

***Bases científicas da revolución dos metais  
no século XX. Unha prospección  
tecnolóxica.***

*O máis fermoso que podemos experimentar é o misterio das cousas.*

*(Albert Einstein)*

*O que fai humanos aos humanos é a capacidade de falar e de innovar.*

*(Benoît Mandelbrot)*

## ***Limiar***

Excelentísimo Señor Presidente,

Excelentísimo Reitor Magnífico da Universidade de Vigo,

Excelentísimos Señores Académicos,

Autoridades, colegas, amigas e amigos.

**Permítanme que estas primeiras verbas sexan para expresar a miña sentida gratitude a todos os que promoveron e apoiaron o meu nomeamento como membro numerario da Real Academia Galega de Ciencias. Máis ben sei, que non abonda con manifestar a miña gratitude. Acompañareina co compromiso de esforzarme en ofrecer á Academia o mellor que os meus estudos me foron deixando como pouso e co desexo sincero de que a miña vinculación a esta casa sexa frutífera. Síntome, tamén, moi honrado pola presenza de moitos ben queridos e vellos amigos.**

## ***(I) Unha sucinta historia da metalurxia***

A metalurxia é a ciencia e tecnoloxía dos metais. Estuda o comportamento dos elementos metálicos, os seus compostos inter-metálicos e as súas aliaxes.

A metalurxia tense practicado dende os tempos máis remotos. O traballador de metais xa se menciona na Biblia e en moitas mitoloxías. Lembremos o mito do *rei Midas* que todo o que tocaba se facía de ouro; pero parece que houbo un rei Midas histórico, ó redor do 700 a.C., e no seu reino de Frixia, o que hoxe é Turquía, o mineral de cobre era moi rico en Zn en lugar de Sn (que é o máis frecuente), polo que ó fundilo obtíñase latón no canto de bronce, que como todos vostedes saben ten un aspecto áureo cun brillo sedutor doadamente confundible co ouro. Nos nosos días, a vella sentenza de que *non é ouro todo o que reluce* segue vixente; lembremos, por exemplo, que as medallas olímpicas de ouro son en realidade de prata, que as estatuíñas dos *Óscares* da Academia do Cinema de Hollywood son dunha aliaxe de estaño, antimonio e cobre e que quen compra o célebre damasquinado, ou ouro de Toledo, cree comprar ouro macizo e non pensa que na súa xoia poida aparecer a ferruxe porque, con frecuencia, os debuxos arabescos e outros motivos non permiten que a superficie estea totalmente cuberta de finos fíos de ouro e deixa moito aceiro ó descuberto.

A arte de fundir, refinar e moldear os metais tivo un gran desenvolvemento, tanto entre os exipcios, babilonios e sirios coma entre os chineses. En Europa, foi o bronce a primeira aliaxe usada en aplicacións prácticas. Máis tarde, aproximadamente 1000 anos a.C., e debido ó seu alto punto de fusión, iniciouse a extracción e uso do ferro. Pode estimarse que a chamada *Idade do Ferro* é o principio da nosa civilización actual.

Existe unha moi ampla bibliografía que amosa que a evolución no tempo dos procedementos de obtención dos metais máis tradicionais e os seus usos nos distintos países foi *longa e a modo*.

É a partir da *segunda metade* do século XVIII, coa utilización do carbón mineral e o soprado con máquina de vapor, e a *mediados do século XIX*,

co emprego intensivo dos fornos altos, do convertedor e dos fornos *Martin-Siemens*, cando se produce un crecemento acelerado da metalurxia que da lugar á etapa de meirande industrialización no mundo. Inclusive, nace unha arquitectura urbana singular con fachadas de fundición de ferro e constrúese a *torre Eiffel* para exposición universal de 1889.

Xa no século XX, introdúcense novos métodos de maior produtividade e afino, como o forno eléctrico, o afino en culler, a coada continua, a refusión por electro-escoura e por baleiro, etc.

Despois de deixar constancia desta evolución da metalurxia, quizais, para moitos de vostedes, poida parecer sorprendente postular que no século XX, o século da física cuántica, da medicina moderna, da electrónica, das telecomunicacións, das tecnoloxías da información e das aeroespaciais, entre outras, se estivese a producir unha auténtica revolución dos metais, en especial a partir de 1950. Con todo, así foi.

De certo, en gran parte da segunda metade do século pasado, o crecemento da metalurxia foi mesmamente exponencial. Aválano os datos referidos á industria do aceiro que, a miúdo, é considerada como un indicador do progreso económico polo seu papel crítico nas infraestruturas e no desenvolvemento xeral da economía. Non esquezamos que o xerme do que hoxe é a imponente maquinaria dos *Vinte e oito* sementouse en 1951, ano no que viu a luz a *CECA*, a *Comunidade Europea do Carbón e do Aceiro*. Non é fortuíto que o símbolo da exposición universal de Bruselas do ano 1958, o ben coñecido *Atomium*, fose a celda elemental cristalina do ferro. A produción mundial de aceiro en 1950 era tan só de 200 millóns de toneladas e ó rematar o século XX de 850, mais de catro veces.

Dende un punto de vista cualitativo, lembremos que, se ben, tres de cada catro elementos da táboa periódica son metais, antes do comezo do século XX a maioría deles limitábanse a ocupar o seu posto na táboa periódica, agás algúns como o *ouro*, a *prata*, o *cobre*, o *ferro*, o *estaño* e o *cinc*. É neste século cando se empezaron a utilizar practicamente todos os metais coñecidos, dende os moi brandos e dúctiles ata os máis duros e

fráxiles, dende os máis lixeiros ata os máis pesados e dende os de máis baixo punto de fusión ata os máis resistentes ás altas temperaturas.

O *molibdeno* e o *volframio* foron só o anticipo desta revolución, aínda que, lamentablemente, poderían clasificarse como os “*metais da guerra*” porque o seu desenvolvemento inicial estivo ligado ás dúas guerras mundiais.

En efecto, o *molibdeno*, que funde a 2.623 °C e ten un baixo coeficiente de dilatación, habería de converterse nun metal moi buscado durante a gran guerra do 14 para combater o choque térmico que se producía ó disparar os tristemente famosos canóns alemáns “*Gran Berta*”. E non sería ata os anos sesenta cando o molibdeno comezou a utilizarse a feito nos aceiros inoxidables e para formar os aceiros aliados ó molibdeno.

O *volframio*, ou tungsteno, situado na táboa periódica xusto debaixo do molibdeno, con propiedades parecidas pero cunha temperatura de fusión moito maior, de 3.422 °C, converteuse no metal por excelencia da segunda guerra mundial. Os contendentes o necesitaban para fabricar maquinaria e obuses capaces de atravesar as blindaxes. A historia do *wólfram* (nome alemán deste metal) é moi coñecida en Galicia e Portugal, dende onde se mandaron miles de toneladas ós dous bandos da guerra. Ó longo do século XX, o uso do *volframio* estendeuse dunha maneira importante, sendo hoxe un dos elementos básicos na produción de aliaxes de aceiro duras e resistentes, especialmente nos aceiros de ferramentas.

O *aluminio* inicia en 1889 a súa produción industrial, case de forma simultánea nos EUA e en Europa, co procedemento electrolítico ideado de forma independente polo enxeñeiro americano *Charles Martin Hall* e o francés *Paul Héroult*, que permitiu obtelo a prezos moderados e que deu fin a sesenta anos de reinado do aluminio coma o metal máis precioso do mundo. Tan só uns poucos anos antes, en 1884, os enxeñeiros do goberno dos EUA, para alardear da potencia industrial do seu país, remataron o monumento a Washington cunha pirámide de aluminio de case tres quilos de peso.

*Hall* fundou en Pittsburgh, a *Aluminum Company of America (ALCOA)*, un dos negocios de máis éxito de toda a historia, só comparable coa revolución dos semicondutores de silicio, oitenta anos máis tarde. É a partir da segunda guerra mundial co rápido crecemento da industria aeronáutica cando se produce o despegue do Al, de tal xeito que se converteu no primeiro metal de uso xeneralizado dende o descubrimento do ferro, sendo hoxe en día o segundo metal máis consumido. A produción de aluminio pasou de ser a penas de 6 millóns de toneladas en 1964 a máis de 45, cincuenta anos máis tarde. As súas aliaxes son as aliaxes lixeiras máis utilizadas na industria do transporte aeronáutico, do automóbil e da electricidade, da construción e do envase.

O *níquel*, é outro metal esencial que tivo un desenvolvemento espectacular na segunda metade do século XX como elemento de aliaxe dos aceiros inoxidables, dos crioxénicos e dos modernos aceiros envellecibles *maraging*. Ademais, a súa alta temperatura de fusión e a boa resistencia á oxidación a temperaturas elevadas fixo que se desenvolvesen a partir de 1955 as *superaliaxes* de base níquel que manteñen un equilibrio aceptable de propiedades mecánicas e químicas ata uns 1.100 °C. A finais do século, a súa produción aproximábase ó millón e medio de toneladas por ano, fronte ós escasos 250.000 kg en 1950. Cerca do 90% emprégase en aliaxes e dous terzos nos aceiros inoxidables. Hai ó redor de 3.000 aliaxes de níquel.

Outro dos metais esquecidos da táboa periódica era o *titanio* que comezou a utilizarse a partir de 1946, cando o metalúrxico luxemburgués, *William Justin Kroll* demostrou que se podía obter titanio puro por redución do tetracloruro de titanio con magnesio. A finais do século XX, o Ti e as súas aliaxes acadan unha produción mundial de case 100.000 Tm debido ás súas características de resistencia mecánica a altas temperaturas, baixa densidade e alta resistencia á corrosión. Empréganse esencialmente en aplicacións biomédicas e na industria aeroespacial e aeronáutica para construír os forxados estruturais e supoñen, por exemplo, entre o 10 e o 35% do peso total dos avións actuais.

Medras similares experimentaron no século XX o resto dos metais, especialmente os ó redor de 20 considerados de interese estratéxico para

a industria e a defensa. (*Antimonio, Berilio, Cobre, Cinc, Cromo, Cobalto, Estaño, Litio, Magnesio, Manganeso, Niobio, Chumbo, Uranio, Vanadio e os seis citados anteriormente*).

## **(II) Causas da revolución dos metais**

¿Cáles son as causas que propiciaron o nacemento dun novo século de ouro da metalurxia?, ó meu entender, son varias.

*En primeiro lugar*, a necesidade de obter respostas ás novas exixencias tecnolóxicas que se presentan despois da segunda guerra mundial. As empresas metalúrxicas realizan fortes investimentos para a súa modernización e para poder presentar produtos novos, ou mellorados, que poidan competir con éxito cos novos materiais que están a nacer. Así, por exemplo, dende o punto de vista do eido estrutural é necesario obter materiais máis resistentes pero sen perder a súa ductilidade, máis tenaces, máis lixeiros e, ó mesmo tempo, máis fiables para poder minimizar os coeficientes de seguridade. Sectores tan novos naquel momento como a aviación, o automóbil e, logo, o transporte ferroviario de alta velocidade, necesitan materiais lixeiros para aforrar combustible pero que teñan a un tempo unha resistencia mecánica específica elevada. A construción civil precisa de materiais capaces de soportar estruturas esveltas que compatibilicen un deseño atractivo coa funcionalidade; emporiso, non é fortuíto, por exemplo, que os edificios máis altos do mundo estean construídos de aceiro. No sector enerxético son necesarios materiais que soporten condicións extremas de temperatura e outros moitos sectores, químico, petroquímico, alimentario, etc., precisan de aliaxes resistentes á corrosión.

*En segundo lugar*, o coñecemento acadado pola formación de grupos sobranceiros nas principais universidades do mundo que abordan a investigación científica da metalurxia condicionada directamente polas preguntas que derivan do desenvolvemento do coñecemento e de imperativos tecnolóxicos. Por primeira vez na historia, a metalurxia científica empeza a dar pulo ó desenvolvemento tecnolóxico. Así, por exemplo, a finais da década de 1950 créase na *Universidade de Oxford* o primeiro *Departamento* independente de Metalurxia, dirixido polo prof. *Willian Hume-Rothery*. Tan só, uns poucos anos antes, os profesores *Charles Heycock* e *Henry Neville*, fundaran o *Departamento de Metalurxia* na *Universidade de Cambridge*.



Nos EUA, os actuais departamentos de *Ciencia dos Materiais e Enxeñaría* do MIT e da *Universidade de Stanford*, por poñer dous exemplos representativos, naceron nestes mesmos anos a partir dos estudos de metalurxia.

En España, o ensino da metalurxia agroma moi cedo na Escola de Enxeñeiros de Minas de Madrid, en 1836, cunha materia de metalurxia xeral no primeiro curso e outra de metalurxia especial en segundo impartidas polo Prof. Gómez Pardo. En 1947 nace o *Instituto del Hierro y del Acero* (C.S.I.C.), que será o cerne en 1963 do actual *Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas* (CENIM). En 1960, créase a primeira cátedra de *Metalurxia na Universidade Complutense de Madrid* e, moi poucos anos despois, en 1966, a da *Universidade de Barcelona*. A primeira cátedra é ocupada polo profesor *Jimeno Gil*, o primeiro académico metalúrxico español. A cátedra de Barcelona é ocupada por primeira vez, polo profesor *Calvo*, que fixera o seu doutoramento en Metalurxia na *Universidade de Cambridge*, no ano 1957. Así mesmo, os libros "*Tratamientos Térmicos de los Aceros*", do profesor *Apraiz Barreiro*, publicado en 1954 na cátedra de Siderurxia da E.T.S. de Enxeñeiros Industriais de Bilbao, e "*Metalurgia General: Extractiva, física, mecánica y química*" do profesor *Jimeno Gil*, publicado en 1955, son, probablemente, os primeiros libros de metalurxia da universidade española.

En Galicia, nace en Vigo, en 1967, a *Asociación de Investigación Metalúrgica del Noroeste*, AIMEN, hoxe convertida no potente *Centro Tecnolóxico AIMEN*, baixo a dirección do profesor *Priegue Guerra*, para dar pulo ó desenvolvemento tecnolóxico da industria naval e metal-mecánica galega. Dende o primeiro momento conta coa colaboración estreita, entre outros, do profesor *Calvo*, e con colaboracións puntuais de prestixiosos científicos como o Dr. *Morrogh*, descubridor da fundición de ferro dúctil, e do Dr. *Minkoff*, profesor do Instituto Tecnolóxico de Haifa, e un dos primeiros inmigrantes americanos que chegaron a moreas para dar afouteza á nova nación xudía. Tiven a honra de colaborar con todos eles nos anos oitenta. Permítanme lembrar como unha simple anécdota desta cooperación, o informe emitido ó cabido da catedral de Santiago

sobre as causas da fenda da campá a Berenguela da torre do reloxo que motivou que se fundise unha nova nos Países Baixos, uns anos mais tarde.

Outra das causas deste século de ouro da metalurxia é o desenvolvemento acelerado dos equipos de caracterización e ensaio que permiten un coñecemento máis profundo, inclusive a nivel atómico, das relacións que existen entre microestrutura e propiedades. Debemos salienta o papel relevante que desempeñaron as técnicas de microscopía e as espectroscópicas na caracterización dos metais. A partir do microscopio metalográfico óptico de *Sorby* desenvólvense as técnicas de microscopía avanzadas como as electrónicas de barrido (SEM) e de transmisión (TEM) coas súas distintas variantes. Ademais, a utilización conxunta da microscopía electrónica y da microanálise transformou completamente o estudo da microestrutura e a súa perspectiva composicional. A invención en 1981 da microscopía de efecto túnel (STM), coa súa variante posterior da microscopía de forza atómica (AFM), permitiu obter a meirande resolución de imaxe ata agora alcanzada, da orde de décimas de nanometro. (0,1 nm de resolución lateral e 0,01 nm de resolución de profundidade).

Entre as técnicas espectroscópicas temos que salienta as de difracción de Raios X, de electróns e neutróns, e as electrónicas para análise superficial de electróns AUGER (AES) e de fotoelectróns de Raios X (XPS). Se ben, a *difracción de raios X* ten sido a técnica máis usada para a caracterización dos materiais cristalinos, a difracción de electróns permite identificar estruturas cristalinas e examinar defectos do cristal en áreas extraordinariamente pequenas, e a difracción de neutróns permite facer análises de alta precisión das tensións residuais en, por exemplo, compoñentes aeroespaciais.

Os métodos de ensaio de materiais como os termo-analíticos e os mecánicos de dureza, desgaste, resistencia á tracción, tenacidade á fractura, fatiga e termofluencia, completan esta breve descrición. Teñen especial relevancia histórica os ensaios de tenacidade ó impacto para medir as temperaturas de transición tenaz-fráxil dos metais. Estas variacións de comportamento en función da temperatura foron as causantes, durante a segunda guerra mundial, de numerosos

afundimentos no Atlántico Norte da famosa serie de buques de transporte militar *Liberty*, e que tivo o seu primeiro antecedente coñecido no afundimento do *Titanic* en 1912. En España, foi especialmente relevante a rotura catastrófica das esferas de Gas Madrid cando eu era estudante de enxeñaría.

E por último, pero non menos importante, "*Last but not least*", como dirían os británicos, o forte impacto ambiental que as industrias metalúrxicas producían e a falla de recursos minerais no primeiro mundo, obrigaron ás empresas a optimizar o aproveitamento dos recursos naturais, necendo a *metalurxia de segunda fusión*. Así, no ano 2013, o 28% da produción de aceiro procedeu da reciclaxe de ferralla e na actualidade a reciclaxe do aluminio aforra máis de 90 millóns de toneladas anuais de emisións de CO<sub>2</sub>. A memoria colectiva aínda ten presente a forte contaminación ambiental de cidades como *Pittsburgh*, *Duisburg* ou *Bilbao*, hoxe felizmente recuperadas.

### **(III) Bases científicas da revolución dos metais**

Establecidas as causas que propiciaron o nacemento dun novo século de ouro da metalurxia, permítanme profundar un pouco máis no papel xogado polo coñecemento científico, que foi determinante do desenvolvemento tecnolóxico tan acelerado no século XX. Para iso hai que ter en conta que ata o final do século XIX, aínda que a metalurxia era unha tecnoloxía sumamente florecente e a condición *sine qua non* da civilización material, era unha arte e non unha ciencia e, nin tan sequera, é propio falar dunha tecnoloxía. Sen intentar examinar polo miúdo a lenta transformación da metalurxia nunha ciencia propiamente dita, paréceme instrutivo esbozar as principais etapas dese vieiro baseadas nas publicacións científicas máis salientables que se foron producindo.

As primeiras publicacións coñecidas e que poden considerarse os textos precursores dunha metalurxia científica, son as obras *Pirotechnia* de *Biringuccio*, publicada en 1540, e *De Re Metallica* de *Georgius Agricola* en 1556.

En 1876, *Willard Gibbs*, primeiro doutor en enxeñaría pola *Universidade de Yale*, publica *O equilibrio das substancias heteroxéneas*. En 1914, *Walter Rosenhain*, un dos máis influentes metalúrxicos do UK, publicou *Unha introdución ao estudo da metalurxia física*. A partir dos estudos de *Gibbs e Rosenhain*, un amplo grupo de investigadores construíron un número moi importante de diagramas de fase, de tal xeito que en 1936 publicouse o primeiro atlas dos diagramas de fase binarios metálicos. Outro feito a salientar que se obtivo a partir da aplicación das *Regras de Fases de Gibbs*, foi que a termodinámica permite a unha fase non ser exactamente estequiométrica, é dicir, que unha fase pode desviarse da súa composición ideal sen perder a súa estrutura cristalina.

En 1948 e despois en 1953, aparecen dous libros moi importantes de *Alan Cottrell*, *Metalurxia estrutural teórica*, e *Dislocacións e fluxo plástico en cristais*, nos que pon en valor os conceptos da teoría electrónica dos metais e aliaxes e as súas aplicacións ós defectos cristalinos. Así, o concepto de "*atmosfera de Cottrell*" explica como as *dislocacións*, ou defectos lineais dos cristais, son ancoradas nalgúns metais por átomos

intersticiais cando se deforman plasticamente. O seu descubrimento permitiu a fabricación de aceiros de moi alta capacidade de deformación empregados, por exemplo, nos paneis de peche das carrozarías dos automóviles modernos. Un dos grandes problemas iniciais foi entender cómo as relativamente poucas *dislocacións* que existen nos cristais poden multiplicarse por un factor de máis de mil durante a deformación plástica. A resposta coñécese actualmente como a *fonte de Frank-Read*, en honor a *Charles Frank* y *Thornton Read*.

En 1953 nace a revista *Acta Metallurgica* e, en 1967, o número de artigos breves chegou ser tan grande que foi necesario reagrupalos nunha nova revista *Scripta Metallurgica*. Ámbolos títulos latinos tiñan a intención de simbolizar o seu carácter internacional. A partir destas revistas comezaron a aparecer numerosas publicacións de distinta natureza dedicadas a distintas categorías de materiais e procesos, algunhas son altamente específicas e outras, pola contra, de moi amplo espectro.

En 1961, *George E. Dieter*, na actualidade profesor emérito da *Universidade de Maryland*, publica o primeiro libro de *Metalurxia Mecánica*, unha rama da metalurxia física que intenta relacionar o comportamento e resposta dos metais en relación coas forzas aplicadas, e moi pouco tempo despois, en 1966, *W.J. Tegard*, publica *Elementos de Metalurxia Mecánica* que xunto co de R.W.K. Honeycombe, *A Deformación Plástica dos Metais (1968)*, forman os tres libros básicos desta rama e son os precursores da moderna disciplina de enxeñaría, *Mecánica da fractura*, que acada a súa madurez nas dúas derradeiras décadas do século XX.

En 1964 e en 1974 publícanse os libros *Principios de solidificación*, de *Bruce Chalmers*, profesor de metalurxia na *Universidade de Harvard*, e *Procesos de solidificación*, de *Merton C. Flemings*, profesor do MIT, que se converten en referencias obrigadas na solidificación dos metais e na cinética dos cambios de fase.

Por último, en 1966, *Barrett e Massalski* publican *Estrutura dos metais*, un clásico da metalurxia física para interpretar as transformacións de fase, aínda que os mecanismos subxacentes están mellor detallados nun libro posterior publicado en 1981 por *Porter e Easterling*, *Transformacións de*

***fase en metais e aliaxes.*** As cinéticas de nucleación e crecemento das transformacións de fase teñen demostrado ser da maior importancia práctica, porque gobernan os procesos de tratamento térmico das aliaxes na industria.

#### **(IV) Unha prospección tecnolóxica**

O comentado ata este momento permítenos facer unha *prospección* do desenvolvemento tecnolóxico da metalurxia nos próximos anos, ó menos a medio prazo, e identificar as áreas estratéxicas de investigación e desenvolvemento emerxentes que condicionarán o seu futuro.

Dende un punto de vista cuantitativo, os comezos do século XXI indican que os metais seguirán ocupando un lugar preeminente entre todos os materiais aínda que os seus ritmos de crecemento de produción serán moi distintos segundo o tipo de aliaxe. Así, por exemplo, no aceiro, entre os anos 2000 e 2013, produciuse un crecemento a un ritmo moi moderado do 5%, aproximadamente, cada cinco anos. A pesares diso, no ano 2013 acadouse unha produción *récord* de 1.600 millóns de toneladas. Sen embargo, nos metais lixeiros os seus ritmos de crecemento medios anuais foron moi altos, especialmente no caso do Al, 6%, do Mg, 6,1%, e do Ti, 7,5%. Así mesmo, os metais base das superalixes, o Ni e o Co, tamén están acadando nestes comezos de século ritmos de crecemento medios anuais do 6% e do 12% respectivamente.

Dende un punto de vista cualitativo, os avances científicos e tecnolóxicos aínda están tendo lugar en numerosas áreas da metalurxia, polo que non é doado realizar unha prospección simple coa curta experiencia dispoñible. De seguido, imos falar dun xeito sucinto, na medida do posible, das seguintes:

- A) Os aceiros de ultra alta resistencia mecánica,***
- B) As novas superalixes,***
- C) As alixes amorfas,***
- D) Os materiais compostos de matriz metálica,***
- E) As alixes de alta entropía,***
- F) As alixes con memoria de forma,***
- G) Os biomateriais metálicos e as alixes biodegradables.***

**(A) Os aceiros de ultra alta resistencia mecánica.**

A aplicación da metalurxia física moderna e do control de procesos avanzados ten permitido que estean a se desenvolver aceiros de composicións e procedementos de procesado “a medida” para cada aplicación específica. Así, conséguense aceiros *avanzados de ultra alta resistencia* mecánica. Entre estes últimos pódense distinguir aqueles que pertencen á *primeira xeración* que empezaron a se desenvolver a finais do século pasado, e nos que se conseguen resistencias á tracción superiores a 1700 MPA.

Os aceiros avanzados de *segunda xeración* combinan a súa alta resistencia cunha excelente conformabilidade. Esta combinación óptima é particularmente atractiva nos reforzos estruturais e pezas para absorber a enerxía de choque durante unha colisión nas carrozarías dos automóbiles. Entre a ampla variedade de aceiros en vías de desenvolvemento destacan os *austeníticos de gran fino con alto Mn* e con baixa enerxía acumulada en forma de defectos de amoreado dos planos cristalográficos (SFE), en estudo polo *Max Planck Institute for Iron Research*, e o *German Steel Institute*, que son especialmente prometedores cando se produce un nano-maclado mecánico (TWIP) durante a súa deformación que pode ser interpretado como un efecto de *Hall-Petch* dinámico. Obtéñense entón excelentes propiedades mecánicas ó combinar alta ductilidade e alta resistencia. Sen embargo, os mecanismos responsables desta alta velocidade de endurecemento por deformación están aínda en discusión.



**(B) *As novas superalixes:***

As superalixes son a aristocracia actual do mundo metalúrxico porque dan resposta a condicións extremas de servizo. O seu deseño demostra que pode conseguirse unha estreita colaboración entre a moderna metalurxia física e os procesos de fabricación na procura dun obxectivo non doado.

Este desenvolvemento ten permitido un aumento constante das temperaturas de entrada das turbinas de gas e espérase que a tendencia continúe. Ó redor da metade do uso das superalixes faise en aplicacións onde a temperatura de servizo está cerca da temperatura de fusión da aliaxe. Polo tanto, é común o uso de elementos monocristalinos. O paradigma no desenvolvemento futuro das superalixes céntrase na súa redución de peso, en mellorar a resistencia á oxidación e corrosión mentres se mantén a resistencia mecánica da aliaxe.

**(C). *As alixes amorfas.***

O descubrimento dos *vidros metálicos* e o seu importante desenvolvemento teórico dos últimos vinte anos ten conducido a un gran aumento da importancia industrial das alixes amorfas e espérase que continúe a partir das primeiras alixes comerciais de base titanio desenvolvidas orixinalmente no *Departamento de Física Aplicada e Ciencia de Materiais* do *CALTECH*. O nacemento e desenvolvemento dos *vidros metálicos* teñen a súa base no entendemento científico *dunha velocidade crítica de solidificación* das distintas alixes, aínda que modernamente tamén na reacción de *amorfización* en estado sólido e nas alixes obtidas por medios mecánicos en pulvimetalurxia.

**(D). *Os materiais compostos de matriz metálica.***

As alixes poden reforzarse por nano-partículas, resultando novos materiais con propiedades mecánicas melloradas. Sen embargo, ata o momento, está pouco estudado o efecto do tamaño das partículas de reforzo e os mecanismos de fortalecemento que, en principio, se atribúe ao mecanismo de *Orowan*, e á influencia das nanopartículas no tamaño final do gran da matriz. O noso grupo de investigación, ten dedicado gran

parte dos últimos anos ó desenvolvemento de aliaxes de aluminio reforzadas con partículas cerámicas de tamaño nanométrico para o seu emprego nos forxados estruturais dos avións e trens de alta velocidade.

***(E) As aliaxes de alta entropía (HEAs).***

***As aliaxes de alta entropía son novas aliaxes formadas, cando menos, por cinco elementos principais con composicións equi-atómicas ou case-equiatómicas, nas que ningún deles é dominante e, polo tanto, elévase o seu nivel de entropía configuracional. Isto permite obter aliaxes monofásicas estables como se fosen un metal puro cun alto grado de desorde e suprimir a formación de compostos intermetálicos. A súa especial microestrutura e propiedades ofrecen moitas aplicacións potenciais, ó se obteren aliaxes máis tenaces, resistentes e dúctiles.***

**Nas aliaxes de alta entropía, non son aplicables as coñecidas regras de *Hume-Rothery* que rexen a formación das solucións sólidas polo que a discusión das novas normas convértese nun problema científico interesante.**

***(F) As aliaxes con memoria de forma (AMF).***

**A historia e desenvolvemento das aliaxes con memoria de forma proporcionánanos unha visión dun material involucrado nas tecnoloxías de vangarda. Ocupan un lugar especial ó ser a primeira opción para a fabricación de moitos produtos nos sistemas micro electromecánicos debido ó efecto de memoria de forma térmica, e en enxeñería biomédica debido as súas propiedades de *super elasticidade* que permite a súa deformación dunha maneira controlada. Entre as opcións dispoñibles, as de base Ni-Ti teñen unha vantaxe sobre todas as restantes, debido as súas excelentes propiedades mecánicas, capacidade de reter o efecto de memoria de forma e a súa viabilidade para actuar durante períodos de tempo máis longos. Dende que foron descubertas no *Laboratorio de Artilería Naval en White Oak*, Maryland, nos EUA, tense desenvolvido unha moi intensa actividade científica para afondar na súa metalurxia física, especialmente nos mecanismos, non só das transformacións martensíticas e o seu envellecemento, senón tamén das súas transformacións con difusión para optimizar as súas propiedades e**

ampliar os seus campos de aplicación. As *alíaxes con memoria de forma*, permanecen como unha *illa do tesouro* para os científicos de materiais xa que importantes aspectos aínda non están resolvidos como, por exemplo, a posible orixe microscópica común de todas as transformacións martensíticas, a relación entre a estrutura atómica, as anomalías dos fonóns e as estruturas de martensita que compiten, e a orixe dos desprazamentos estáticos das maclas por riba da temperatura de transformación e a súa relación cos defectos puntuais.

***(G). Os biomateriais metálicos e as alíaxes biodegradables.***

A nova xeración de *biomateriais metálicos* para a implantación de próteses é de base Ti con elementos aleantes biocompatibles como o *Nb, Ta, Zr e Mo*.

Especialmente prometedores son os sistemas binarios Ti-Ta e os ternarios Ti-Nb-Ta que cos seus amplos espazos de composición ofrecen enormes posibilidades en termos de deseño da alíaxe mediante a optimización da súa composición e do seu tratamento termo-mecánico.

Na actualidade, hai un crecente interese en utilizar alíaxes biodegradables nun gran número de aplicacións médicas críticas. O magnesio, por exemplo, ten un alto potencial para o seu uso en implantes metálicos biodegradables xa que pode ser disolvido gradualmente, absorbido, consumido ou excretado do corpo humano e, polo tanto, desaparecer despois de curar os tecidos óseos evitándose a operación secundaria da extracción do implante. Esta proposta racha coa concepción tradicional na ciencia dos biomateriais de desenvolver materiais só resistentes á corrosión, debido a que a existencia destes implantes permanentes pode causar reaccións alérxicas e de sensibilización. Sen embargo, os implantes de Mg demostran unha alta actividade biolóxica que podería causar unha excesiva taxa de degradación nun bio-medio humano polo que parece necesario alíalo con outros elementos metálicos para mellorar a súa resistencia mecánica e resistencia á corrosión. Malia que só hai un pequeno número de metais que poidan ser tolerados polo corpo humano e que, ó mesmo tempo, poidan retardar a biodegradación do magnesio, paga a pena afondar no seu estudo.

## (V) *Derradeiras reflexións e Agradecementos*

O ensino da metalurxia, como de outras disciplinas, precisa da capacidade de xerar e guiar a aprendizaxe; por iso, de cando en vez, convén facerlle ós alumnos recen chegados preguntas aparentemente doadas para espertar a súa curiosidade, como por exemplo, por qué as campás son de bronce e no de ferro fundido que é moito máis barato e, se poder ser, darlles algunha pista para axudalos, como dicirlles que na época vitoriana só podían considerarse cidadás da City de Londres os que podían ouvir as campás da catedral de *Saint Paul*.

Pola contra, e con certa frecuencia, algún enxeñeiro mozo me pide un consello, tamén aparentemente doado, de como seleccionar o material máis axeitado para unha determinada aplicación, cando hoxe hai máis de 40.000 tipos de plásticos, varios miles de aliaxes lixeiras, varios centos de materiais *compostos* e un amplo abano de cerámicas e vidros. Así é o ensino, vello e novo a un tempo.

Afirmaba á cotío o matemático, padre do *fractalismo*, *Benoît Mandelbrot*, que os seus traballos, unha vez publicados, os sometía a un *recocido metalúrxico* facendo referencia á coñecida e sobranceira propiedade dos metais de poder mellorar as súas propiedades sen necesidade de volver a fundilos de novo. Velaí, quizais, unha das claves do amplo dominio dos metais: pódense conseguir cambios fundamentais nas súas propiedades someténdoo a moi variados procesos de fabricación e de tratamentos termo-químicos e termo-mecánicos. A outra chave está no enorme esforzo de investigación e de innovación conxuntos que se ten realizado ó longo do século pasado e deste. Con respecto a isto último permítanme salientar a importancia da innovación porque, se ben case ninguén dubida sobre a vital importancia da creatividade científica, non se pon o mesmo acento na outra forma de creatividade que é a innovación que, require contar como mínimo cunha grande idea, o talento técnico para levala a cabo e a experiencia empresarial para convertela nun éxito. Contribuír a incrementar a proporción de tecnoloxía e innovación propia constitúe un estimulante reto para un país, para as súas empresas e industrias e para as súas universidades. Permítanme tamén, manifestar a miña

preocupación polo futuro da industria española nos momentos en que se está a producir no mundo a *Cuarta Revolución*. Despois de ter sufrido varias reconversións industriais, de espellismos no sector servizos e de obnubilación financeira, empezamos a darnos conta de que o miolo económico dun país avanzado, é dicir, o substrato do valor engadido, é a súa industria e a española está abandonada. Non é o momento de estudar as causas deste abandono que, probablemente, non afectan soamente a España, pero que aquí se ten convertido nun problema crítico debido a deslocalización, a falla de investimentos e á pobreza da I+D e da innovación tecnolóxica. Temos que ser conscientes de que a recuperación da industria española, se chega a producirse, non será sen un esforzo longo e penoso en moitas ocasións e temos que aceptar o enorme esforzo necesario para acadala. Do contrario, verémonos abocados a quedar relegados a unha sociedade de servizos con pouco valor engadido. Ó mesmo tempo, temos que reflexionar como avanzar no noso sistema público de investigación. Temos que tomar decisións como a apertura ó exterior, a autonomía dos centros, a avaliación externa, o financiamento competitivo, a flexibilidade dos procesos da administración, a institucionalización da *peer review* ou a vinculación da carreira investigadora ós resultados, para rachar coa uniformidade e desgaxar das grandes burocracias públicas unidades máis pequenas, especializadas e autónomas, rexidas por regras moito máis flexibles, que ten sido o camiño seguido en case todo o mundo avanzado.

## ***Agradecementos***

Remato xa, coa miña máis fonda gratitude a todos os membros do Grupo de Enxeñería da Corrosión e Materiais da Universidade de Vigo polo seu acubillo e por axudarme a manter a miña curiosidade viva ó longo destes últimos trinta anos e, sobre todo, á miña familia pola súa paciencia infinita comigo.

Moitas grazas.

## ***Bibliografía***

***Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys.*** Charlie. R. Brooks. ISBN 0-87170-138-3. American Society of Metals. USA. 1982.

***Aluminium. Properties and Physical Metallurgy.*** ISBN 0-87170-176-6. American Society for Metals. Ohio. 1984.

***The Plastic Deformation of Metals.*** Edward Arnold (Publ.) Ltd. 2<sup>nd</sup> ed. ISBN 0713134682. 1984.

***Fundamentals of Solidification.*** Kurz Fisher. ISBN 0-87849-522-3. Trans Tech Publications LTD. Switzerland. 1984.

***Rapidly Solidified Powder Aluminum Alloys.*** STP 890. ASTM. 1986.

***Mechanical Metallurgy.*** G.E. Dieter. ISBN 0-07-100406-8. MacGraw Hill Book Co. UK. 1988.

***Ferrous Physical Metallurgy.*** A. K. Sinha. ISBN 0-409-90139-3. Butterworth Publishers. USA. 1989.

***Mechanical Behavior of Materials.*** T.H. Courtney. ISBN 0-07-013265-8. McGraw-Hill Publishing Company. USA. 1990.

***Physical Metallurgy (Fourth Edition).*** Ed. by Robert W. Cahn and Peter Haasen. ISBN 978-0-444-89875-3. Elsevier Ltd. 1996.

***Alloys: preparation, properties, applications.*** Ed. by Fathi Habashi. 1. ed. ISBN 3-527-29591-7; N.Y. Wiley-VCH, 1998.

***Physics of Amorphous Metals.*** N. P. Kovalenko, Yu. P. Krasny, U. Krey. ISBN 978-35-274-0315-8. Wiley-VCH GmbH & Co. Weinheim. 2001.

***The Coming of Materials Science.*** Pergamon Materials Series. Robert W. Cahn. ISBN 0-08-042679-4. Elsevier Science Ltd. 2001.

***Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications.*** Leyens, C., Peters, M. (eds.) ISBN 3-527-30534-3. Wiley-VCH. Verlag GmbH Co. Germany. 2003.

***Magnesium Alloys and Technologies.*** Kainer, K.U (ed.). ISBN 3-527-30570-X. Wiley-VCH. GmbH & Co. Weinheim. 2003.

***Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications.*** (Third Ed.) T.L. Anderson. ISBN 978-1-4200-5821-5. CRC Press. 2005.

***Light Blue Materials. A History.*** J A Charles and A L Greer. ISBN 1904-3-5035-6. Published by Maney. 2005.

***Steels. Microstructure and Properties.*** (Third Ed). H.K.D.H. Bhadeshia and R.W.K. Honeycombe. ISBN 978-0-750-68084-4. Elsevier Ltd. UK. 2006.

***Metal Matrix Composites.*** N. Chawla and K.K. Chawla. ISBN 10 0-387-23306-7. Springer Science. USA. 2006.

***Metal Matrix Composites. Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering.*** Ed. By K.U. Kainer. ISBN 978-3-527-31360-0. Wiley-VCH. GmbH & Co. Weinheim. Germany. 2006.

***Light Alloys. From Traditional Alloys to nanocrystals*** (Fourth Edition). Ian Polmear. ISBN 978-0-7506-6371-7. Elsevier Ltd. 2006.

***Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials.*** B. Verlinden, J. Driver, I. Samajdar, R. D. Doherty. ISBN 978-0-08-044497-0. Elsevier Ltd. UK. 2007.

***Physics of Functional Materials.*** Hasse Fredriksson and Ulla Åkerlind. ISBN: 978-0-470-51757-1. John Wiley & Sons, Ltd. 2008.

***Phase Transformations in Metals and Alloys.*** (Third Edition). David A. Porter, Kenneth E. Easterling, Mohamed Y. Sherif. ISBN 978-1-4200-6210-6. CRC Press. 2009.

***Bulk Nanostructured Materials.*** Edited by M. J. Zehetbauer and Y.T. Zhu. ISBN 978-3-527-31524-6. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim. 2009.

***Nanostructured Metals and Alloys. Processing, Microstructure, Mechanical Properties and Applications.*** Edit. by S H Whang. Polytechnic Institute of NYU, USA. ISBN 978-1-84569-670-2. Woodhead Publishing. 2011.

***Ironmaking and steelmaking. Theory and Practice.*** Ahindra Ghosh, Amit Chatterje. ISBN 978-81-203-3289-8. PHI Learning Privated Limited. New Delhi. 2012.

***Aerospace Materials Handbook.*** San Zhang, Dongliang Zhao. ISBN 978-1-4398-7329-8. CRC Press. USA. 2013.

***Structural Materials and Processes in Transportation.*** Edited by D. Lehmhus, M. Busse, A. S. Herrmann and K. Kayvantash. ISBN 978-3-527-32787-4. Wiley-VCH GmbH & Co. Weinheim. 2013.

***The Fourth Revolution. The Global Race to Reinvent the State.*** John Micklethwait, Adrian Wooldridge. ISBN 978-0-1431-2760-4. Penguin Random House. 2015.

C T Heycock and F H Neville, ***Bakerian lecture: On the constitution of copper-tin series of alloys, Philosophical Transactions of the Royal Society A (London), Vol. 202, pp. 1-69, 1904.***

J.A. Jimenez, G. Frommeyer. ***Analysis of the microstructure evolution during tensile testing at room temperature of high-manganese austenitic steel.*** Mat. Charact. 61 (2010 ) 221–226.

D. Barbiera, N. Geya, S. Allain, N. Bozzolo, M. Humbert. ***Analysis of the tensile behavior of a TWIP steel based on the texture and microstructure evolutions.*** Materials Science and Engineering A 500 (2009) 196–206.

Yong-Hao Zhao, Xiao-Zhou Liao, Sheng Cheng, En Ma, and Yuntian T. Zhu. ***Simultaneously Increasing the Ductility and Strength of Nanostructured Alloys.*** Adv. Mater.(2006), 18, 2280–2283.

Sabirov, M.Yu.Murashkin, R.Z.Valiev. ***Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development.*** Materials Science & Engineering A 560 (2013) 1–24.

S. Nag, R. Banerjee, H.L. Fraser. ***A novel combinatorial approach for understanding microstructural evolution and its relationship to mechanical properties in metallic biomaterials.*** Acta Biomaterialia 3 (2007) 369–376.

Yong Zhang, Yun Jun Zhou, Jun Pin Lin, Guo Liang Chen and Peter K. Liaw. ***Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys.*** Advanced Engineering Materials 2008, 10, No. 6.



**Guangling Song. *Control of biodegradation of biocompatible magnesium alloys*. Corrosion Science 49 (2007) 1696–1701.**

**K. Otsuka, X. Ren. *Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys*. Progress in Materials Science 50 (2005) 511–678.**