

Els polímers estructurals i la indústria aeroespacial: una història per concloure

Jaime de Andrés Llopis

Departament de Química Física, Universitat de Barcelona

Des dels primers assajos dels germans Wright fins als actuals vols suborbitals, els dos problemes principals per al progrés de l'aviació han estat la potència disponible i els materials emprats per construir les cel·les. Aquest segon punt significa que, en últim terme, la química ha estat majoritàriament responsable de molts avenços en el camp, i la part corresponent a la química macromolecular (fins i tot quan encara no s'havia inventat el terme) és d'allò més rellevant. En aquest article hem provat de resumir el paper que els materials polimèrics han desenvolupat en aquest progrés, començant pels simples revestiments fins a arribar a l'ús dels compòsits per elements estructurals fonamentals, i hi hem introduït algunes reflexions finals sobre el molt que encara resta per fer.

From the first experimental flying machines of the Wright brothers to the actual suborbital flights, the two key problems in the progress of aviation have been the available power and the materials used to build the cells. This second point implies that chemistry, and in particular macromolecular chemistry, has played a prominent role in many of the fundamental advances in this field. In this article we will review this progress from the first wing coatings to the state of the art composite materials for structural applications in aircrafts, introducing some final reflections about the large amount of work that is still pending in this field.

Introducció

Ja la primera referència escrita a l'art de volar és un exemple de l'aplicació dels materials polimèrics per enlairar-se: quan l'hàbil Dèdal va voler fugir del laberint de Creta, va recollir plomes i, amb cera d'abella, les va fixar a les espatlles del seu fill Ícar i a la seva pròpia formant dues ales amb les quals tots dos van enlairar-se i van pujar cap al cel com ocells. Malauradament, els estudis d'en Dèdal no havien inclòs pas informació sobre la transició vítria dels materials termoplàstics, i la cosa va acabar que el seu fill va pujar massa, la llum del Sol va fer el seu efecte sobre la cera, es va produir el que avui en dia definirem com a *fallida estructural catastròfica* i n'Ícar va inaugurar el panteó dels màrtirs del vol.

Durant els milers d'anys següents, pràcticament tots els pioners (i gairebé sempre també màrtirs) de l'aeronàutica van fer servir polímers naturals a les estructures dels seus aeromòbils: fusta de diversos tipus, cordatges, membranes animals i molts d'altres. Fins i tot els primers que van aconseguir enlairar-se amb naus més lleugeres que l'aire a finals del segle XVIII ho van aconseguir gràcies als teixits, cordatges i vernissos d'origen vegetal, que els van permetre construir embolcalls lleugers i impermeables a l'aire calent o a l'hidrogen que els omplien (una mica més tard la introducció del cautxú com a segellant va millorar encara més l'estanquitat dels globus). Aquesta situació es va mantenir durant tot el segle XIX, però sense que els partidaris del «més pesat que l'aire» deixessin de perseverar en els seus esforços... i ben sovint de pagar-ne el preu màxim.

Més o menys per la mateixa època la química va anar convertint-se d'una curiositat de laboratori en una de les puntes de llança del progrés científicotecnològic, però no va ser fins a finals de segle quan l'interès dels investigadors es va començar a fixar en les singulars propietats de certes substàncies que incògnitament van trigar molt temps a ser reconegudes com a *macromoleculars en natura*, tot i que ja a principis del segle XX es van començar a fabricar els primers materials polimèrics sintètics (o almenys obtinguts per modificació de polímers naturals). Al mateix temps, la sang i l'esforç malgastats pels aeronàutes en potència van donar els primers fruits amb els experiments d'en Lilienthal i els seus deixebles, i tot feia suposar, com així va ocórrer, que quan se solucionessin els problemes de control i es disposés de motors de potència/pes adient, l'home realitzaria el seu vell somni de volar.

Doncs bé, aquest és el nostre objectiu: parlar de com el desenvolupament del que avui coneixem com a *polímers estructurals* ha permès a l'aeronàutica d'avançar (de fet, no fóra gaire exagerat dir «de sortir de l'atzucac») pel camí del «més alt, més lluny, més de pressa», per quatre vegades, i com encara queda un pas de gegant per fer. Cal advertir que qualsevol de nosaltres que pugui a un avió modern es trobarà amb grans quantitats de materials polimèrics, des de les tapisseries i catifes fins als mànecs dels comandaments i un llarg etcètera, però no són aquestes aplicacions les que avui ens interessin, sinó aquells materials que formen part de l'estructura pròpia de l'aeronau i que sovint en possibiliten el seu enlairament.

Primera etapa: calia recobrir les ales

Una vegada es va abandonar més o menys definitivament la idea de fer servir ales mòbils per impulsar l'aeronau, les opcions dels aviadors en potència no eren gaire abundants: amb motors que pesaven molts quilos per cavall desenvolupat, les estructures havien de ser per força molt lleugeres i això feia que els plans (o ales) dels projectes de principis del segle xx fossin construïts amb fons entrants de fusta amb un o més travessers transversals i de costelles longitudinals, amb la resistència a la flexió i a la torsió assegurades per muntants i riostres externs, però tal estructura calia que fos recoberta per una pell el més llisa possible, resistent a la intempèrie i sobretot el més lleugera possible (ja que l'ús de fullola o de xapa metàl·lica quedava descartat). La solució més lògica va ser fer servir roba espessa de cotó o més sovint de lli que podia ser fixada a l'estructura cosint-la o clavant-la. Ara bé, la tela no tan sols era porosa sinó que també flexionava i ondulava amb les ràfegues (a part de patir dilatacions segons la humitat ambiental) i per tant havia de ser tractada amb algun producte que n'augmentés la impermeabilitat i rigidesa. El més lògic era recobrir-la amb un producte adient però, quin? (foto 1).

Durant el segle XIX la propietat que posseïa la cel·lulosa (fàcilment obtenible llavors a partir del cotó) de reaccionar amb els àcids i donar productes de propietats molt diverses va començar a ser aprofitada: primer va ser el trinitrat, explosiu que ben aviat va trobar aplicacions militars, seguit pel mononitrat,

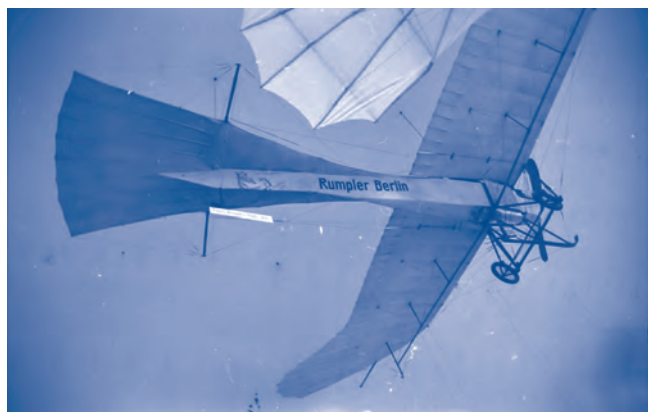


Foto 1. La precarietat de les estructures dels primers avions és ben evident en aquest Taube austríac (construït a Alemanya) de 1912: llistons de fusta simples, armats exteriorment amb força corda de piano i recoberts de tela envernissada. (Foto de l'autor.)

que, després del revolucionari descobriment de la seva plasticitat mitjançant la càmbora, es va convertir en el primer semisintètic capaç de ser transformat per extrusió (cel·luloide) i per injecció. La crisi de la seda natural va impulsar el descobriment de diferents tècniques de dissolució-regeneració [1] (xantat, cuproamoniaca) amb les quals es van produir fibres artificials (raió, viscosa, etc.) i també films (cel·lofana). Per fi, ja a finals del segle, les propietats dels èsters orgànics i, en particular, dels acetats van ser estudiades i ben aviat es va comprendre que tals productes podien molt bé revolucionar la indústria de les pintures.

Mentrestant, els heroics pioners de l'aviació lluitaven amb el problema del recobriment de les ales amb tots els mitjans al seu abast: mussolines, cotó, fins i tot seda xinesa (perfecta en tots els aspectes excepte en l'econòmic), fins que es va arribar a un consens gairebé universal a favor del lli cru (el blanqueig l'hauria afeblit). Quedava, però, la qüestió del tensat/impermeabilitzat: els primers avions Wright, Santos-Dumont, Farman, etc., van emprar les laques d'origen vegetal usades des de feia segles en ebenisteria i construcció naval (sandàraca, copal, gomalaca, etc.), però la seva adherència a la tela era defectuosa, la rigidesa excessiva produïa ràpidament esclatxes i la necessitat d'emprar etanol com a dissolvent en dificultava l'aplicació. Hi ha qui fins i tot va recórrer a cautxutar la tela, però el pes era prohibitiu... Fins i tot un anglès va assajar midó extret de la mandioca sud-americana (la història no parla del que va passar quan va començar a ploure). Era inevitable que algú decidís provar els nous productes que en aquells moments estaven revolucionant la producció dels vernissos.

L'ús de l'acetat dissolt en mesclades adients va semblar al principi que era la solució ideal: bona adherència a la tela, resistència a l'aigua i un fort encorgiment en assecar-se que afavoria el tensat. La Bayer AG va comercialitzar un vernís amb aquesta base el 1910, però ben aviat es va manifestar un problema: en exposar-se a la intempèrie fins i tot per tan sols trenta hores, el revestiment començava a endurir-se i a esclatar-se (*cracking* i *crazing* en terminologia moderna), i deixava passar la humitat, la benzina i l'oli, que podrien la tela ràpidament. Evidentment calia trobar una altra solució, i aquesta va ser tornar a considerar l'ús del mononitrat de cel·lulosa, descartat abans per la seva poca adherència i gran rigidesa i inflamabilitat. Com sovint ocorre en química macromolecular (tot i que encara faltaven molts anys perquè

n'Staudinger fes triomfar la noció de *macromolècula*) la solució va ser no actuar sobre el producte, sinó concentrar-se a modificar-lo: l'ús de dissolvents adequats va millorar l'adhesió (amb terribles conseqüències, com veurem) mentre que l'additivació del vernís amb oli de ricí (i molts altres additius més endavant) [2] va plastificar el film i en va reduir la rigidesa. També d'acord amb la tradició macromolecular, els productes resultants van ser coneguts no per les seves designacions tècniques sinó pel nom dels fabricants: Cellit a l'Imperi alemany, Cellon al britànic, Emaillite i Novavia a França, etc. Com a exemple, vet ací una típica formulació de l'època (avui en dia seria prohibida per tòxica):

QUADRE 1. Vernís per al recobriment de superfícies entelades, especificació R. A. E. MAD AII (A182/3/1914).	
Xarop de nitrocel·lulosa	260 lliures
Acetat de butil (o d'amil)	22,5 lliures
Etanol	22,5 lliures
Benzol	22,5 lliures
Oli de ricí	77 lliures

Que tot no era tant fàcil com semblava es pot comprendre bé si limitem ara el nostre relat al que va ocórrer a Anglaterra, ja que els fets han estat molt ben documentats per I. Huntley, R. Rimmell i altres estudiosos del tema: en esclatar la Gran Guerra la indústria aeronàutica va expandir-se per ordres de



Foto 2. Aquest biplà Bü-131 és un disseny dels anys trenta, però il·lustra molt bé la construcció «clàssica»: es pot veure la tela ben tensada sobre els travessers de fusellatge i sobre les costelles dels plans i deriva, on produeix el típic efecte «ondulat». Els propietaris han decidit que la protecció contra l'UV prevalia sobre l'aspecte i han emprat laca aluminitzada per a l'acabat. (Foto de l'autor.)

magnitud i molts fabricants d'altres rams es van reconvertir, mentre que les demandes de matèries primeres, semiacabats, accessoris, etc., es van multiplicar. Una de les més afectades va ser la indústria química, que no tan sols havia de produir nitrocel·lulosa per a explosius sinó també per a recobriments i, a més, els dissolvents necessaris. Cercant de reduir la càrrega la Cellon va assajar (o, millor dit, va emprar sense assajar-lo com calia) nous productes com l'hexacloroetà als seus vernissos, amb resultats tècnics satisfactoris però sense tenir en compte la seva toxicitat, sobretot per a aquells que, com els pintors, havien de treballar per força en tallers tancats i exempts de pols, cosa que va resultar en un emmetzinament general que va causar la mort de molts treballadors fins que es va identificar-ne la causa i es van modificar les formulacions (gràcies també a la disponibilitat d'acetona produïda sintèticament pel procediment de Weizmann) (foto 2).

Un altre problema, encara més generalitzat, va ser l'estabilitat del film: el nitrat era particularment sensible a l'acció de la llum solar [3], que per fotooxidació produïa un engrogiment progressiu acompanyat de fenòmens d'entrecreuament que provocaven un augment de la rigidesa del revestiment, cosa que acabava per fer trencar la tela (foto 3). El resultat era que, depenent de la climatologia i del grau d'exposició a la intem-

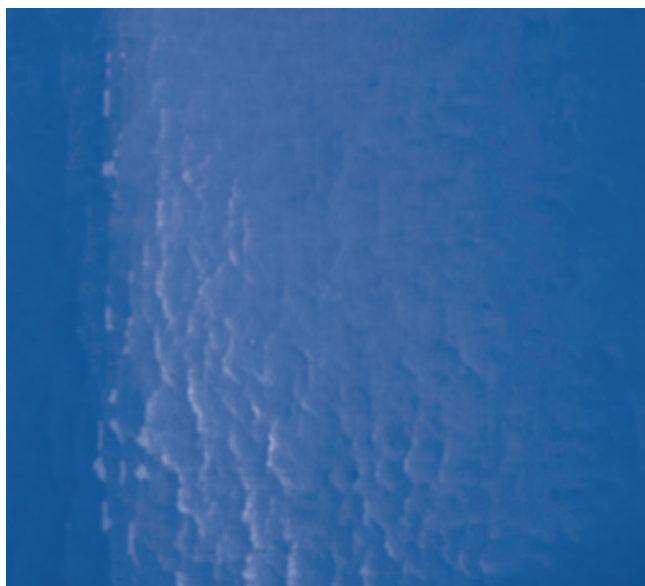


Foto 3. Mostra de tela de recobriment original provinent dels plans d'un Ansaldo A5 italià de 1917, revestida amb dues mans de nitrocel·lulosa sense més protecció que un lleuger pigmentat verd clar. Pot apreciar-se com la laca s'ha reticulat i endurit fins a esclatar-se, i ha arribat fins i tot a saltar a la zona de la costella, en vertical a l'esquerra a la foto. (Col·lecció de l'autor.)

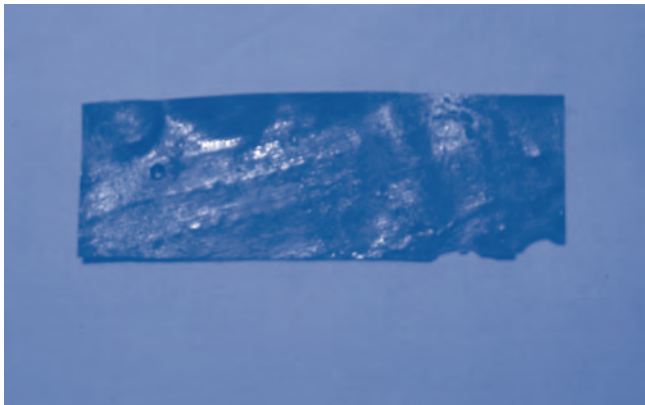


Foto 4. Mostra de tela de recobriments del fusellatge d'un Nieuport 11 de 1916. Una mà de nitrocel·lulosa lleugerament carregada amb pols d'alumini ha estat coberta amb una capa molt gruixuda, quasi 0,4 mm, de pintura a l'oli. Sembla que, lluny de protegir, ambdós productes han interaccionat produint una degradació anisotròpica que ha format arrugues a la superfície. (Col·lecció de l'autor.)

pèrie, un avió havia de ser retirat de servei, desentelat per complet i tornat a recobrir i pintar tres o quatre vegades a l'any, amb una despesa i un percentatge d'immobilització clarament inacceptables. Calia fer quelcom, i una vegada esbrinades les causes, eren dos els camins a seguir: protegir el revestiment de l'oxigen amb una barrera o bloquejar l'acció dels rajos UV.

La indústria francesa va provar el primer procediment, i va cobrir la nitrocel·lulosa amb una capa de pintura a l'oli sense pigmentar (foto 4), cosa que va donar un aspecte brut i grogós a les superfícies, va augmentar-ne considerablement el pes i va impossibilitar la reparació amb agulla i fil de les estripades. Clarament la segona via era la més pràctica i ja abans de la Guerra les firmes franceses de Morane-Saulnier i Esnault-Pelterie van procedir a addicionar els vernissos que empraven: la primera va fer servir l'alumini en pols per tal de reflectir la llum, mentre que la segona va decidir-se per l'òxid de ferro per la seva capacitat d'absorció de la radiació UV. Tots dos productes presentaven inconvenients deguts sobretot a la dificultat de mantenir-los en suspensió en el medi. Durant la Gran Guerra la indústria britànica, després d'estudis molt acurats duts a terme a la Royal Aircraft Factory de Farnborough, va emprar l'òxid de ferro vermell com a protector antisolar, però va resultar que la font d'aquest pigment eren les mines de ferro espanyoles i que el subministrament era insuficient, de manera que es va decidir limitar-ne l'ús als avions destinats a l'Orient Mitjà [4] (on les condicions ho imposaven) i emprar per a la resta diversos succedanis amb ocre

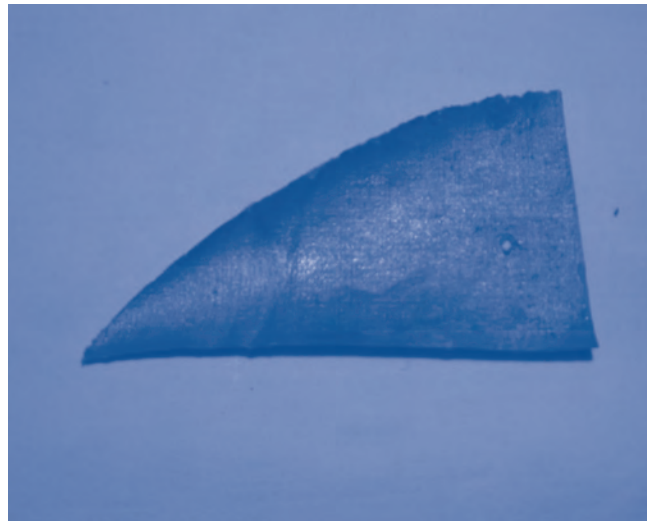


Foto 5. Mostra de tela de recobriments provinent d'un Nieuport 17 de 1917. Un nombre indeterminat de mans de nitrocel·lulosa sense pigmentar ha estat recoberta d'una capa final aluminitzada. Pot apreciar-se el bon estat de conservació de la mostra, que, de fet, conserva un grau de flexibilitat molt considerable. (Col·lecció de l'autor.)

groc i negre de fum entre altres components [5]. Els francesos, al contrari, van persistir en l'addició de pols d'alumini fins i tot als productes pigmentats per camuflatge (foto 5).

A principis dels anys vint l'acabat de la roba de revestiment va ser més o menys normalitzat arreu del món: una vegada fixada aquesta se li aplicaven fins a cinc mans de vernís cel·lulòsic i es deixava assecar bé entre aplicacions, seguides d'una mà de nitrocel·lulosa amb òxid de ferro com a filtre solar, sobre la qual anava la capa d'acabat que sovint portava alumini en pols per reforçar l'efecte antiactínic. Els components dels vernissos van anar canviant en perfeccionar-se els èsters cel·lulòsics mixtos com ara l'acetobutirat, però les variacions eren mínimes i, tot i que a partir dels anys trenta amb la generalització de la construcció metàl·lica, l'ús del revestiment de tela envernissada ha disminuït, encara es fa servir per a certes parts com ara les superfícies de control d'avions lleugers i les ales dels ultralleugers.

Segona etapa: calia tancar la cabina

Els pioners del vol rares vegades es van preocupar de protegir-se contra els efectes de la intempèrie i del vent relatiu (de fet,

poc interès tenia fer-ho quan les velocitats no arribaven als 100 km/h) i unes ulleres tancades eren l'única concessió que feien a aquest problema, però una vegada que les velocitats van començar a créixer la necessitat de reduir la resistència paràsita (els éssers humans no som gens aerodinàmics) va fer que els pilots s'instal·lessin a l'interior dels fusellatges amb tan sols el cap i les espatlles fora, però encara calia protegir-los tant com fos possible de l'aire gelat, amb el problema afegit que els pioners consideraven fonamental disposar d'excel·lent visibilitat i sentir l'aire a la cara com a indicador de posició. La solució era, és clar, col·locar un parabrisa adequat davant del pilot, però llavors es presentava el problema del material: el vidre era pesat i el risc en cas d'accident (fins i tot emprant els primers vidres Triplex de seguretat) inacceptable. D'altra part, el film de nitrocel·lulosa (cel·luloide) s'engroguia i es feia trencadís molt ràpidament i el de cel·lulosa (cel·lofana) es deformava amb la humitat.

En general, la solució adoptada va ser minimalista: als aviadors se'ls va proveir de diminuts protectors destinats a permetre mirar cap endavant amb alguna protecció contra el vent, i per a la qual es podia emprar el vidre sense molta penalització de pes. Alguns constructors van provar de cobrir les cabines amb sostres transparents de cel·lofana o cel·luloide, però els pilots es van negar en rodó a volar així tancats pel risc de veure's atrapats en cas d'aterratge forçós amb incendi (i també per pur conservadurisme). Com a molt, quan calia il·luminar, per exemple, els instruments muntats a l'interior, s'obrien finestres als costats del fusellatge i es tancaven amb plafons de cel·luloide que deixaven entrar prou llum, pesaven poc i no eren gaire cars de renovar amb freqüència. I així van quedar les coses durant gairebé trenta anys.

El progrés continu de l'aviació als anys trenta del segle passat va per fi trencar l'equilibri:

- L'aerodinàmica cada vegada assolía un paper més fonamental amb l'augment continu de les velocitats i va preveure un forat al llom del fusellatge per on el pilot treia el cap esdevenia inacceptable.
- El ràpid desenvolupament de l'aviació comercial va portar noves exigències de comoditat: els passatgers no podien acceptar veure's sotmesos a un vendaval de 300 km/h amb -10°C de temperatura (com a poc) i al soroll dels motors funcionant a sortida lliure. D'altra part, tampoc se'ls podia tancar a les fosques dins l'avió: calia proveir-los d'allotja-

ments climatitzats, silenciatos, il·luminats i amb bona visió a l'exterior, i els polímers cel·lulòsics no eren gens adients per a això, tot i que es van fer servir al principi a manca d'una cosa millor.

Els problemes de quin material emprar van desaparèixer de sobte en acabar els anys vint, quan la Röhm GmbH va comercialitzar per primera vegada el polimetacrilat de metil (PMMA) amb el nom de Plexiglas. El nou material era perfecte: bones propietats mecàniques i tèrmiques, una transparència magnífica i molt bona resistència a la intempèrie. D'altra part, la seva obtenció per colada a partir de xarops (dissolucions de prepolímer en monòmer) [6] possibilitava obtenir-lo directament en forma de planxes de gruix i dimensions considerables i de les quals no calia polir les superfícies. L'acceptació del nou material va ser immediata pels enginyers aeronàutics i més lenta pels pilots, la qual cosa va fer que més d'un avió comercial volés amb el passatge confortablement protegit i amb els pilots exposats, però gradualment el seny i les dificultats d'operar amb equips com les ràdios des d'una cabina oberta van superar les reticències i els avions comercials, i gràcies a la combinació d'una millor aerodinàmica i d'una motorització més potent i fiable, van per fi arribar a un nivell d'eficiència que va fer innecessàries les subvencions que fins llavors rebien les aerolínies.

La generalització de l'ús del PMMA va fer que la seva producció es diversifiqués, ja que en ser un material d'alt interès estratègic totes les grans potències volien produir-lo a casa, ja fos sota llicència o desenvolupant (o copiant) la seva pròpia tecnologia. Una conseqüència va ser que el PMMA va adquirir tota una sèrie de noms segons els diferents països, com Plexiglas a Alemanya, Perspex a la comunitat britànica i Sovglas... a l'URSS, naturalment. No sempre la qualitat va ser satisfactòria (de fet el PMMA italià va ser inicialment tan deficient que els pilots de caça van exigir el retorn a les cabines obertes) [7].

En un principi el PMMA tan sols estava disponible en forma de xapes, cosa que forçava els enginyers a construir autèntiques «gàbies» per tal de donar-li la forma adequada (foto 6), però de nou la tecnologia va proporcionar una solució en aconseguir-se plastificar les peces amb productes com ara el fosfat de tricresil [8] fins a un grau que permetia l'ús del termoconformat per donar-los formes complexes amb doble curvatura. Això va beneficiar sobretot els avions de combat, per



Foto 6. Al principi de l'aplicació del PMMA els enginyers es van llançar sovint a la recerca de la perfecta aerodinàmica combinada amb la perfecta visibilitat, malgrat que les xapes disponibles no admetien més que lleugeres corbes. Aquest morro de He-111 és un exemple del resultat: nombroses facetes separades que formen un conjunt pesat i amb visibilitat no gens satisfactòria a causa dels fenòmens de refracció i distorsió. (Foto de l'autor.)



Foto 7. Un caça P-51D. Malgrat que han passat tan sols quatre anys de l'exemple anterior, el termoconformat del PMMA ha progressat fins a permetre produir «bombolles» (anglès, *bubble canopies*) de qualitat òptica gairebé perfecta. (Foto de l'autor.)

als quals va ser possible dissenyar autèntiques «bombolles» que donaven al pilot una visibilitat quasi perfecta (foto 7).

Encara faltava un pas final en aquest camí: ja a principis dels anys quaranta l'aparició del motor de reacció va revolucionar tot el panorama de la tecnologia aeronàutica, i als cinquanta els avions experimentals superaven ja dues vegades la velocitat del so. Això va portar nous problemes: el PMMA no suportava bé les altes temperatures provocades pel fregament aerodinàmic. Semblava que caldria tornar a emprar el vidre, i

així hauria estat si el 1956 la Bayer i la General Electric no haguessin llançat al mercat els primers policarbonats (PC) comercials. El nou material (dins un ordre, en realitat la seva síntesi datava de finals del segle XIX) tenia totes les propietats que calia per substituir el PMMA, i no només per a parts transparents sinó també per a tots aquells plafons dielèctrics que als avions moderns cobreixen les dotzenes d'antenes de comunicacions, detecció, navegació, etc., que requereixen els reglaments moderns. Així la cursa cap a les grans velocitats va poder continuar sense problemes deguts a la resistència dels transparents (tot i que tots els avions supersònics porten incorporats termoparells a les transparències per tal de donar l'alarma en cas de sobreescalfament).

Cal advertir que potser estem malgrat tot al límit: els dissenyadors ja es queixen de les greus limitacions que imposa el muntatge de transparències i advoquen perquè els futurs avions de transport supersònics n'estiguin exempts i els pilots observin l'exterior a través de sistemes òptics remots (periscopis, televisió, infrarojos, etc.). Ja veurem.

Tercera etapa: cal enganxar les peces

Segons es miri, ja els primers aeroplans van ser construïts amb polímer: com va dir Lecarme al seu dia «la fusta és un excel·lent plàstic orientat» [9], però malgrat el seu ús continuat, el fet que sigui un material natural la posa fora del nostre abast... en part, ja que qui diu fusta diu cola, i ens caldrà parlar molt d'aquesta associació. Com sempre, els primers adhesius emprats pels pioners van ser aquells secularment usats en fusteria: cola animal, cola de peix, caseïna, etc., totes elles proteíniques en natura. En general aquests productes donaven bons resultats quant a prestacions, però no deixaven de ser molt sensibles a la humitat i a la biodegradació (millor la caseïna precipitada amb calç) [10], i requerien per a la seva conservació tractaments impermeabilitzants acurats i costosos en diners i mà d'obra (la tendència dels avions Fokker a perdre les ales en vol durant 1917-1918 [11] és directament atribuïble a negligències en aquest aspecte). Aquesta fase artesanal va durar fins als anys vint i, amb la substitució dels productes per altres dels quals en parlarem més endavant, encara perdura al camp de la construcció amateur. També per la mateixa època es va començar a fer servir el contraplacat

(malgrat que la primera producció data del segle XIX) [12], que oferia l'avantatge d'una resistència més uniforme i de poder ser mecanitzat en sèrie, però que encara era més sensible a la humitat.

Ja durant la Gran Guerra els enginyers van pensar a substituir les estructures per elements amb altres a «closca», on fos el mateix revestiment format en una sola peça el responsable de la forma i de la resistència mecànica. Per arribar a això la firma Albatros va procedir a folrar una forma amb bandes de fullola creuades i enganxades [13] entre si, procediment que donava molt bons resultats però que requeria encara més mà d'obra especialitzada i tractaments preservatius i antihumitat molt extensos. El pas següent el va donar ja als anys vint la Lockheed norteamericana, en fabricar un sandvitx de xapes de fullola impregnades amb cola i estovades al vapor fent-les adaptar-se a pressió dins un motllo, amb el qual es podien fabricar els semifusellatges d'una sola peça [14] però de forma molt lenta, ja que l'aigua condensada del vapor havia de migrar a través de tots els estrats de fullola abans d'evaporar-se. Era evident que calia canviar alguna cosa.

Ja el mateix Baekeland va suggerir el 1912 [15] que les seves resines de fenol-formaldehid (baquelita) podien emprar-se per enganxar fusta, però les dificultats tècniques del seu ús van fer retardar l'aplicació fins a mitjan anys trenta. De fet, ja era possible impregnar la fullola amb el prepolímer en forma de dissolució o emulsió i fer-lo reticular després al forn, cosa que assegurava una gran penetració de la cola a la fusta, una unió molt resistent i, sobretot, insensible a la humitat. En poc temps el *baquelite ply* en la designació anglesa es va generalitzar a la indústria i els finlandesos en particular es van especialitzar en la producció d'un contraplacat d'abet que encara avui es fa servir en grans quantitats [16]. També a l'URSS es va estudiar el tema i de la seva recerca va resultar la *Delta-drevesina* (fusta delta) [17] [18], un autèntic material compost *avant la lettre* on els estrats de fulloles diverses separades per fulls de paper especial impregnat de resina es combinaven per donar una resistència tan gran que podia competir amb els metalls. Era inevitable que els adhesius fenòlics també es fessin servir per unir fulloles modelades i en realitat la tècnica es va desenvolupar a tants llocs a la vegada que tan sols podem citar les patents Duramold nord-americanes i les de De Havilland (que en realitat era un material sandvitx amb balsa i fullola) [19] com a exemples (foto 8). Totes elles van ser emprades abundantment durant la Segona

Guerra Mundial per suplir la carència general de metalls lleugers, però ja als anys cinquanta havien caigut en desús.

Encara faltava un pas important en el camí dels adhesius, i un que agradés a tothom: mentre que qualsevol millora de les propietats dels adhesius en les seves aplicacions clàssiques (fusta, etc.) seria sense cap dubte benvinguda, l'extensió de la tècnica als metalls produiria una autèntica revolució per poc que fossin bons els resultats. Ja s'havia fet alguna cosa, com el Plymax [20] (estratificat de fullola i duralumini) francès dels anys trenta, però amb poc èxit, i molts tècnics continuaven considerant l'encolat metall-metall una utopia, malgrat que la solució ja era disponible. En efecte, en diversos països ja s'havien estudiat els processos d'entrecruament dels polímers de condensació de l'epiclorohidrina amb difenols per donar polímers epoxídics capaços de reticular-se sota l'acció de catalitzadors adients, i els resultats eren esperançadors (amb el problema de la síntesi dels monòmers). De fet, cap a finals de la Segona Guerra Mundial a Alemanya ja es van posar en servei alguns d'aquests productes amb resultats diversos (almenys en un cas els catalitzadors àcids emprats van atacar la fusta que es volia enganxar amb resultats catastròfics) [21], però entre la multitud de nous materials desenvolupats pel Tercer Reich per suplir la carència de matèries primeres aquests productes van passar desapercebuts. Fins al anys cinquanta Ciba no va posar al mercat el primer Araldit, però ja llavors les increïbles propietats de les resines epoxídiques van crear un boom en la seva utilització, que encara continua a escala mundial.



Foto 8. A la góndola central d'aquest De Havilland Vampire en curs de restauració es poden apreciar les bandes de fullola en diagonal que formaven la pell externa del fusellatge modelat, així com la taca fosca d'una reparació recoberta de vernís foto-protector. (Foto de l'autor.)

Al contrari, la progressió d'aquesta aplicació a la Gran Bretanya és ben documentada, passant per les primeres peces de fibra orgànica i fenol-formaldehid, i continuant amb l'aplicació a la fusta i després al metall dels coneixements adquirits. Ja a la postguerra la De Havilland va donar el gran salt quan va incorporar els processos desenvolupats per Redux [22] al primer reactor comercial, el DH Comet, i llavors els progressos van ser ràpids, amb els primers adhesius epoxi complementant més que substituint els productes precedents [23] i permetent als enginyers coses abans tan impensables com el desenvolupament dels plafons en niu d'abella i la fabricació d'elements multimaterial (GRP/metall/escumats) de petita secció com les pales de rotor dels helicòpters.

De fet, aquest camp continua en ràpida evolució a tots els nivells, i potser sigui l'únic on els avanços són igualment aplicats per la gran indústria militar, pel constructor amateur i per totes les categories intermèdies.

Quarta etapa: cal fer-ho tot més lleuger

No deixa de ser estrany que la indústria aeronàutica progressés tant d'esquena als polímers estructurals durant tant de temps. És cert que la proporció d'aquests productes a la massa total dels avions va anar augmentant lentament durant les tres primeres dècades del segle XX, però es tractava exclusivament d'accessoris (material elèctric, components hidràulics, cobertes, etc.), i aquesta situació va perdurar fins ben entrada la Segona Guerra Mundial. De fet, van ser els progressos de l'electrònica els que van forçar el pas següent, quan els primers radars aerotransportats d'alta freqüència van entrar en servei. Per explotar-los plenament era necessari emprar «plats» reflectors per tal de concentrar el feix produït per l'antena, i tot el conjunt havia de girar, oscil·lar o bascular per dirigir el feix. Era impossible muntar aquest conjunt a l'exterior i l'estructura metàl·lica de l'avió era una gàbia de Faraday perfecta que hauria impedit la transmissió en cas de posar-la dins. Calia protegir l'antena amb una coberta dielèctrica no gaire gruixuda i ben corbada per tal de reduir la resistència aerodinàmica (el que avui denominem un *radom*). Per diverses raons els termoplàstics disponibles no podien ser emprats i les resines tipus UF o FF serien massa pesades.

De nou la solució venia de lluny, ja que els primers polièsters insaturats van ser obtinguts ja per Berzelius i Gay-Lussac, entre d'altres, però va ser Carleton Ellis qui va estudiar la seva reticulació i, sobretot, qui va descobrir els efectes que sobre les propietats del producte tenia l'ús d'un dissolvent reactiu com l'estirè [24], però va ser l'associació del polímer amb la fibra de vidre (GRP) la que va obrir la porta a l'aplicació aeronàutica del producte: durant la Segona Guerra Mundial tots els radars aeris d'ona centimètrica emprats pels aliats van ser protegits per radoms de GRP, cosa que va permetre de conservar al màxim la finor aerodinàmica dels avions portadors (és curiós que la indústria química alemanya no fos capaç de produir res equivalent i que els seus escassos radoms fossin fets de fusta i PMMA). De fet, els GRP actualment continuen emprant-se en aquestes aplicacions (foto 9).

A la postguerra l'ús dels GRP va augmentar gradualment en fer-se necessari el cobriment de totes les antenes dels reactors, i els carenatges corresponents van brotar com fongs a les ales i fuselatges però, com era lògic, aviat es va pensar que la lleugeresa i la possibilitat d'adoptar formes complexes d'aquests materials podrien trobar altres aplicacions i, excepcionalment, no van ser els avions de combat o comercials els primers a beneficiar-se'n, sinó l'aviació en general (és a dir, el que coneixem com a *avionetes*, etc.): peces complexes com capós, dipòsits de combustible, etc. podien ser construïdes

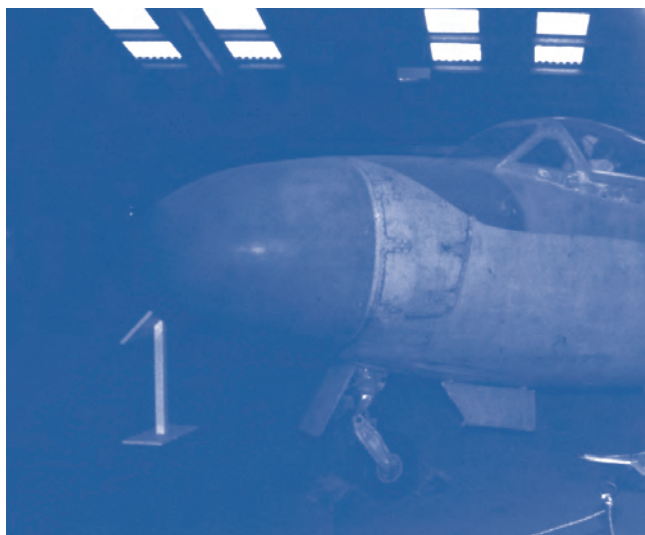


Foto 9. Representatiu de l'ús del GRP als anys quaranta-seixanta, el radom d'aquest Sea Venom mostra clarament el desgast a causa del fregament, que ha erosionat el gelcoat negre exterior fins a fer-lo quasi desaparèixer, i que ha deixat a la vista el GRP clar. (Foto de l'autor.)



Foto 10. Un Robin ATL, típic exemple de construcció lleugera actual. Pot apreciar-se com l'ús integral de GRP i compòsits per a l'estructura ha permès adoptar formes complexes en doble curvatura que haurien requerit un treball llarg i costós si s'hagués hagut d'emprar el metall. (Foto de l'autor.)

amb considerable guany de pes sobre el metall i amb inversions prèvies més reduïdes. L'honor de fer el gran pas endavant va recaure en el gran constructor d'avions lleugers que és Piper, que va fer volar el 1948 un prototip d'avió lleuger, el PA-29 Papoose, construït totalment en GRP. L'experiment no va tenir èxit a causa de molts factors (entre ells la manca d'operaris qualificats en aquest camp), però ben aviat altres fabricants van començar a introduir elements de GRP a les estructures dels seus avions, els planadors de concurs van ser construïts completament amb aquests materials i en general la proporció de GRP va anar augmentant fins que es va arribar a realitzar amb GRP (o altres compòsits) la totalitat de la cèl·lula (foto 10). Un cas particular és el de la construcció amateur, on molts constructors novells ara poden fer-se els seus propis models sense passar per l'aprenentatge del treball en fusta o metall. L'aplicació més extensa als grans avions va ser més lenta i es va limitar al principi a objectes com dipòsits auxiliars i ràcords ala-fusellatge. D'altra part, si bé el guany de pes en molts elements era notable, la resistència del material (sobretot la tèrmica) feia veure que seria necessari trobar quelcom millor. El problema venia per dos costats: en primer lloc la fibra de vidre era (i és) un material amorf i, per tant, isòtrop, mentre que els esforços a l'estructura d'un avió gairebé sempre són direccionals. D'altra part, l'associació d'un material de silici amb una matriu orgànica no és molt eficient i requereix tractaments previs compatibilitzadors, mentre que les propietats mecàniques del polièster podrien ser millorades. Tot això ja indicava quin havia de ser el camí que calia seguir.



Foto 11. Els plafons laterals de les derives d'aquest F-15 són un dels pocs casos on ha estat possible emprar la fibra de bor. Pot apreciar-se com les superfícies presenten una curvatura molt suau. (Foto de l'autor.)

El primer pas es va donar als primers anys seixanta amb l'estudi de les fibres de bor: el material semblava tenir bones propietats resistència/pes (l'estructura cristal·lina era molt regular) i tèrmiques, que justificaven l'alt cost del producte, i als anys setanta va ser posat al mercat com a reforçant per a matrius epoxídiques, però tan sols en forma de betes de 75 mm d'ample, amb limitada capacitat de curvatura, i que requerien eines de diamant per al seu mecanitzat posterior [25]. Es pot comprendre que aquests factors limitessin l'aplicació d'aquest primer material compòsit sintètic al camp militar on el cost és menys determinant i, sobretot, per a elements amb escassa o nul·la curvatura: estabilitzadors (McDonnell F-15) (foto 11), travessers (Boeing B-1), etc. D'altra part, fenòmens com la degradació dels coronaments dels pivots d'ala de l'F-111 [26] han fet que la confiança en la durabilitat dels elements de BRP hagi disminuït. De tota manera, la matriu epoxídica sí que va donar plena satisfacció, i la posterior introducció de les poliimides va millorar encara més la resistència tèrmica de les matrius. Tan sols calia cercar altres reforçants, i el millor seria que fossin orgànics en natura per tal de compatibilitzar-se millor amb la matriu.

La troballa va venir de la gentil mà de Stephanie Kwolek i (com sembla ser una constant al camp macromolecular) apadrinada pels DuPont. També segons costum va rebre en lloc del nom estricte de *poly-paraphenylenetherphthalamide* un de més comercial, eufònic i (sobretot) curt: Kevlar. Per primera vegada una fibra orgànica podia competir mecànicament amb els metalls, i a més la seva natura anisotròpica combinada amb una bona flexibilitat possibilitava produir peces «direccionalitzades» on la màxima resistència s'obtenia en la direc-



Foto 12. Les particulars característiques dels compòsits van fer que a l'antiga Unió Soviètica es considerés necessari indicar de forma visible la seva natura. A la deriva d'aquest MiG-29 els elements en compòsit van marcats amb una X i la descripció del material. (Foto de l'autor.)

ció del màxim esforç. Com a inconvenients cal mencionar el cost elevat (que com sempre passa s'ha anat moderant amb el temps), però ja abans que fos comercialitzat el desenvolupament del seu més gran competidor ja havia començat.

Les propietats del grafit eren ben conegudes des de feia més d'un segle quan a principis dels anys seixanta es va aconseguir produir-lo en forma de fibres per piròlisi del raïó. El producte resultant mostrava propietats excel·lents i la seva compatibilitat amb les matrius polimèriques era també molt satisfactòria. El procés de producció va ser millorat emprant poliacrilonitril com a precursor en comptes del raïó i així es va posar l'escenari per a la més gran de les revolucions que mai

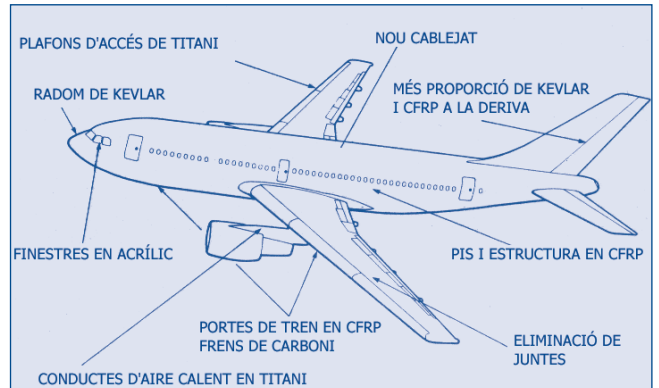


Foto 13. Els punts més importants del programa de reducció de pes de l'Airbus A310. Fins i tot aquest ús relativament modest dels RP va permetre reduir el pes en buit en més de tona i mitja.

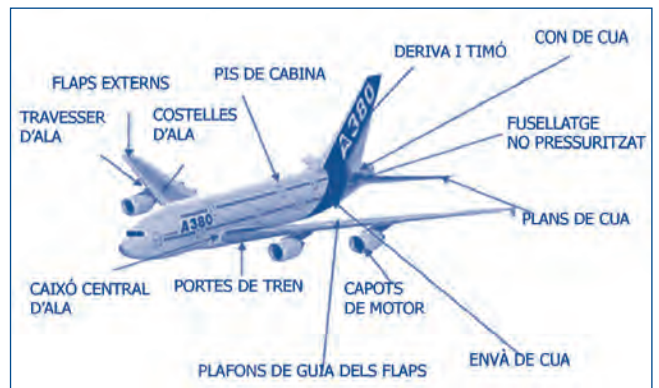


Foto 14. Aquí podem apreciar com a l'Airbus 380 (el darrer membre de la família) l'ús de CFRP no sols ha augmentat en quantitat sinó també en qualitat: fins i tot el caixó central d'ala, l'estructura que suporta tots els esforços, ha estat realitzat en CFRP.

s'hagin produït al camp aeroespacial: materials susceptibles de ser formats en corbes complexes, de fàcil mecanització, de bona resistència tèrmica, excel·lent comportament mecànic i la possibilitat d'emprar fibres orientades per tal de rebre els esforços de la forma més convenient.

Com és usual les primeres aplicacions dels CFRP (*carbon fibre reinforced polymers*) van ser militars, d'allò més prudents i limitades a elements discrets (foto 12), però ben aviat això va canviar: entre els constructors civils la possibilitat de reduir el pes en buit significava que no sols es podia augmentar la càrrega mercant sinó que també calia emprar menys combustible per arrossegar per l'aire la mateixa estructura de l'avió, i amb els preus del petroli cada vegada més disparats la despesa addicional en nous materials semblava molt atractiva. La trans-

formació de la indústria es pot seguir fàcilment veient l'evolució de la família d'avions comercials més consistent de la història, Airbus: mentre que els primers A300 eren avions metàl·lics a tots els efectes, l'A310 va introduir ja els CFRP a «l'obra viva» de l'avió amb un gran guany al pes (foto 13) i la progressió ha continuat fins que al nou A380 la major part de l'estructura portant és realitzada en CFRP (foto 14).

Encara més important ha estat l'impacte a l'aviació del món dels negocis, camp molt competitiu, on l'envelliment dels aparells en servei assegura un mercat potencial de milers d'unitats en els anys a venir i on l'estalvi de pes es pot traduir en la possibilitat d'augmentar el passatge en una persona o el radi d'acció en centenars de kilòmetres. El pioner en la utilització integral dels CFRP (fins i tot per a elements tan tradicionalment metàl·lics com les potes del tren) va ser en Burt Rutan [27], que ha aprofitat les propietats dels composts al màxim per tal d'emprar formes aerodinàmiques literalment revolucionàries fins a posar en servei la primera llançadora privada (Spaceship One) [28], el seu exemple ha estat seguit amb menys audàcia però més seny comercial per molts constructors novells que ofereixen models realitzats quasi enterament en CFRP fins al punt de haver creat la nova categoria dels VLJ (Very Light Jet) [29]. De moment l'evolució continua.

Cinquena etapa: cal quelcom nou

Fins ara ens hem dedicat a resumir la molt íntima relació entre progrés químic i progrés aeronàutic, però ara demanem al lector una mica més de paciència i ens permetrem d'elucidar una mica sobre el futur. En primer lloc, observem que al llarg d'aquest article hi ha una paraula, fonamental en química macromolecular, que no hem fet servir una sola vegada: termoplàstic.

És ben cert que no manquen els polímers lineals als avions moderns, però fora dels purs accessoris la seva contribució és episdica i nul·la a les estructures sustentadores i de govern. També és cert que els avantatges dels termoplàstics (facilitat de transformació i preu) semblen suggerir que el seu ús, de fer-se, seria sobretot en aplicacions de baix nivell com els ultralleugers i l'aviació general, que no atrauen gaires fons de recerca, però no és menys cert que en aquests camps qualsevol reducció del costos portaria indefectiblement un augment del consum que seria prou profitós per qui, per exemple, fos

capaç de produir travessers d'ala en termoplàstic reforçat amb fibra mitjançant la pultrusió, o costelles i quadernes per injecció, sense comptar la miriada de components menors que absorbeixen una enorme proporció de la mà d'obra total. Intentats com el de Jim Bede [30] de simplificar la construcció amateur emprant travessers d'ala tubulars i elements mixtos costella-pell van fracassar per la necessitat de fer servir GRP, de manufactura lenta, relativament costosa i, sobretot, especialitzada.

Ni tampoc caldria limitar-nos a la vessant menor de la tecnologia: sense cap dubte la producció de pales de rotor per a helicòpter per coextrusió constituiria un desafiament tecnològic de primer ordre, però els beneficis també ho serien. I cal pensar en el camp dels vehicles no tripulats (UAV), que cada vegada assumeixen més importància tant al camp militar com al civil, i per als quals no seria difícil de portar el concepte fins a les seves últimes conseqüències fent-los «d'un sols ús» o «rebutjables», cosa perfectament possible si el cost inicial es reduís bastant. En fi, és un suggeriment però ens agradaria arribar a veure'l convertit en realitat.

Per saber-ne més

Lockheed: ALLEN, R. S. *Revolution in the Sky*. Nova York: Orion Books, 1988.

Albatros: GREY, P. L.; STAIR, I. R. *Albatros fighters of World War 1*. Oxford: Wingspan Publ, 1979.

Fibres: <<http://www.fibersource.com>>.

Redux: BISHOPP, J. J. A. *Int. J. Adhes. Adh.*, núm. 17 (abril 1997), p. 287-301.

Compostos: MICHAELI, W.; WEGENER, M. *Tecnología de los composites/plásticos reforzados*. Hanser, 1992.

Propietats dels polímers en general: GNAUCK, B.; FRÜNDT, P. *Iniciación a la química de los plásticos*. Hanser, 1992.

Polímers en general: HELLRICH, W. [et al.]. *Guía de materiales plásticos: Propiedades, ensayos, parámetros*. Hanser, 1992.

Epòxids: FLICK, E. W. *Epoxy Resins, Curing Agents, Compounds, and Modifiers: An Industrial Guide*. William Andrew, 1993.

Referències bibliogràfiques

- 1) *Materials World*, p. 12, núm. 1, vol. 22 (2004).
- 2) SMITH, W. H. «Airplane dopes and doping». *Annual Report National Advisory Committee for Aeronautics*, núm. 38 (1920).

- 3) Ramsbottom, *Royal Aeronautical Establishment Bulletin* (1917).
- 4) RIMMELL, R. «PC12». *Windsock*, núm. 3 (1995).
- 5) HUNTLEY, I. «PC10, the last word». *Scale Models International* (juliol 1984).
- 6) YOUNG, R. J. *Introduction to Polymers*. Chapman and Hall, 1983.
- 7) VOLTA, F. [ed.]. *Dimensione Cielo: Caccia-Asalto: 1*. Bizzarri, 1975.
- 8) BAUD, P. *Traité de Chimie Industrielle*. Masson, 1951.
- 9) LECARME, J. *Aviation Magazine*, núm. 53 (1975), p. 666.
- 10) SKEIST, I. *Handbook of Adhesives*. Reinhold, 1962.
- 11) *Idflieg report*. Citat a: BRUCE, J. M. *The Fokker Dr. 1*. Profile Pub. Winsord, núm. 55.
- 12) ANON. *The Plywood Age*. APA Publications, 2005.
- 13) KOWALSKI, T. J. *Albatros D.I-D.V*. Lublin: Kagero, 2006.
- 14) LOUGHEAD, M. *U. S. 1.425.113* (1922).
- 15) PARKER, R.; TAYLOR, P. *Adhesión and Adhesives*. Pergamon Press, 1966.
- 16) ANON. *Handbook of finnish plywood*. Finnforest, 2005.
- 17) GUNSTON, B. *Russian Aircraft 1875-1995*. Londres: Osprey, 1995.
- 18) ANON. «A Russian Fighter». *Flight*, núm. 12 (agost 1943).
- 19) HALLIDAY, J. *Mosquito*. Doubleday, 1970.
- 20) LEYVASTRE, P. *Air International* (setembre 1973).
- 21) GREEN, W. «Ta-154». *Air International* (abril 1989).
- 22) *The Aeroplane*, núm. 21 (maig 1946). [Report]
- 23) ANON. *Redux bonding technology*. Hexcel, 2003.
- 24) ELLIS, C. *U. S. 2.195.362* (1940).
- 25) SCALA, E. P. *JOM*, núm. 48 (febrer 1996), p. 45-48.
- 26) CHALKLEY, P.; GEDDES, R. *Report DSTO-TN-0168* (1998).
- 27) BROWN, D. *Air Internacional*, núm. 176 (abril 1985).
- 28) SHANE, B. *Airliners*, núm. 10 (2004).
- 29) SIMPSON, R. *Air International* (maig 2007).
- 30) MORMILLO, F. B. *Air Internacional* (setembre 1993).

Autor

Jaime de Andrés Llopis (Barcelona, 1946) és doctor en ciències químiques (UB, 1981). Professor titular del Departament de Química Física de la UB. Col·laborador del Museo del Aire (Cuatro Vientos, Madrid). Membre de l'Associació d'Amics de l'Aeronàutica (Sabadell). La seva recerca ha estat dedicada al camp de la cinètica química, incloent-hi les reaccions del polipropilè atàctic, i posteriorment al de la dinàmica de reaccions. També ha publicat dos treballs sobre química artística. Ha treballat al camp de la producció de cautxús sintètics.