricación d'arrabiu y nel tratamientu d'escories de convertidor siderúrxicu

desarrollar el so trabayu nel campu de la enerxía solar concentrao en materiales ya metalurxa con una estancia de dos selmanes nun país européu que tenga un fornu solar. Desafortunadamente, entavía nun hai un fornu solar d'estes carauterístiques n' Asturias que posibilite la investigación nesta área.

La nuesa investigación xébrase en delles llinies de trabayu estremaes, sicasí vamos centranos en dos en concreto, la síntesis de los componentes que formen el cementu d'aluminatu de calciu ya'l tratamientu d'escories, nel que busca la forma de recuperar elementos de valor d'escoria de procesos metalúrxicos, como son, por exemplu, el fierro ya'l cobre nos residuos de cobre.

Hai bien de trabayos espublizaos n' Asturias a lo llargo los últimos siete años venceyaos a la metalurxa, como foron la síntesis de siliciu-calciu, que tien interés como desoxidante na

Faise referencia darréu a dos exemplos de les llinies d'investigación entamaes n' Asturias nos últimos años.

Síntesis de los componentes del aluminatu de calciu: cementos refractarios

El cementu ye ún de los materiales más producidos nel mundu, namás que de la variedá Portland (Figura 5) yá se producen más de 4.000 millones de tonelaes. Podríen destacase munchos problemes alreor d'esta industria, anque los más importantes son el consumu enerxéticu: el combustible ya la lletricidá representen aproximadamente un 40% de los costes de producción, ya la xeneración de dióxidu de carbonu, onde un 5% del CO₂ xenerao pol ser humanu correspuende a esta industria, con un 50% resultáu del procesu químico ya'l 40% restante de la quema de combustibles. Nesi sen, pensóse



ARRIBA

Figura 5. Antiguu anunci del cementu Portland de la cementera de Tudela Veguín, asitiáu na estación del Norte d'Uviéu.

que la enerxía solar pue ser una vía potencial d'amenorgar los costes de producción ya reducir les emisiones de CO₂, especialmente les venceyaes a la quema de combustibles fósiles.

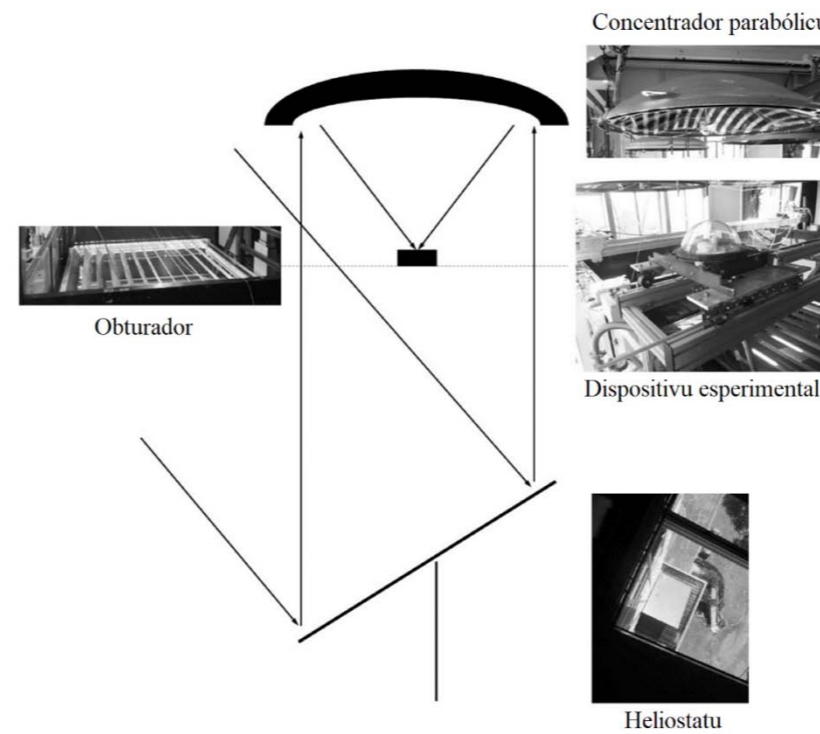
Nuna primer etapa trabayóse con una variedá de cementu que tamién tien usu na industria metalúrxica, el d'aluminatu de calciu. Esta variedá de cementu ye cara poles sos propiedaes d'endurecimientu rápidu ya pola so resistencia a altes temperatures, a cambeos d'esta, al ataque químicu, al impautu ya a la corrosión. Toes estes carauterístiques faen d'él el segundu tipu de cementu más emplegáu tres del Portland.

Hai diferentes variedaes de cementos d'aluminatu de calciu dependiendo de les impureces y del conteníu de los sos principales constituyentes (Al₂O₃ ya CaO). El mecanismu

emplegáu pa fabricar el cementu ye la fundición de mestures de carbonatu de calciu ya bauxites en fornos de reverberu a temperatures de 1.500-1.873 K, too ello emplegando lletricidá o combustibles fósiles (carbón pulverizao, fuel, gas natural u otros combustibles). Nel casu de les variedaes más pures de cementu d'aluminatu de calciu fai falta emplegar combustibles de baxu nivel d'impureces o, direutamente, lletricidá. Desta manera, la enerxía solar concentrao pue tener interés nel calentamientu pa llograr cementu d'aluminatu de calciu (Fernández-González *et al.*, 2018c).

No que cinca a los espermentos, ficiéronse nun fornu solar de 1,5 kW, nes instalaciones del PROMES-CNRS (PROcédés Matériaux et Energie Solaire-Conseil National de la Recherche Scientifique) allugaes en Font Roméu-Odeill-Via (Francia). Ye'l mesmu llugar onde s'atopa'l fornu solar que s'amuesa na Figura 4, aunque ye un fornu más pequeñu, como'l que se pue ver na Figura 6.

El funcionamientu d'esti tipu de fornos ye cenciellu (Figura 6). Consiste nun espeyu planu nomáu heliostatu que sigue'l sol ya dirixe los sos



ARRIBA SUPERIOR

Figura 6. Imáxenes del funcionamientu del fornu solar.

ARRIBA INFERIOR

Figura 7. Imáxenes del crisol dellos segundos dempués de zarrar l'obturador.

rayos hacia un espeyu parabólicu de 2 metros de diámetru que fai converxer la radiación nuna superficie d'unos 15 milímetros de diámetru. D'esta miente, ye posible algamar una concentración máxima de 15.000 vegaes la radiación incidente, que ta alredor de los 700-1.000 W/m² nun bon día col cielu escampláu. Pue controlase la radiación na superficie emplegando un obturador daqué asemeyáu a les persianes venecianes.

Nesti experimentu, de mano, preparáronse mestures formaes por 74,5% Al₂O₃, 24,5% CaCO₃ ya 1% Na₂O (1,7% Na₂CO₃, Na₂O emplegóse col envís d'aidar nel procesu de fusión) col oxetivu de consiguir la variedá blanca de los cementos d'aluminatu de calciu asemeyada a les calidaes que s'atopen nel mercáu. Les mestures cargáronse en recipientes ya allugáronse debaxo d'onde impauta'l feixe d'enerxía concentrao.

El tiempu d'ensayu foi de 15-30 minutos dependiendo de los valores de la radiación incidente. Les muestras resultantes tres del tratamientu consistien, sobre too, en CaOAl₂O₃ ya CaO6Al₂O₃ (determinaes por difraición de rayos X) como se deducía de los diagrames de fases enantes de los ensayos. Existen tamién dellos reactivos d'entamu que correspuenden a zones alloñaes del feixe. Asina, ye posible dicir que les temperatures foron abondo altes pa llograr la síntesis de los componentes principales de los cementos refractarios d'aluminatu de calciu.

Polo tanto, pue deducise d'esti trabayu esperimental que l'emplegu de la enerxía solar concentrao permite llograr la temperatura necesaria pa la síntesis de los componentes del cementu d'aluminatu de calciu. Poro, si'l procesu fore escaláu industrialmente, podríen reducirse los costes enerxéticos ya les emisiones de gases d'efeutu ivernaderu na industria'l cementu.

Tratamientu d'escories de la metalurxa del cobre:

El cobre ye un metal vanceyao al ser humanu dende va miles d'años, emplegándose a lo primero en ferramienta, armamentu ya oxetos decorativos. Anguaño, el cobre emplégase, sobre too, nel tresporte de lletricidá a baxa ya media tensión. Úsase tamién en conducciones d'afluyíos ya na industria naval por mor de la so resistencia a la corrosión, n'especial si ta aleáu.

Hai delles teunoloxíes pa producir cobre, sicasí, munches d'elles tán basaes na fusión a mata, que xenera dos fases llíquides que nun son a mezclase ente elles: la mata, que ye más pesada ya concentra'l cobre, ya la escoria, que ye la fase oxidada, formada en gran parte de silicatu de fierro.

Anque l'estudiu de los procesos d'extraición ye perinteresante, lo que de verdá queremos tratar equí ye lo que resulta d'esi procesu, la escoria (Fernández-González *et al.*, 2021).

La escoria, amás de fierro, contién cantidaes variables de cobre, >40 % de fierro ya 1-2% de cobre. P'asitiase na importancia del estudiu del material resultante del procesu d'extraición del cobre, convién apuntar que, añalmente, prodú-

cense 20 millones de tonelaes de cobre, ya que por caúna delles prodúcense ente 2,2 ya 3 tonelaes d'escoria. Esto quier dicir que se manden más de 20 Mt de fierro ya 0,5-1 Mt de cobre a les escombreres. Poro, amás de los problemes d'ocupación de tierres o riesgos de llixiviación de metales, ta, lliteralmente, tirándose munchu dineru a la escombrera.

Foron munchos los investigadores que trabayaron col envís d'atopar aplicaciones pa les escories de cobre, pero entá nun s'atopó una d'usu masivu. Dalgunes de les potenciales aplicaciones de les escories de cobre incluyen l'usu como mediu abrasivu pa llimpiar estructures (Kambham *et al.*, 2007) o la fabricación de cementu (Coursol *et al.*, 2012). Hubo bien d'investigaciones col oxetivu de recuperar el fierro de les escories de cobre, como, por exemplu, un procesu basáu na reducción aluminotérmica (Heo *et al.*, 2016) o la reducción con polvos de coque ya una separación magnética (Li *et al.*, 2013).

La enerxía solar concentrao nun s'emplegare entovía cola fin del reaprovechamientu de la escoria hasta esta investigación. Lo mesmo que nos otros dos estudios d'esta parte del artículu,

entamó en 2016-2017 col trabayu de carauterización de les escories d'una mina de cobre chilena. La escoria emplegao tenía un 42,82% de fierro ya un 1,84% de cobre, determinao por fluorescencia de rayos X, siendo la fase mineralóxica principal la fayalita (Fe_2SiO_4) (cuasi un 86%), demientres que la magnetita (Fe_3O_4) (cuasi un 8%) ya un óxidu doble de fierro ya cobre (CuFe_2O_4) (cuasi un 6%) yeren fases secundaries.

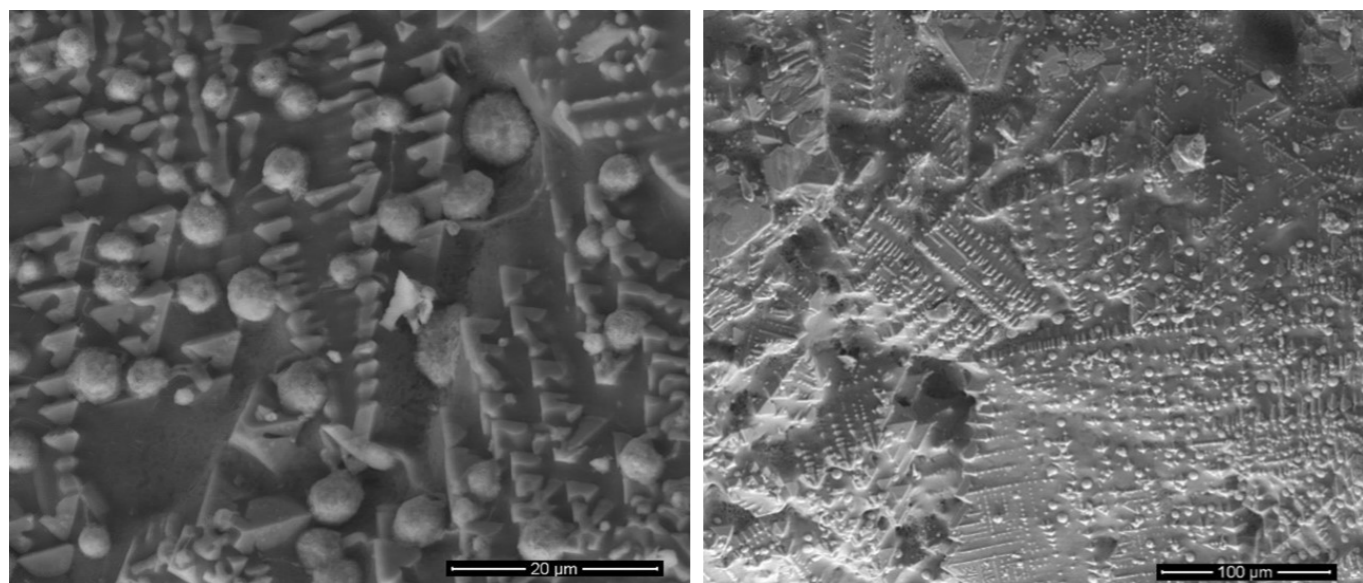
El problema que tien la fayalita ye que, amás de ser un óxidu difícilmente reducible, nun ye magnético, torgando asina la recuperación del fierro de les escories de cobre, mientres que la magnetita, pela so parte, sí lo ye. Asina, emplegando de baldre una fonte d'enerxía como lo ye la enerxía solar concentrao, ye posible algamar la descomposición térmica de la fayalita en magnetita ya síliz ya, d'esta mena, facilitar la separación de dambos óxidos emplegando métodos basaos nel magnetismu.

D'esta miente, fízose un esperimentu al aire llibre que duró ente 15 ya 30 minutos dependiendo de la radiación incidente (870-975 W/m²) ya l'apertura del obturador. Pa facelu emplegóse un fornu solar d'exa vertical asitiáu n'Odeillo (Francia) de 1,5 kW, mesmo que'l de la Figura 4, onde s'algamaron temperatures penriba los 1.973 K.

Tres de los ensayos, analizáronse les muestres emplegando delles téuniques (microscopiu electrónicu, difraición de rayos X ya fluorescencia de

rayos X). Foi posible, entós, ver que parte de la fayalita tresformare en magnetita o n'espineles del so grupu, (vistas al micorscopiu con forma de pica), ya que'l cobre de la escoria (qu'entró como óxidu ya como sulfuru) camudare nun grupu de *pellets* ricos en cobre (65-85 % en pesu de Cu; 5-10 % en pesu de Fe; 2-10 % en pesu d'O; <3 % en pesu de S) como los que s'amuesen na Figura 8. Tres del tratamientu con enerxía solar concentrao, moliéronse les muestres ya peñeráronse a 40 μm , dixebrándose en dos fraiciones, la magnética ya la non magnética. Observóse que na fraición magnética concentrábase fierro en forma de magnetita, demientres que la non magnética tenía 3-6,5 vegaes (5,3-11,2% Cu) más cobre que l'escoria cola que s'entamó (1,8% Cu). Con esti métodu, les escories de cobre podríen convertise nuna fonte secundaria de cobre emplegando enerxía solar concentrao, contando too ello con unos beneficios económicos ya ecolóxicos bultables. Pasaría lo mesmo col fierro, esta metodoloxía aplicada a la escoria podría ser tamién una fonte importante d'esti metal (Fernández-González *et al.*, 2021).

Ello ye, namás que con una fonte enerxética barata como la que tratamos tien sentíu entamar un procesu de tratamientu d'un residuu que requier d'altas temperatures ya d'un gran consumu enerxéticu pa recuperar los sos componentes de valor.



IZQUIERDA

Figura 8. Imáxenes de la escoria de cobre tratada con enerxía solar concentrao.

Referencias bibliográfiques

- Adinberg, A. & Epstein, M. (2004). Experimental study of solar reactors for carboreduction of zinc oxide. *Energy*, 29, 757–769. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00182-8](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00182-8)
- Armas, B., Combescure, C. & Trombe, F. (1976). Chemical vapor deposition of NbB₂ and TaB₂ through heating by concentration of solar radiation. *J. Electrochem. Soc.*, 123 (2), 308–310. <https://doi.org/10.1149/1.2132811>
- Costa-Oliveira, F.A., Granier, B., Badie, J.M., Cruz-Fernandes, J., Guerra-Rosa, L. & Shohoji, N. (2008). Surface singularity upon solar radiation heating of graphite/tungsten powder mixture compacts to temperatures in excess of 1600°C. *Mater. Sci. Forum*, 587–588, 993–997. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.587-588.993>
- Costa-Oliveira, F.A., Rosa, L.G., Fernandes, J.C., Rodríguez, J., Cañadas, I., Martínez, D. & Shohoji, N. (2009). Mechanical properties of dense cordierite discs sintered by solar radiation heating. *Mater. Trans.* 50, 2221–2228. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2008369>
- Coursol, P., Cardona, N., Mackey, P., Bell, S. & Davis, B. (2012). Minimization of copper losses in copper smelting slag during electric furnace treatment. *JOM*, 64, 1305–1313. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0454-6>
- Cruz-Fernandes, J., Guerra, L., Martínez, D., Rodríguez, J. & Shohoji, N. (1998). Influence of gas environment on synthesis of silicon carbide through reaction between silicon and amorphous carbon in a solar furnace at PSA (Plataforma Solar de Almería). *J. Ceramic Soc. Japan*, 106, 839–841. <https://doi.org/10.2109/jcersj.106.839>
- Cruz-Fernandes, J., Anjinho, C., Amaral, P.M., Guerra-Rosa, L., Rodríguez, J., Martínez, D., Almeida Costa Oliveira, F. & Shohoji, N. (2002). Characterization of solar-synthesised TiC_x (X=0.5, 0.625, 0.75, 0.85, 0.90 and 1.0) by x-ray diffraction, density and Vickers microhardness. *Mater. Chem. Phys.* 77, 711–718. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(02\)00131-1](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00131-1)
- Cruz-Fernandes, J., Costa-Oliveira, F.A., Granier, B., Badie, J., Guerra-Rosa, L. & Shohoji, N. (2006). Kinetic aspects of reaction between tantalum and carbon material (active carbon or graphite) under solar radiation heating. *Sol. Energy*, 80, 1553–1560. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.01.001>
- Dias, S., Costa-Oliveira, F.A., Granier, B., Badie, J., Cruz-Fernandes, J., Guerra-Rosa, L. & Shohoji, N. (2007). Nano-meter size WC whiskers grown over a compacted pellet of graphite/tungsten powder mixture heated with an ultra-fast heating rate by a concentrated solar beam. *Mater. Trans.* 48(5), 919–923. <https://doi.org/10.2320/matertrans.48.919>
- Epstein, M., Ehrensberger, K. & Yogev, A. (2004). Ferro-reduction of ZnO using concentrated solar energy. *Energy*, 29, 745–756. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00181-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00181-6)
- Fernández-González, D., Ruiz-Bustanza, I., González-Gasca, C., Piñuela-Noval, J., Mochón-Castaños, J., Sancho-Gorostia-ga, J. & Verdeja, L. F. (2018a). Concentrated solar energy applications in materials science and metallurgy. *Sol. Energy* 170 (8), 520–540. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.065>
- Fernández-González, D., Prazuch, J., Ruiz-Bustanza, I., González-Gasca, C., Piñuela-Noval, J. & Verdeja, L. F. (2018b). Iron metallurgy via concentrated solar energy. *Metals* 8(11), 873. <https://doi.org/10.3390/met8110873>
- Fernández-González, D., Prazuch, J., Ruiz-Bustanza, I., González-Gasca, C., Piñuela-Noval, J. & Verdeja, L. F. (2018c). Solar synthesis of calcium aluminates. *Sol. Energy*. 171(9), 658–666. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.012>
- Fernández-González, D., Prazuch, J., Ruiz-Bustanza, I., González-Gasca, C., Piñuela-Noval, J. & Verdeja, L. F. (2019a). Transformations in the Si-O-Ca system: Silicon-calcium via solar energy. *Sol. Energy*. 181(3), 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.026>
- Fernández-González, D., Prazuch, J., Ruiz-Bustanza, I., González-Gasca, C., Piñuela-Noval, J. & Verdeja, L. F. (2019b). Transformations in the Mn-O-Si system using concentrated solar energy. *Sol. Energy*. 181(5), 148–152. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.004>
- Fernández-González, D., Prazuch, J., Ruiz-Bustanza, I., González-Gasca, C., Piñuela-Noval, J. & Verdeja, L. F. (2019c). The treatment of Basic Oxygen Furnace (BOF) slag with concentrated solar energy. *Sol. Energy*. 180(3), 372–382. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.055>
- Fernández-González, D., Prazuch, J., Ruiz-Bustanza, I., González-Gasca, C., Gómez-Rodríguez, C. & Verdeja, L. F. (2021). Recovery of Copper and Magnetite from Copper Slag Using Concentrated Solar Power (CSP). *Metals*. 11(7), 1032; <https://doi.org/10.3390/met11071032>
- Flamant, G., Hernandez, D. & Traverse, J. (1980). Experimental aspects of the thermochemical conversion of solar energy; Decarbonation of CaCO₃. *Sol. Energy*, 24 (4), 385–395. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(80\)90301-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(80)90301-1)
- Fletcher, E.A. & Noring, J.E. (1983). High temperature solar electrothermal processing- Zinc from zinc oxide. *Energy*, 8, 247–254. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(83\)90100-7](https://doi.org/10.1016/0360-5442(83)90100-7)
- Fletcher, E.A., Macdonald, F.J. & Kunnerth, D. (1985). High temperature solar electrothermal processing-II. Zinc from zinc oxide. *Energy*, 10, 1255–1272. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(85\)90136-7](https://doi.org/10.1016/0360-5442(85)90136-7)
- García-Cambronero, L. E., Ruíz-Román, J. M., Cañadas, I. & Martínez, D. (2004). Características de la estructura celular en espumas d'Al-7Si con mármol obtenidas mediante energía solar concentrada, Memorias del IX Congreso Nacional de Materiales, Vigo, España, pp. 499–502.
- García-Cambronero, L.E., Cañadas, I., Díaz, J.J., Ruíz-Román, J.M. & Martínez, D. (2008). Tratamiento térmico de espumación de precursores de aluminio-silicio en horno solar de lecho fluidificado, Memorias del X Congreso Nacional de Materiales, San Sebastián, España, pp. 261–264.
- García-Cambronero, L.E., Cañadas, I., Martínez, D. & Ruíz-Román, J.M. (2010). Foaming of aluminium-silicon alloy using concentrated solar energy. *Sol. Energy*. 84, 879–887. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.11.014>
- Gopalakrishna, K.R. & Seshan, S. (1984). Solar furnace for small scale metallurgical applications in Energy Developments: New Forms, Renewables, Conservation (Curtis, F.A. (Ed.)), Ontario, Canada: Ed. Pergamon Press, pp. 585–593.
- Granier, B., Badie, J., Costa-Oliveira, F.A., Magalhaes, T., Shohoji, N., Guerra-Rosa, L. & Cruz-Fernandes, J. (2008). Carbide synthesis from graphite/molybdenum powder mixtures at sub-stoichiometric ratios under solar radiation heating to 1900 °C. *Mater. Trans.* 49 (11), 2673–2678. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2008202>
- Granier, B., Shohoji, N., Costa-Oliveira, F.A., Magalhaes, T., Cruz-Fernandes, J. & Guerra-Rosa, L. (2009). Carbide phases synthesised from C/Mo powder compacts at specified sub-stoichiometric ratios by solar radiation heating to temperatures between 1600 °C and 2500 °C. *Mater. Trans.* 50 (12), 2813–2819. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2009167>
- Guerra-Rosa, L., Miguel-Amaral, P., Anjinho, C., Cruz-Fernandes, C. & Shohoji, N. (2002). Fracture toughness of solar-sintered WC with Co additive. *Ceram. Int.* 28, 345–348. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(01\)00099-2](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(01)00099-2)
- Gutiérrez-López, J., Levenfeld, B., Várez, A., Cañadas, I. & Rodríguez, J. (2010). Solar sintering of Ni-Zn ferrites: Densification and magnetic properties, PM2010 World Congress-Alternative Sintering Processes. Florencia (Italia) 230–237.
- Heo, J.H., Chung, Y. & Park, J.H. (2016). Recovery of iron and removal of hazardous elements from waste copper slag via a novel aluminothermic smelting reduction (ASR) process. *J. Clean. Prod.* 137, 777–787. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.154>
- Herranz, G., Romero, A., de Castro, V. & Rodríguez, G.P. (2013). Development of high-speed steel sintered using concentrated solar energy. *J. Mater. Process. Technol.* 213, 2065–2073. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.06.002>
- Imhof, A. (1997). Decomposition of limestone in a solar reactor. *Renew. Energy*. 10 (2/3), 239–246. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)00072-9](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)00072-9)

Kaddou, A.K. & Abdul-Latif, A. (1969). The feasibility of joining metal using a solar furnace. *Sol. Energy*, 12, 377–378. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(69\)90051-6](https://doi.org/10.1016/0038-092x(69)90051-6)

Kambham, K., Sangameswaran, S., Datar, S.R. & Kura, B. (2007). Copper slag: Optimization of productivity and consumption for cleaner production in dry abrasive blasting. *J. Clean Prod.* 15(5), 465–473. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.024>

Karalis, D.G., Pantelis, D.I. & Papazoglou, V.J. (2005). On the investigation of 7075 aluminum alloy welding using concentrated solar energy. *Solar Energy Mater. Solar Cells.* 86, 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.07.007>

Kim, I.S., Prasad, Y.K.D.V. & Stoyanov, L.A. (2004). A study on an intelligent system to predict the tensile stress in welding using solar energy concentration. *J. Mater. Process. Technol.* 153–154, 649–653. <https://doi.org/10.1016/j.jmatproc.2004.04.111>

Laplaze, D., Bernier, P., Flamant, G., Lebrun, M., Brunelle, A. & Della-Negra, S. (1996). Solar energy: Application to the production of fullerenes. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 29, 4943–4954. <https://doi.org/10.1088/0953-4075/29/21/008>

La Nueva España (2020). Asturiana de Zinc consume tanta electricidad como la comunidad de La Rioja. <https://www.lne.es/aviles/2020/02/06/asturiana-zinc-consume-electricidad-comunidad-20399948.html#:~:text=La%20empresa%20Asturiana%20de%20Zinc,525.794%20toneladas%20de%20cinc%20metal>

Li, K., Ping, S., Wang, H. & Ni, W. (2013). Recovery of iron from copper slag by deep reduction and magnetic beneficiation. *Int. J. Min. Met. Mater.* 20, 1035–1041. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0831-3>

Loutzenhiser, P.G., Tuerk, O. & Steinfeld, A. (2010). Production of Si by vacuum carbothermal reduction of SiO₂ using concentrated solar energy. *JOM*, 62, 49–54. <https://doi.org/10.1007/s11837-010-0137-0>

Lytvynenko, Y.M. (2013). Obtaining aluminum by the electrolysis with the solar radiation using. *Appl. Solar Energy.* 49 (1), 4–6. <https://doi.org/10.3103/S0003701X13010088>

Meier, A., Bonaldi, E., Cella, G.M., Lipinski, W., Wullemmin, D. & Palumbo, R. (2004). Design and experimental investigation of a horizontal rotary reactor for the solar thermal production of lime. *Energy.* 29, 811–821. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00187-7](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00187-7)

Meier, A., Bonaldi, E., Cella, G.M. & Lipinski, W. (2005a). Multitube rotary kiln for the industrial solar production of lime. *J. Sol. Energy Eng.* 127 (3), 386–395. <https://doi.org/10.1115/1.1979517>

Meier, A., Gremaud, N. & Steinfeld, A. (2005b). Economic evaluation of the industrial solar production of lime. *Energy Convers. Manage.* 46, 905–926. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.06.005>

Meier, A., Bonaldi, E., Cella, G.M., Lipinski, W. & Wullemmin, D. (2006). Solar chemical reactor technology for industrial production of lime. *Sol. Energy.* 80, 1355–1362. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.05.017>

Murray, J.P. (2001). Solar production of aluminum by direct reduction: Preliminary results for two processes. *J. Sol. Energy Eng.* 123, 125–132. <https://doi.org/10.1115/1.1351809>

Murray, J.P., Flamant, G. & Roos, C.J. (2006). Silicon and solar-grade silicon production by solar dissociation of Si₃N₄. *Sol. Energy*, 80, 1349–1354. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.009>

Osinga, T., Frommherz, U., Steinfeld, A. & Wieckert, C. (2004). Experimental investigation of the solar carbothermic reduction of ZnO using a two-cavity solar reactor. *J. Sol. Energy Eng.* 126, 633–637. <https://doi.org/10.1115/1.1639001>

Palumbo, R.D. & Fletcher, E.A. (1988). High temperature solar electrothermal processing-III. Zinc from zinc oxide at 1200–1675 K using a non-consumable anode. *Energy*, 13, 319–332. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(88\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0360-5442(88)90027-8)

Revuelta-Acosta, J.D., García-Díaz, A., Soto-Zarazua, G.M. & Rico-García, E. (2010). Adobe as sustainable material: A thermal performance. *J. Appl. Sci.* 10 (19), 2211–2216. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.2211.2216>

Rodríguez, M.A. & Soroza, B. (2006). Determination of the optimum composition of adobe brick for a school in Cuba. *Materiales de Construcción* 56 (282), 53–62. <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i282.27>

Rodríguez, G.P., Herranz, G. & Romero, A. (2013). Solar gas nitriding of Ti6Al4V alloy. *Appl. Surf. Sci.*, 283, 445–452. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.06.128>

Romero, A., García, I., Arenas, M.A., López, V. & Vázquez, A. (2013). High melting point metals welding by concentrated solar energy. *Sol. Energy*, 95, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.019>

Rossi, C. (2010). Archimedes' cannons against the roman fleet?, en *The Genius of Archimedes-23 Centuries of Influence on Mathematics, Science and Engineering*, Proceedings of an International Conference held at Syracuse, Italia, 8-10 Xunu, 2010 (editores Stephanos A. Paipetis, Marco Ceccarelli), Londres: Springer, pp. 113–132.

Ruiz-Bustanza, I., Cañadas, I., Rodríguez, J., Mochón, J., Verdeja, L.F., García-Carcedo, F. & Vázquez, A. (2013). Magnetite production from steel wastes with concentrated solar energy. *Steel Res. Int.* 84, 207–217. <https://doi.org/10.1002/srin.201200145>

Salman, O.A. (1988). Thermal decomposition of limestone and gypsum by solar energy. *Sol. Energy.* 41 (4), 305–308. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90025-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90025-4)

Shohoji, N., Badie, J., Granier, B., Costa-Oliveira, F.A., Cruz-Fernandes, J. & Guerra-Rosa, L. (2007). Formation of hexagonal η-MoC_{1-x} phase at a temperature lower than 1660 °C by solar radiation heating under presence of excess free carbon. *Int. J. Refractory Metals Hard Mater.* 25 (3), 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2006.05.004>

Sibieude, F., Ducarroir, M., Tofighi, A. & Ambriz, J. (1982). High temperature experiments with a solar furnace: The decomposition of Fe₃O₄, Mn₃O₄, CdO. *Int. J. Hydrogen Energy*, 7, 79–88. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(82\)90209-9](https://doi.org/10.1016/0360-3199(82)90209-9)

Steinfeld, A., Brack, M., Meier, A., Weidenkaff, A. & Wullemmin, D. (1998). A solar chemical reactor for co-production of zinc and synthesis gas. *Energy*, 23, 803–814. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00026-7](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00026-7)

Suresh, D. & Rohatgi, P.K. (1979). Melting and casting of alloys in a solar furnace. *Sol. Energy*, 23, 553–555. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90084-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90084-7)

Suresh, D. & Rohatgi, P.K. (1981). Heat transfer analysis on metal-melting in a foundry solar furnace. *Sol. Energy*, 26, 87–90. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90116-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90116-X)

Tzouganatos, N., Matter, R., Wieckert, C., Antrekowitsch, J., Gamroth, M. & Steinfeld, A. (2013). Thermal recycling of Waelz oxide using concentrated solar energy. *JOM*, 65 (12), 1733–1743. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0778-x>

Wieckert, C., Frommherz, U., Kräupl, S., Guillot, E., Olalde, G., Epstein, M., Santén, S., Osinga, T. & Steinfeld, A. (2006). A 300kW solar chemical pilot plant for the carbothermic production of zinc. *J. Sol. Energy Eng.* 129 (2), 190–196. <https://doi.org/10.1115/1.2711471>

Yu, Z.K., Zong, Q.Y. & Tam, Z.T. (1982). A preliminary investigation on surface hardening of steel and iron by solar energy. *J. Heat Treat.* 2, 344–350. <https://doi.org/10.1007/BF02833201>

Zhilinska, N., Zalite, I., Rodríguez, J., Martínez, D. & Cañadas, I. (2003). Sintering of nanodisperse powders in a solar furnace, EUROPM2003. Sintering 423–428.