Evoluzione delle leghe di alluminio per aeronautica dopo le due guerre mondiali

V. Wagner

In questo articolo è illustrata l'evoluzione nelle caratteristiche e nelle applicazioni avuta dalle leghe di alluminio altoresistenziali per impieghi aeronautici. Tale evoluzione viene presentata, dopo una nota introduttiva, sulla base del seguente "percorso":

1. *1925; 1934; 1943. Dall'epoca pre-alluminio in Europa alle costruzioni-record italiane (prototipi del tipo M C 72) e alle più significative costruzioni militari di serie: M C 205 "Veltro", nel 1939 - 1942/43.*
2. *1943 ÷ 2004. La versatilità delle leghe di alluminio nel secondo dopo guerra (esempi dettagliati per quanto riguarda l'impianto alare). La suddivisione fra leghe di prima e seconda generazione (trattamenti mono- e di-isotermici); prime realizzazioni con i compositi a matrice polimerica.*
3. *1986 ÷ 2004. L 'alleanza divenuta strategica fra leghe di alluminio ed i materiali compositi non metallici. I velivoli di nuova concezione e la crisi energetica (Piaggio P180 – "Avanti")*
4. *Le costruzioni spaziali e l'uso delle leghe di Al al massimo dettaglio nei particolari del 1° Stadio del Saturno V ("Programma Apollo")*
5. *(1999 ÷ 2003) Le leghe di alluminio avio e la "seconda aereonautica": la costruzione degli stampi per plastica.*

Nelle conclusioni vengono sintetizzati alcuni risultati oustanding delle leghe Al ad alta resistenza, evidenziando le vittorie tecnologiche italiane.

Parole chiave: alluminio e leghe, valutazione materiali, proprietà, rassegna

INTRODUZIONE

Per leghe "altoresistenziali" a base di alluminio si intendono soprattutto le leghe delle famiglie 2XXX e 7XXX. Nella Tabella 1a-b si riportano le composizioni tipiche di tali leghe, mentre la Tabella 2 ne sintetizza le principali caratteristiche meccaniche.

1. 1925; 1934; 1943. Dall'epoca pre-alluminio in Europa alle costruzioni-record italiane (prototipi del tipo M C 72) e alle più significative costruzioni militari di serie: M C 205 "Veltro", nel 1939 -1942/43.

Nei trenta anni o poco più che seguirono la pace di Versailles i fenomeni che limitarono maggiormente lo sviluppo delle costruzioni aeronautiche in termini di carenza di scienza dei materiali e delle strutture leggere furono diversi e tutti particolarmente "pesanti".
Citeremo fra i fenomeni più negativi:

1. il ricorso a materiali pesanti come acciaio e ghisa per le strutture (cellule) e per i motori;
2. l'utilizzo fra le leghe di alluminio wrought delle sole leghe ternarie al rame (tipicamente la 2017);
3. la soluzione praticamente universale - negli impianti alari biplani, triplani - facente ricorso ai tipici cavi di controventatura in acciaio, con le conseguenti limitazioni geometriche;
4. gli impianti motori tipo "motore a scoppio" (alternativi) con monoblocchi in acciaio o ghisa.

L' evoluzione europea fu più lenta di quella USA.
Tale evoluzione può essere contrassegnata da tre periodi.

Costruzioni praticamente senza leghe di alluminio. Si veda il trimotore biplano costruito da un gruppo di aziende del regno unito per collegare Londra con alcune capitali europee. Si tratta di un biplano della Imperial Airways Limited del 1925 (Figure 1 e 2). In Figura 1 è evidenziata la struttura "large iron bird cage"; ossia a grande gabbia d'acciaio. Gli elementi di tale gabbia erano profilati ed anche tubi di acciaio.

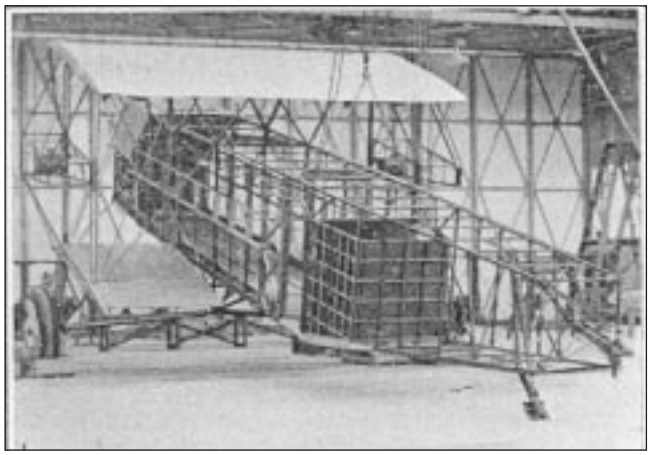


Fig. 1 – L'armatura "pesante" della cellula del biplano trimotore, del tipo "large iron bird cage" (in profilati e tubi di acciaio).

Fig. 1 – The heavy structure of the three-engine plan ("large iron bird cage"), using steel profiles and tubes.

Vittoriano Wagner
Past President Centro Studi Metalli Leggeri

Lega	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Altri
2014	Bal	0.9	4.4	0.8	0.5	--	--	--
2017	Bal	--	4.0	0.5	0.5	--	--	--
2024	Bal	--	4.5	0.6	1.5	--	--	--
2117	Bal	--	2.5	--	0.3	--	--	--
2011	Bal	--	5.5	--	--	--	--	0.5 Pb, 0.5 Bi
2025	Bal	0.8	4.5	0.8	--	--	--	--
2219	Bal	--	6.3	0.3	--	--	--	0.15 Zr, 0.1 V

Tabella 1a: Composizione chimica delle principali leghe di alluminio della famiglia 2XXX.

Table 1a: Chemical composition of the main Aluminium alloys of the 2XXX group.

Lega	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Altri
7001	Bal	--	2.1	--	3.0	0.30	7.4	--
7075	Bal	--	1.6	--	2.5	0.30	5.6	--
7076	Bal	--	0.6	0.50	1.6	--	7.5	--
7079	Bal	--	0.6	0.20	3.3	0.20	4.3	--
X 7080	Bal	--	1.0	0.35	2.25	--	6.0	--
7178	Bal	--	2.0	--	2.7	0.30	6.8	--

Tabella 1b: Composizione chimica delle principali leghe di alluminio della famiglia 7XXX.

Table 1b: Chemical composition of the main Aluminium alloys of the 7XXX group.

Lega	Stato di trattamento	R [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A [%]	HB	Resistenza a taglio [MPa]	Limite di fatica (a) [MPa]
Leghe altoresistenziali per aeronautica							
7001	O	254	151	14	60	...	...
	T6	673	625	9	160	...	151
	T651	673	625	9	160	...	151
	T75	577	494	12	...	...	...
7075	O	227	103	17	60	151	117
	T6	570	501	11	150	330	158
	T651	570	501	11	150	330	158
	T73	501	432	13	...	...	...
Alclad 7075	O	220	96	17	...	151	...
	T6	522	460	11	...	316	...
	T651	522	460	11	...	316	...
7076	T61	508	467	14	150	...	...
7079	T6	535	467	14	145	309	158
	T651	535	467	14	145	309	158
X7080	T7	474	412	11	...	...	...
7178	O	227	103	15	60	151	...
	T6	604	535	10	160	357	151
	T651	604	535	10	160	357	151
Alclad 7178	O	220	96	16	...	151	...
	T6	556	487	10	...	336	...
	T651	556	487	10	...	336	...
Leghe per impieghi speciali							
X7005	O	192	82	20	...	...	...
	W	343	206	20	...	...	...
	T6	350	288	13	...	213	151
7039	T61	412	343	13	...	...	...
	T6151	412	343	13	...	...	...

(a) 500 milioni di cicli (Moore-type rotating-beam machine).

Tabella 2: Caratteristiche meccaniche delle leghe di alluminio della famiglia 7XXX.

Table 2: Mechanical characteristics of Aluminium alloys of the 7XXX group.

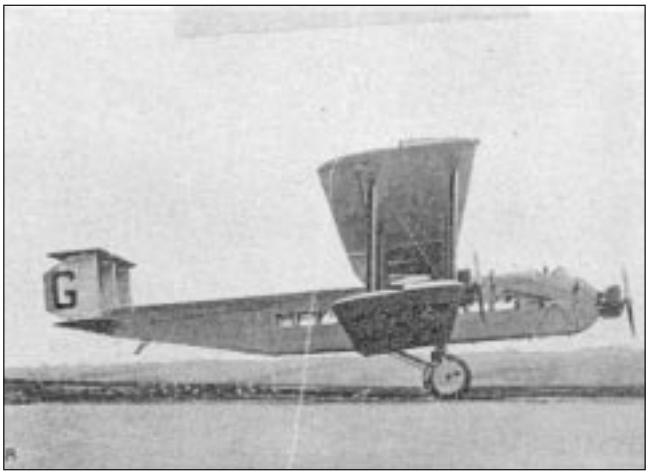


Fig. 2 – Biplano trimotore della Imperial Airways Limited (1925) nell'assetto prerotazione (looking forward!).

Fig. 2 – Three-engine plane of Imperial Airways Limited (1925), in the pre-rotation asset (looking forward!).

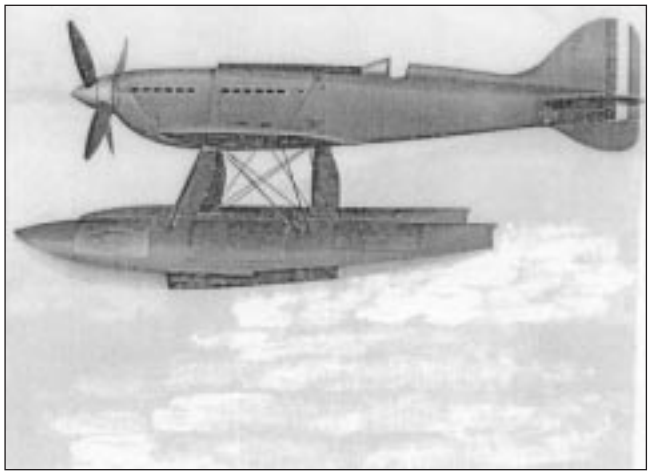


Fig. 3 – Fotografia dell'idrocorsa MC 72 con evidenza delle due eliche controrotanti (doppio monoblocco in acciaio in linea). Record di velocità 709 km/h (1934).

Fig. 3 – Photo of the MC 72 model, with the two counter-rotating propellers. Speed record: 709 km/h (1934).

Costruzioni "miste": leghe di alluminio + acciaio e legno. Si veda l'idrovolante da record MC 72 completo di doppia elica (Fig. 3).
In Figura 4 è viceversa riportato il relativo "tre viste" con evidenza dei cavi d'acciaio per la controventatura. I galleggianti erano in legno, essendo impossibile realizzarli in lega di alluminio. L 'MC 72 detiene - nonostante il peso (oltre 3000 Kg) - il record di velocità per i velivoli di tale tipo (709 km/ora).

Costruzioni mature con impiego quasi esclusivo di leghe di alluminio. Si veda in Figura 5 l'MC 205 "Veltro". Il progettista ed il costruttore erano gli stessi del MC 72. Fu costruito purtroppo in pochi esemplari. Fu - anche dai rivali inglesi – ritenuto equivalente al famoso "Spitfire" – Supermarine (Confrontare la prima famiglia di esempi in Figura 6 ; si veda il caso "d"). A differenza degli italiani, gli inglesi furono in grado di impiegare le primissime leghe quaternarie ad alta resistenza: nel 1943 era apparsa la 7075 T6 (lega quaternaria di prima generazione) e tale data costituisce un importante giro di boa.

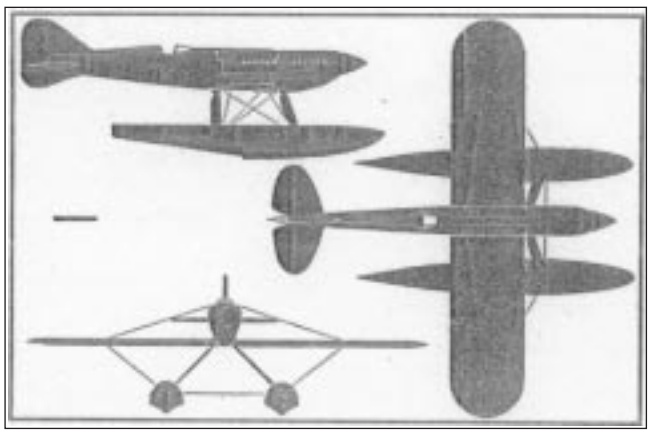


Fig. 4 – Disegno a tre viste del MC 72. evidenza dei cavi di controventatura e degli scafi in legno. Dell'MC 72 furono costruiti 5 esemplari, con numero di matricola dal 177 al 181. Quest'ultimo è il velivolo impiegato per il primato.

Fig. 4 – Drawing of MC 72, with reinforcing wires and wood craft. Five MC 72 were built (code number: 177 to 181; the last one was used for the speed record).

2. (1943 ÷ 2004)
La versatilità delle leghe di alluminio nel secondo dopo guerra (esempi dettagliati per quanto riguarda l'impianto alare).
La suddivisione fra leghe di prima e seconda generazione (trattamenti mono- isotermici e di-isotermici); prime realizzazioni con i compositi a matrice polimerica.

Dalla Figura 6 risalta con completezza l'estrema versatilità nel disegno dell'impianto alare, tipica del secondo grande periodo di sviluppo (1943 ÷ 2004).
Questa grande versatilità e diversità fu permessa da due fattori principali :
- l'eliminazione del sistema delle controventature e l'abolizione dei relativi cavi di acciaio
- l'incessante crescita delle caratteristiche meccaniche statiche (UTS, YTS) delle leghe 7XXX o quaternarie (Al -Zn - Cu -Mg). Ciò avveniva a partire dalla capostipite più nota, la 7075- T6 del 1943 già citata.

Tale crescita è illustrata in Figura 7; in tale Figura è anche evidenziata la zona dei massimi valori statici raggiunti per le leghe quaternarie tipo 7178- T6 e 7001- T6 negli anni 1960 ÷ 1970.
Prima di evidenziare i limiti collegati a questa tendenza (limiti del resto presenti negli impianti alari di Figura 6 e in parte già chiariti dal disegno con le diverse curve nella parte alta di Figura 7) è opportuno evidenziare le 3 o 4 tipologie di disegno presenti negli impianti alari di Figura 6.
Sono presenti tre tipologie di impianto alare:
I. ali tradizionali con asse-ali perpendicolare all'asse principale del velivolo; casi a ÷ d
II. ali a freccia positiva o negativa ed ali a freccia variabile (Tomcat caso h)
III. ali a delta o ogivali
Mancano (per il momento) gli schemi degli impianti alari più inusuali tipo "wings on tail": ali sulla coda; come nel caccia F 18 e "three lifting surfaces" come nel turbo elica italiano P 180 (vedere dopo altri dettagli in Figura 8 , oltre al paragrafo 3). La definizione "wings on tail" è talvolta sostituita dalla definizione "three lifting surfaces", più precisa e collegata alla reale configurazione (Figura 8 in basso).
Ancora in Figura 8 sono riportate le indicazioni (-c-c-c-c-) relative ai velivoli in cui su tutta la produzione, o su alcune famiglie, vennero utilizzati i primi "skin" (pelli esterne) in materiale composito in fibra ad alto modulo (generalmente

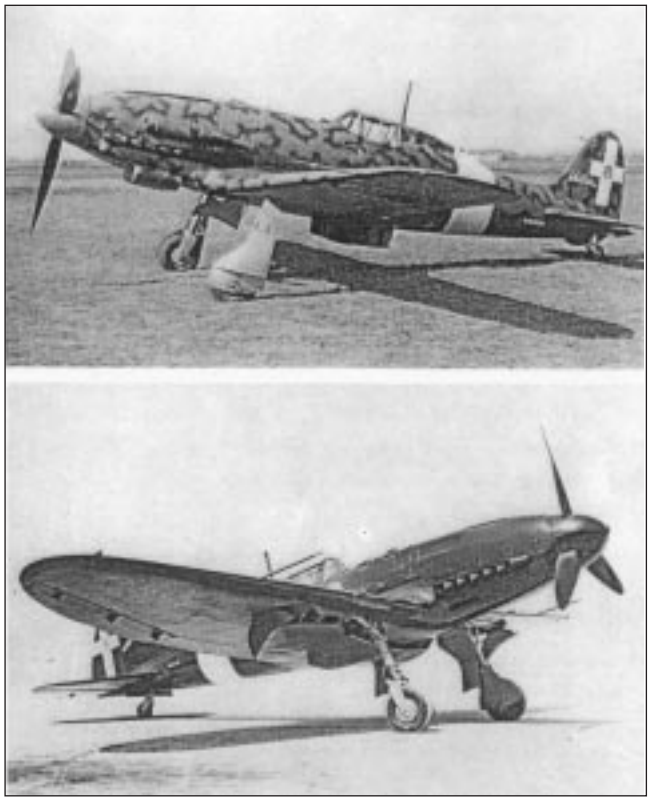


Fig. 5 – Caccia di fabbricazione Macchi tipo MC 205 "Veltro" (1942/43) MC : Macchi – Castold; per motivi strategici, il "Veltro venne costruito oltre che presso la casa madre, la Macchi, anche presso le Reggiane con la sigla RE 2005 (in luogo di MC 205).

Fig. 5 – MC 205 "Veltro" fighter built by Macchi ((1942/43, MC : Macchi – Castold); for strategical reasons, the "Veltro" was built both by Macchi and by Reggiane (code: RE 2005 instead of MC 205).

fibre di carbonio) e matrice organica, tipicamente epossidica. Nella parte bassa di Figura 8 è posta in evidenza la coppia costituita da due velivoli "three lifting surfaces" e "wings on tail". Per il primo caso, oltre alla fotografia del P 180 "Avanti", maggiori dettagli vengono dati al paragrafo 3.

3. (1986-2004). L'alleanza divenuta strategica fra leghe di alluminio ed i materiali compositi non metallici. Velivoli di nuova concezione e la crisi energetica (Piaggio P 180 "Avanti")

Le carenze delle leghe quaternarie di 1ª generazione

Nel 1980 ÷ 1986 la presenza contemporanea nelle moderne cellule di leghe quaternarie (di 2ª generazione) e di compositi ad alto modulo in fibre di carbonio divenne molto di più di una semplice fase della ricerca strutturale, per assumere gli aspetti della sinergia strategica (Figura 11).

L 'impossibilità di diminuire ulteriormente il peso delle cellule e dei sistemi alari facendo ricorso a leghe quaternarie ad altissimo carico di rottura (UTS > 90.000 psi) era ormai evidente (vedere Figura 7).

Materiali siffatti avevano deformazioni a rottura praticamente trascurabili (vedere curva "elongation" in Figura 7) ed erano soggetti a rotture brutali ed improvvise (vedere leghe di 1ª generazione nella parte bassa di Figura 7). Oltre a ciò era ormai evidente che le caratteristiche di resistenza alla fatica classica diminuivano con l'aumentare della durezza anziché aumentare (come spesso avviene negli acciai da costruzione).

Oltre alle carenze derivanti dalla fragilità e dal comportamento a fatica, spesso le leghe di 1ª generazione erano fortemente influenzate dalla anisotropia dei lavorati a caldo (specie gli estrusi e certi stampati). Il "traverso" ed il "traverso corto" costituivano sempre di più angosciosi "question points" per i progettisti. Altra limitazione era in certi casi l'ipersensibilità all'ambiente.

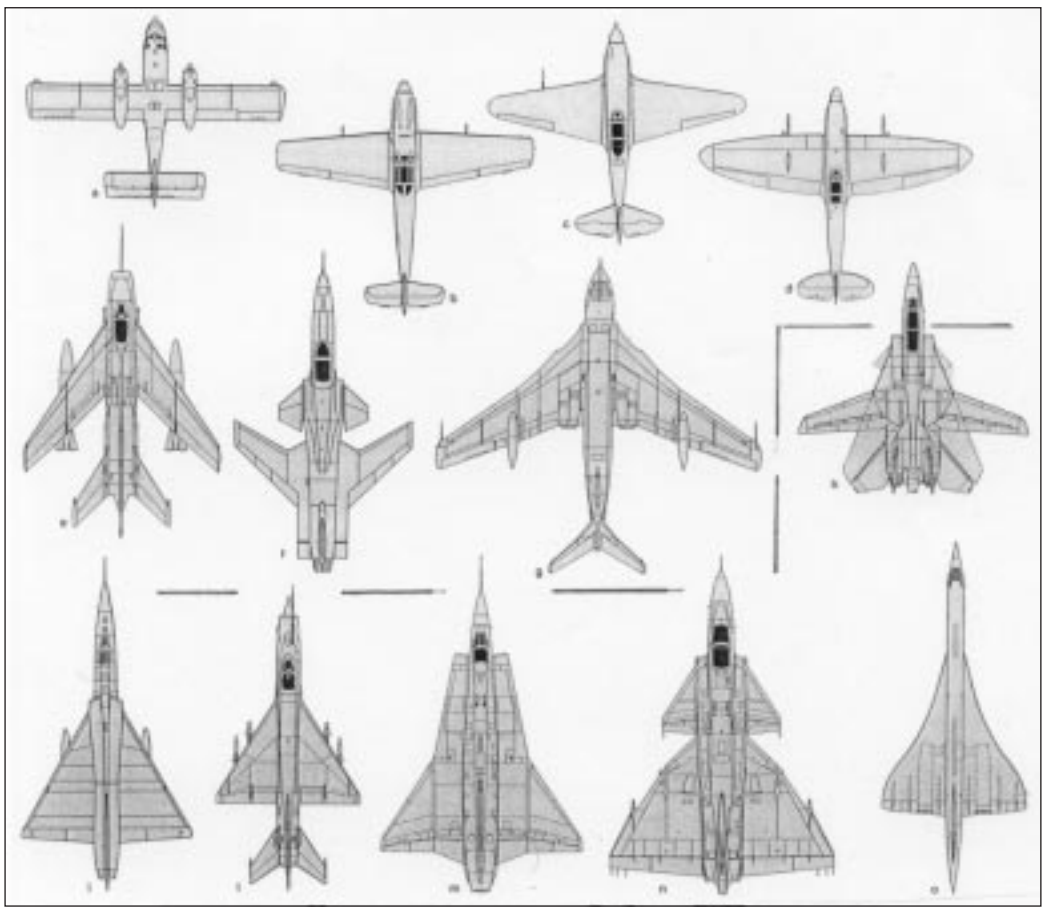


Fig. 6 – Evoluzione ("rivoluzione") della concezione dell'impianto alare a partire dal 1940/45 (Spitfire Supermarine caso "d"). La linea tratteggiata delimita i velivoli più moderni caratterizzati dall'impiego di leghe quaternarie di seconda generazione (iniziando dalle prime proposte di Figura 7). Piante alari: a, ala rettangolare (Canadair CL215); b, ala trapezia (Messerschmitt BF 109E); c, ala triangolare (Yakovlev Yak-9); d, ala ellittica (Supermarine Spitfire IXE); e, ala a freccia (Mikoyan MiG-19); f, ala a freccia negativa (Grumman X-29); g, ala a freccia crescente (Handley-Page Victor); h, ala a freccia variabile (Grumman F-14A Tomcat); i, ala a delta puro (Convair F-106A Delta Dart); I, ala a delta caudato (MiG-21); m, ala a doppio delta (crescente; Saab J-35F Draken); n, ala a doppio delta (decrescente; Saab AJ-37 Viggen); o, ala a delta ogivale (Concorde)

Fig. 6 – Evolution of the wings systems since 1940-1945.

Tabella 3– Sviluppo delle leghe altoresistenziali (1943-1965).

Table 3– Development of high strength Aluminium alloys (1943-1965).

Anno	Lega	TS (MPa)	YS (MPa)	A (%)	Commenti
1943	7075-T6	570	501	11	Elevata resistenza *
1951	7178- T6	604	535	10	Elevata resistenza *
1954	2219-T81	481	364	11	Saldabilità, resistenza alte temperature
	2219-T87	481	398	10	Resistenza, tenacità a basse temperature
1957	2020-T6	577	529	7	Resistenza alte temperature, alto modulo
1957	7079-T6	536	466	14	Sezioni spesse, elevato allungamento
1960	7075-T73	501	432	13	Elevata resistenza alla tenso-corrosione *
1963	7075-T76	535	466	11	Resistenza all'esfoliazione **
1965	7178-T76	556	487	11	Resistenza all'esfoliazione **
1965	X7080-T7	487	426	12	Sezioni spesse, basse tensioni **

** Leghe quaternarie di prima generazione*
*** Leghe quaternarie di seconda generazione*

Fig. 7 – Crescita continua delle caratteristiche di resistenza meccanica fino ai valori delle leghe ternarie e delle leghe quaternarie più spinte: 7178 T6 e 7001 T6 (leghe quaternarie di prima generazione).

Fig. 7 – Continuous growth of mechanical resistance, up to the best ternary and quaternary alloys: 7178 T6 and 7001 T6 (quaternary alloys of first generation).

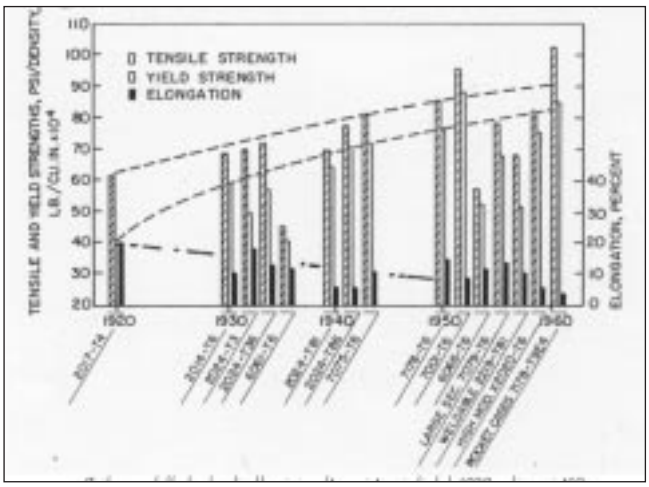


Fig. 8 – Ultime fasi dell'evoluzione dell'impianto alare verso forme inusuali ("wings on tail" / three lifting surfaces ecc). Evidenza della presenza sistematica dei compositi (-c-c-c-c-c-c-c-c-c-c-c).

Fig. 8 – Final stages of the development of the wings system, up to unusual geometry ("wings on tail" / three lifting surfaces ecc). The wide use of composites is put into evidence (-c-c-c-c-c-c-c-c-c-c-c).

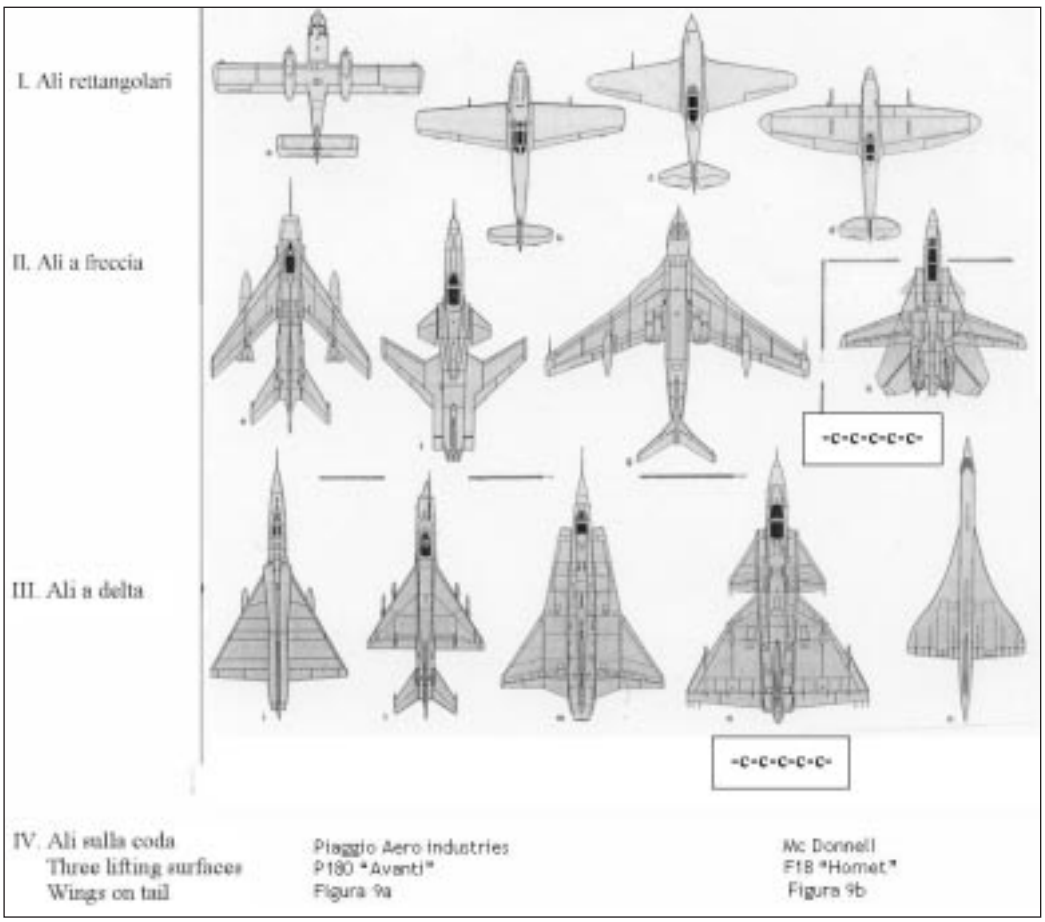


Fig. 9a – Volo del prototipo P.180 " Avanti" nel 1986.

Fig. 9a – Flight of P.180 prototype "Avanti" in 1986.

L' avvicinarsi della rivoluzione energetica

Contemporaneamente alle carenze delle leghe quaternarie di 1ª generazione, un altro grosso fronte di difficoltà si andava concretizzando dal lato del prezzo del carburante e della conseguente lievitazione di costi di esercizio. Negli anni '80 il prezzo al barile per il petrolio grezzo oscillava fra i 15 ed i 25 dollari e l'instabilità del medio oriente cominciava ad essere evidente su scala mondiale (guerra per il Kuwait).

In conseguenza dei diversi fattori indicati alcuni costruttori, sia militari che civili - particolarmente lungimiranti -prospettarono diverse nuove strade per

1. adottare sistematicamente le leghe quaternarie di 2ª generazione
2. ridurre i costi di costruzione (lavorazioni integrali)
3. contenere i costi di esercizio (i consumi)
4. aumentare l'affidabilità e la resistenza agli effetti ambientali
5. usare con oculatezza i compositi (controllo dei costi)

A ciò si aggiungeva -per le costruzioni civili

6. l'aumento del comfort
7. il miglioramento della silenziosità.

In pratica si trattava di

a) costruire le cellule ed i sistemi alari con leghe quaternarie della 2ª generazione ad alta isotropia (scomparsa dei vari "traversi")
b) alleggerire ulteriormente le cellule, i sistemi alari e le "gondole-motore" con l'adozione di materiali compositi in fibra di carbonio
c) affinare al massimo le soluzioni aerodinamiche, per ridurre i costi aumentando le prestazioni (e per migliorare il confort e la silenziosità)
d) eliminare i motori a turbo getto troppo "assetati"
e) sostituire - quando possibile - i turbogetti con gruppi turboelica (ed eliche "dedicate")
f) studiare e sviluppare unità motrici con ciclo diesel specifiche per avio.

Queste nuove strade furono adottate tutte (salvo l'ultima indicata) sia nelle costruzioni civili che militari. Ed oggi si può dire che - fra le costruzioni civili – l' "Avanti" della Piaggio è uno degli esempi di gran lunga più significativi.

Nella Figura 11 - già citata - sono esemplificati i componenti più significativi in materiale composito. Nella Figura 12 viene riportato l'Avanti nell'attuale configurazione standard. Tale velivolo usufruisce di due centri di assistenza e distribuzione: uno in Europa (Genova- Finale Ligure), ed uno negli Stati Uniti. Una delle conseguenze più notevoli di questa realizzazione italiana è l'aver creato una nuova classe di "business (aircraft) / liner": il turbo elica con prestazioni da jet (e confort superiore sotto diversi aspetti).

"Business aircraft / liner" : questa definizione merita un breve commento. Letteralmente significa "aereo d'affari di linea". Sembra un controsenso, ma non lo è. Molti utilizzatori dell'"Avanti" hanno notato la tipica eccezionale autonomia paragonabile a certi aerei di linea, dovuta ai consumi molto bassi.

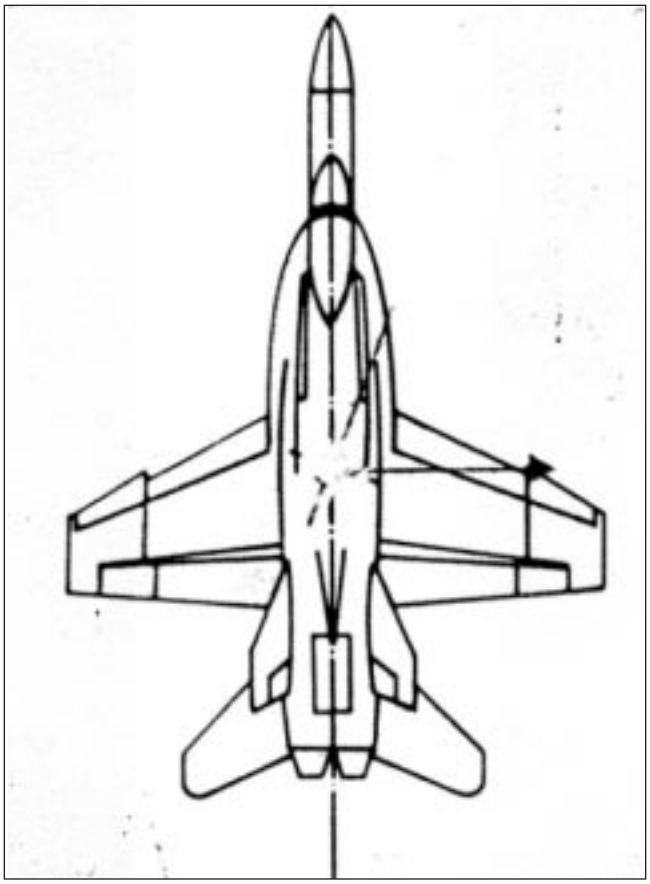


Fig. 9b – Studi per lay-out alare tipo "wings on tail" – Tipo F18 "Hormet".

Fig. 9b – Studies for the wings lay-out ("wings on tail" – Type F18 "Hormet").

Costruzioni civili
• Skin: 2024 T3 clad; leghe 7XXX fresate; 2124 • Longheroni: 7175 T73 7475 T73 7050 T73 7150 T77 • Forme complesse: estese ed a diverso raggio di curvatura: materiali compositi
Costruzioni militari
• Skin: tele monodirezionali in carbonio, sovrapposte (vacuum + pressure curing) • Longheroni: profili quadri o rettangolari in carbonio + altri materiali (a mezzo filament winding e vacuum curing) • Scatole e carter per rinvii e comandi: Leghe Al quaternarie 2a generazione fresate dal pieno

Tabella 4 – Note tecnologiche su leghe quaternarie di 2ª generazione e su compositi ad alto modulo per il periodo 1970 (1980) ÷ 2004.

Table 4 – Technological notes about second generation quaternary alloys and high modulus composites for the period 1970 (1980) ÷ 2004.

4. Le costruzioni spaziali e l'uso delle leghe di Al al massimo dettaglio nei particolari del 1 ° Stadio del Saturno V ("Programma Apollo")

L'altezza della costruzione e la mole del razzo a tre stadi Saturno V (Figura 13) è paragonabile a quella di un grattacielo americano di 30 ÷ 33 piani, tipico degli anni '40. Completo dei tre stadi e dei moduli lunari, tale altezza supera i 110 me-

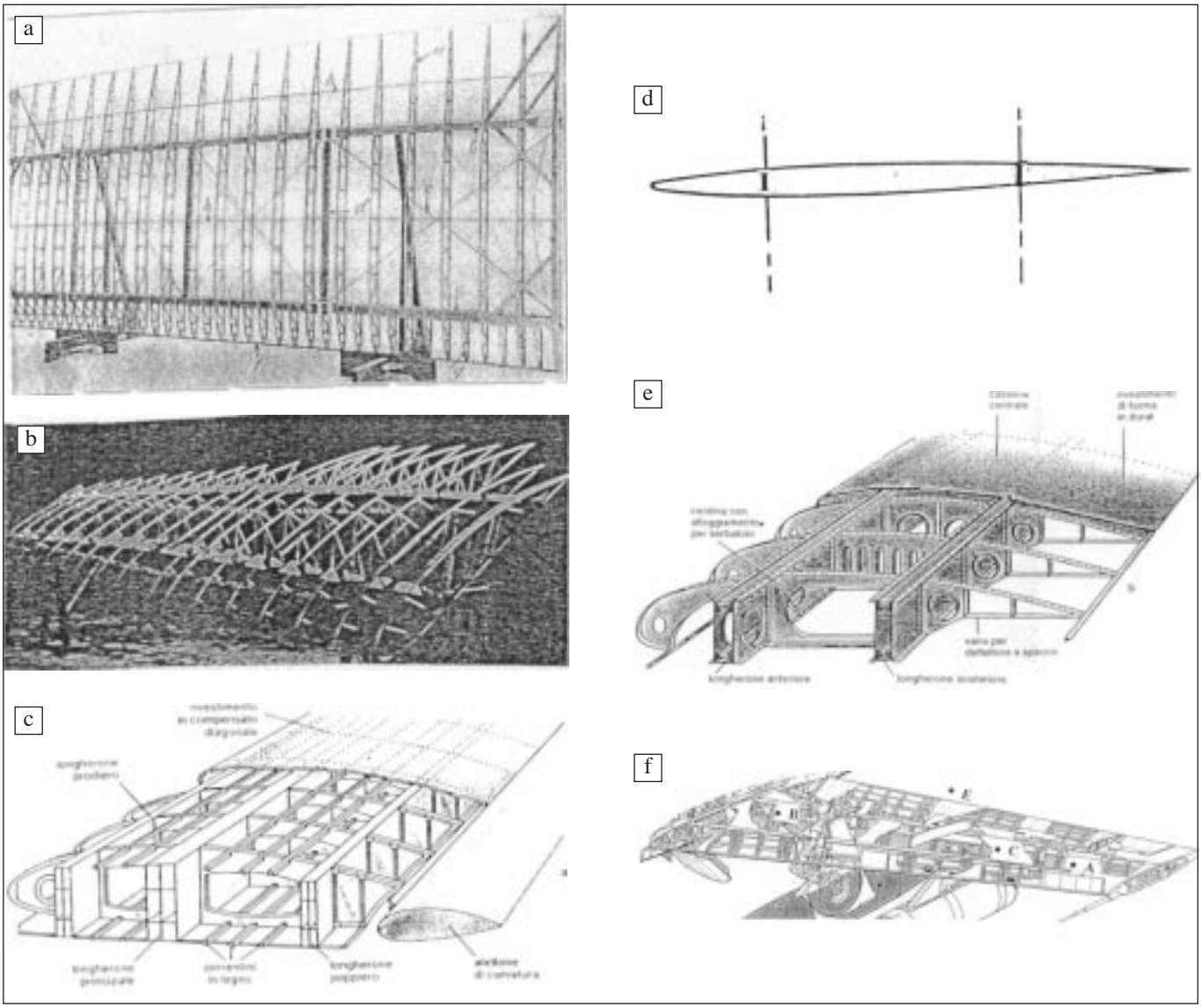


Fig. 10 - Riepilogo di alcuni schemi costruttivi – materiali metallici e non metallici - riferiti alle sezioni dell'ala. Suddivisione in due grandi periodi: schemi (a), (b), (c), (d) e. in parte, (e) per gli anni 1925/1934/1943; schemi (e) e (f) per gli anni 1943÷2004.

(a) Ala biplano tela + metallo con scheletro metallico a tre longheroni (in vista a sinistra) da rivestirsi in tessuto ("textile skin").
Presenza cavi di controventatura. Tele cucite e loro "finiture in opera" (vedi (b)). Vedere anche le Figure 1 e 2;

(b) Ala biplano tela + metallo con ossatura (scheletro) metallico (in vista a sinistra): a due longheroni da rivestirsi in tessuto ("textile skin").
Presenza controventatura.
Tele cucite: lino, seta, cotone. Rivestimento delle tele: emailite;

(c) Ala monoplano integralmente non metallica. Profilo medio-spesso, materiali legno massello intagliato e fogli di compensato.
Longheroni: in legno in numero di tre;

(d) Ala "monoplano" integralmente metallica in leghe Al, per velivolo da record. Profilo molto sottile controventato a metà circa dell'apertura dell'ala. Rigidità flessionale data anche da due leggeri longheroni ad I in lega 2XXX T4 o 2XXX T3.
Lamiera di lega Al 2XXX; confronta Figura 4 (1934);

(e) Ala monoplano integralmente metallica in leghe Al a spessore fra medio e consistente (ovviamente senza controventatura).
Realizzata secondo due varianti:
- "Low performance": skin dural a basso snervamento, longheroni 2014 T6 (prima del 1943)
- "High performance": skin dural ad alto snervamento, longheroni 7075 T6 (dopo il 1943)

(f) Ala monoplano integralmente metallica per velivolo militare. Spessore: medio. Si distinguono:
- A longherone anteriore lega Al
- B longherone posteriore lega Al
- C rivestimento alare (skin) lega Al
- D alettone
- E ipersostentatore
(1950 ÷ 1975).

Fig. 10 – Synthesis of some construction schemes – metallic and non metallic materials – referred to wing section. Division into two main periods: schemes (a), (b), (c), (d) and, partially, (e) for 1925/1934/1943; schemes (e) and (f) for 1943 ÷ 2004.

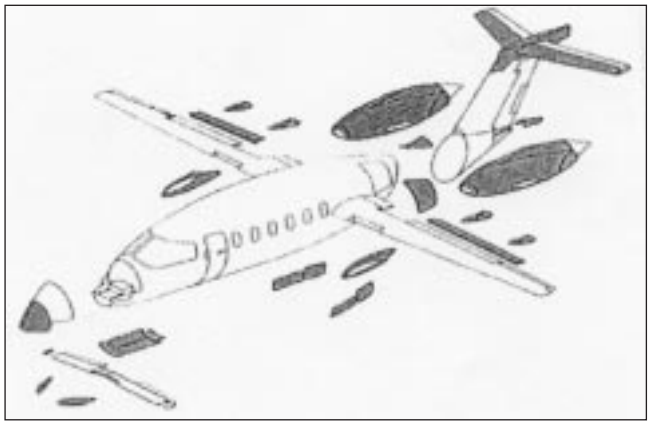


Fig. 11 – Presenza dei materiali compositi a fibra di carbonio nel P.180 "Avanti" (impennaggi orizzontali, gondole-motori, radome, ecc.).

Fig. 11 – Presence of carbon fibre composites in P.180 "Avanti

Fig. 12 – Configurazione standard ed evidenza delle "three lifting surfaces" del P.180 "Avanti".

Fig. 12 – Standard configuration and evidence of the "three lifting surfaces" of P.180 "Avanti".

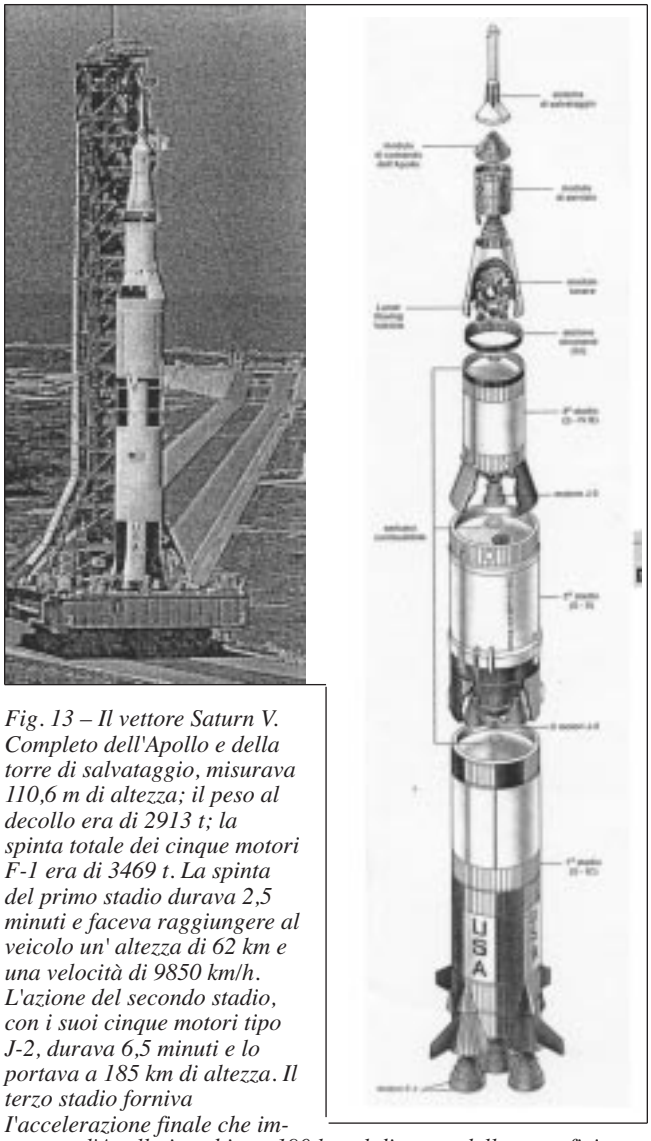


Fig. 13 – Il vettore Saturn V. Completo dell'Apollo e della torre di salvataggio, misurava 110,6 m di altezza; il peso al decollo era di 2913 t; la spinta totale dei cinque motori F-1 era di 3469 t. La spinta del primo stadio durava 2,5 minuti e faceva raggiungere al veicolo un' altezza di 62 km e una velocità di 9850 km/h. L'azione del secondo stadio, con i suoi cinque motori tipo J-2, durava 6,5 minuti e lo portava a 185 km di altezza. Il terzo stadio forniva I'accelerazione finale che immetteva l'Apollo in orbita a 190 km al di sopra della superficie terrestre. Dopo un certo tempo il terzo stadio veniva riacceso per inserire il veicolo nella traiettoria translunare.

Fig. 13 – The Saturn V. Including the Apollo module and the safety tower, the height was of 110,6 m; the weight at take off was 2913 t; the overall force of the five F-1 engines was 3469 t. The action of the first stage had a duration of 2,5 min; the final height and speed reached were, respectively, 62 km and 9850 km/h. The action of the second stage, with five J-2 engines, had a duration of 6,5 min; the final height reached was 185 km. The third stage supplied the final acceleration, making Apollo orbitating at 190 km over the hearth surface. After a certain period of time, the third stage was re-activated, to put the Apollo into the lunar trajectory.

tri dal suolo. Anche il peso - quando i tre stadi sono a pieno carico - è confrontabile con quello di un grattacielo o di una piccola nave. Questa eccezionale costruzione e questi pesi del tutto fuori dell' ordinario per i primi minuti di volo agiscono come azione di ingente schiacciamento e come sollecitazioni dinamiche sulle strutture in lega di Al esterne al 1° Stadio; (massimamente gli skirts – Figura 14 - ed i sidewalls – Figure 14 e 15)

Questo Stadio - a sua volta - è motorizzato dai 5 giganteschi motori F 1, disposti a grappolo (cluster) alla base. Maggiori dettagli vengono dati in didascalia Figura 13.

Quando Neil Armstrong – a conclusione dell'ennesimo volo del Saturno V – il 21 luglio 1969 toccò il suolo lunare compì probabilmente una delle più grandi imprese di tutti i tempi e certamente del XX secolo (Figura 16).

A distanza di 5-10 anni sia l'Alcoa, sia la Boeing, in conseguenza del cambio di scelte strategiche della NASA iniziarono a divulgare ed illustrare disegni e particolari tecnologici del gigantesco missile.

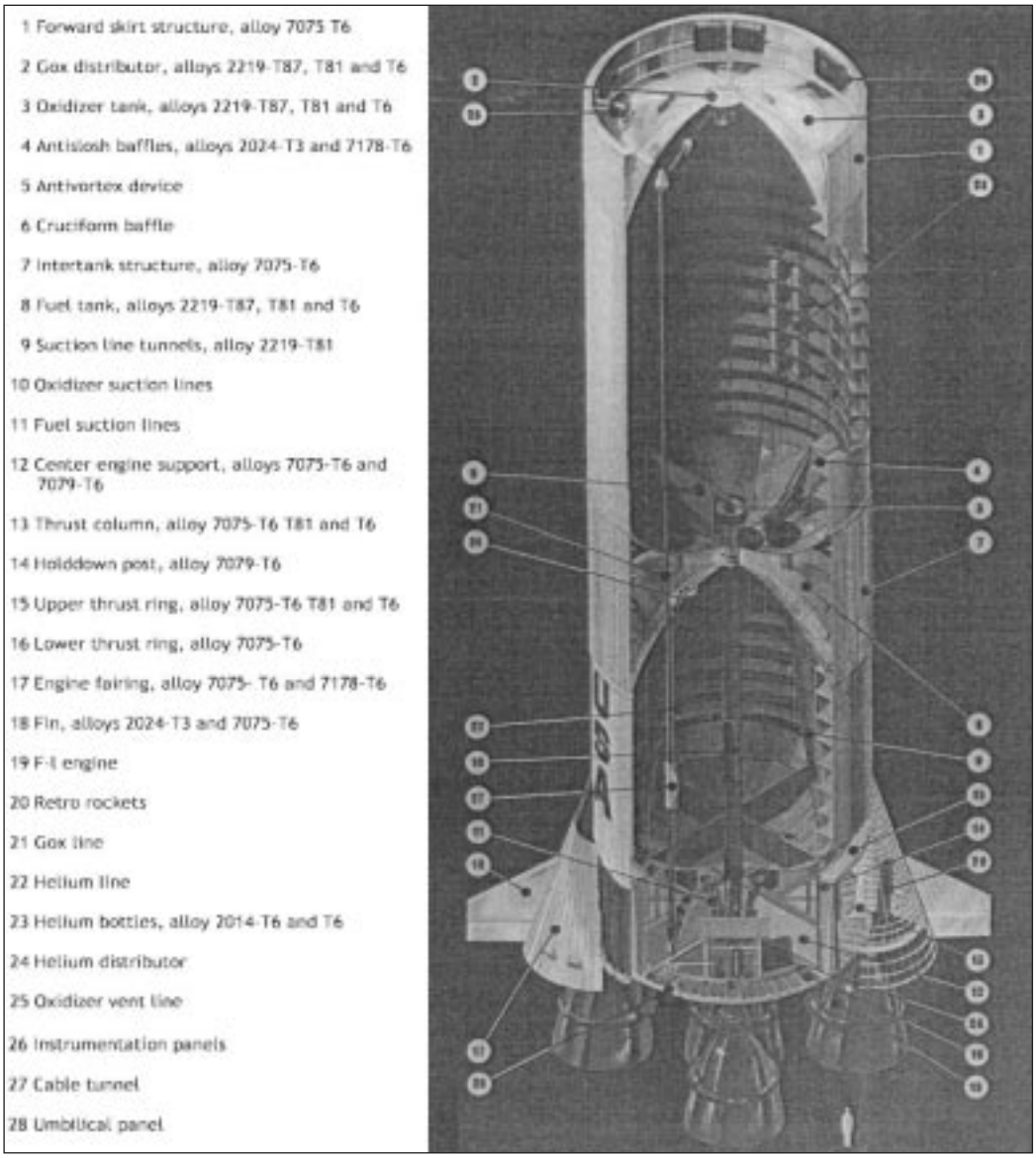
Alla luce di quanto noto oggi, cinque o sei furono i "cornerstones" alla base del funzionamento ottimale del Saturno V e del suo 1° Stadio; in particolare:

- l'alternanza oculata (geniale) dei settori rispettivamente in lega saldabile (2219-T37) ed in lega non saldabile (7075-T6): si vedano, per quast'ultimo materiale, le fasce cilindriche "corrugate" salendo dal basso in alto, lungo il 1° Stadio (Figura 13)
- la limitazione temporale in conseguenza della durata del 1° Stadio;
- la scelta di leghe di alluminio ad alta resistenza ben note e provate (si vedano le Figure 14 e 15),
- l'esclusione delle leghe di alluminio più spinte, quali 7001-T6 e 7178-T9E4,
- l'uso senza remore dello stato T6, data l'assoluta mancanza di umidità nelle condizioni "in-service",
- la piccola "cross-section" della capsula Apollo minimizzante i problemi termici al rientro in atmosfera.

Si veda anche la nota conclusiva, in Figura 17, per un con-

Fig. 14 – Dettaglio primo stadio del Saturno V.

Fig. 14 – Detail of the first stage of Saturn V.



fronto col sistema attuale dei traghetti spaziali nordamericani (1980-2003).
Nella Tabella 5 sono riassunti alcuni dei principali parametri di funzionamento del 1° Stadio in leghe di alluminio (generalmente trattasi - in tutti i casi - di leghe ternarie oppure di leghe quaternarie della prima generazione, vedere dettagli in Figura 14).

Note conclusive

Il nuovo sistema "space shuttle" + booster a combustibile solido (lanciatori: vedere a fianco dello space shuttle) azzera di fatto tutte le esperienze della strategia precedente e vincente: si veda la Figura 16.
Nessuno dei cornerstones - relativi a durabilità + affidabilità della struttura – viene mantenuto.
In particolare non viene mantenuta la scelta della "cross section" minima, capace di minimizzare i problemi di surriscaldo al rientro (confronta punto f nel riquadro). Lo "space shuttle" è a terra dall' inizio del 2003!

Peso al decollo	Ca 3.000 t
Spinta al decollo	Ca 3.500 t
Velocità raggiunta alla fine del 1° Stadio	Ca 10.000 km/h
Quota raggiunta	Ca 60.000 m
Traiettoria	Ca 62 km

Tabella 5 – Prestazioni del primo stadio del Saturno V.

Table 5 – Performance for first stage of Saturn V.

5. (1999 ÷ 2003)
Le leghe di alluminio avio e la "seconda aeronautica": la costruzione degli stampi per plastica.

"...stando seduti nelle poltroncine dell'equipaggio della capsula Apollo durante le prime fasi del decollo del Saturno V le impressioni sono fortissime: è come stare su di un aereo passeggeri che attraversa una tempesta od un tornado mentre una mano gigantesca (l'accelerazione) vi tiene violentemente schiacciati contro lo schienale. ..)"
Questo è il reportage diretto di un pilota militare per anni parte dell'equipaggio delle missioni Apollo!
E con questa descrizione dà un'immagine abbastanza completa dell'entità, della varietà, della violenza delle sollecitazioni a cui - durante il decollo del Saturno V - erano sottoposte le strutture portanti in leghe di Al del 1° Stadio (massimamente gli skirts in leghe 7XXX).
I primi stampatori di materie plastiche che cinque anni fa si facevano spiegare con un po' di incredulità che le leghe ternarie e le quaternarie di alluminio erano possibili candidate per la costruzione di stampi per iniezione, sarebbero stati

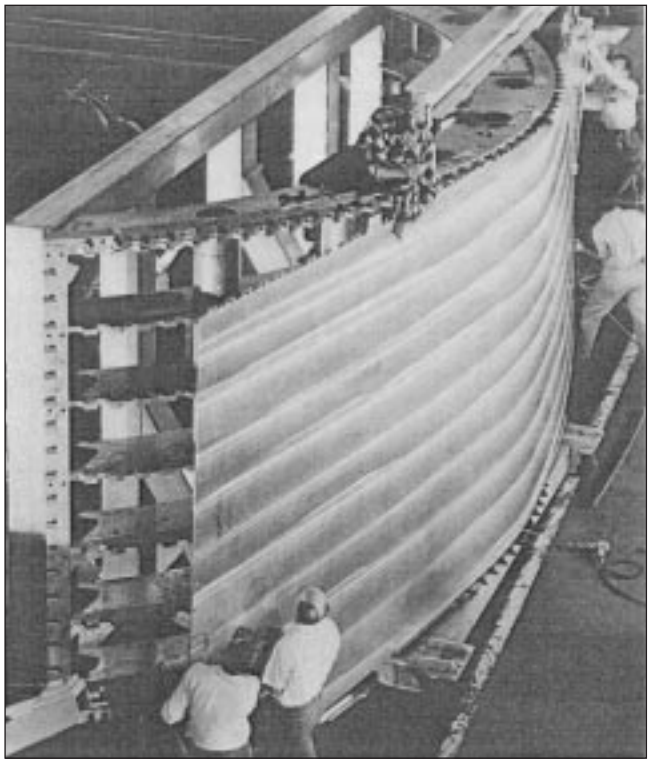


Fig. 15 – La complessa tecnologia della formatura-invecchiamento (age forming) nel caso dei settori prelavorati di macchina per i "sidewalls" laterali del 1° Stadio del Saturno V (lega ternaria 2219 T 37) - Confronta figura 14.

Fig. 15 – The complex age forming technology for pre-wrought sectors for the "sidewalls" of Saturn V first stage (ternary alloy 2219 T 37) – See also Figure 14.

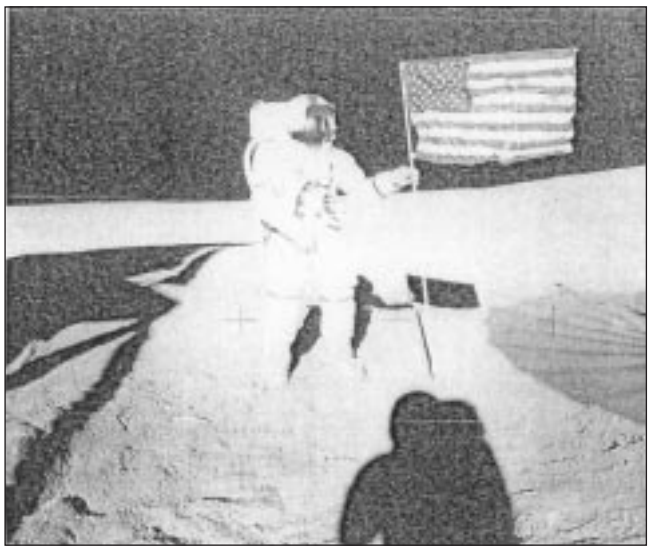


Fig. 16 – La foto storica del luglio 69 subito dopo la discesa sul suolo lunare dell'equipaggio della missione Saturno V + Apollo 11. Conclusione del primo volo con un vero e proprio "docking lunare".

Fig. 16 – The famous photo of July1969, just after the landing of Saturn V + Apollo 11 mission on the moon. Conclusion of the first flight with a "moon docking".

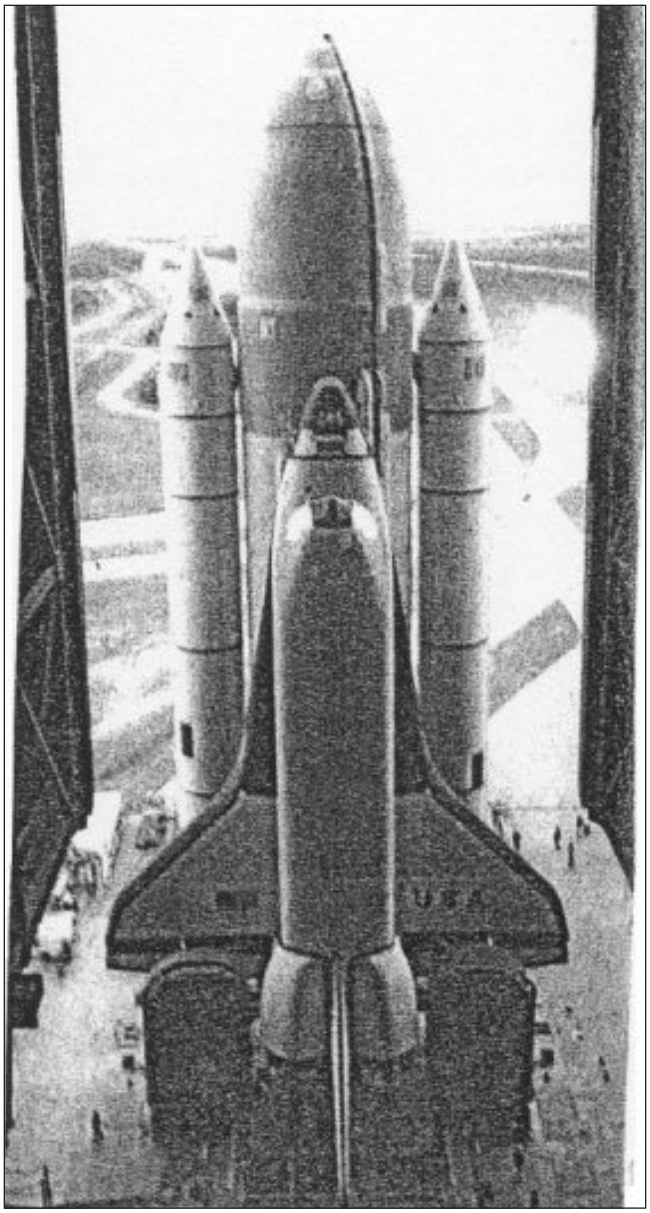


Fig. 17 – (1980 - inizio 2003!). Capovolgimento completo della precedente strategia sui "vehicle" spaziali da parte della NASA.

Fig. 17 – (1980 - early 2003!) - Complete change of the previous strategy about space "vehicle" by NASA.

meno increduli se avessero conosciuto il reportage di cui sopra e la struttura del 1° Stadio, con le relative leghe (7XXX e 2XXX) del Saturno V.

Nella Figura 18 sono riportati in sintesi vari esempi di stampi per iniezione in lega quaternaria, ternaria ed anche binaria, costruiti a tutt'oggi (2004). In Figura 19 è riportato uno stampo per plastica in lega binaria (Al-Mg) !

Tutti gli esempi precedenti sono stati ripresi dalla memoria presentata al convegno di Oyonnax (43ème Journèe Technique du Cercles d'Etudes des Mètaux, 2003); la memoria era intitolata "Les raisons du succes du moule Aluminium en Italie et en Allemagne" (V. Wagner, P.Baldini, G&F Tagliabue, C.Zironi).

Successivamente al meeting di Oyonnax, la tecnologia degli stampi in leghe Al tipo avio ha superato un altro traguardo importante (Figura 20). Si tratta della costruzione - in Italia - di uno stampo in una nuova lega 7XXX (per imbutire lamiere sottili di acciaio e di alluminio). Tale stampo sia per le nuove leghe 7XXX impiegate, sia per il suo utilizzo costituisce una novità di livello mondiale. In questa tecnologia l'Italia è leader in Europa.

Fig. 18 – Stampi in lega di alluminio per l'iniezione di materie plastiche: produzioni tipiche e "Case histories" relative a leghe di alluminio binarie, ternarie e quaternarie.

Fig. 18 – Aluminium alloy dies for the injection of plastics: typical productions and "Case histories" concerning binary, ternary and quaternary Aluminium alloys.

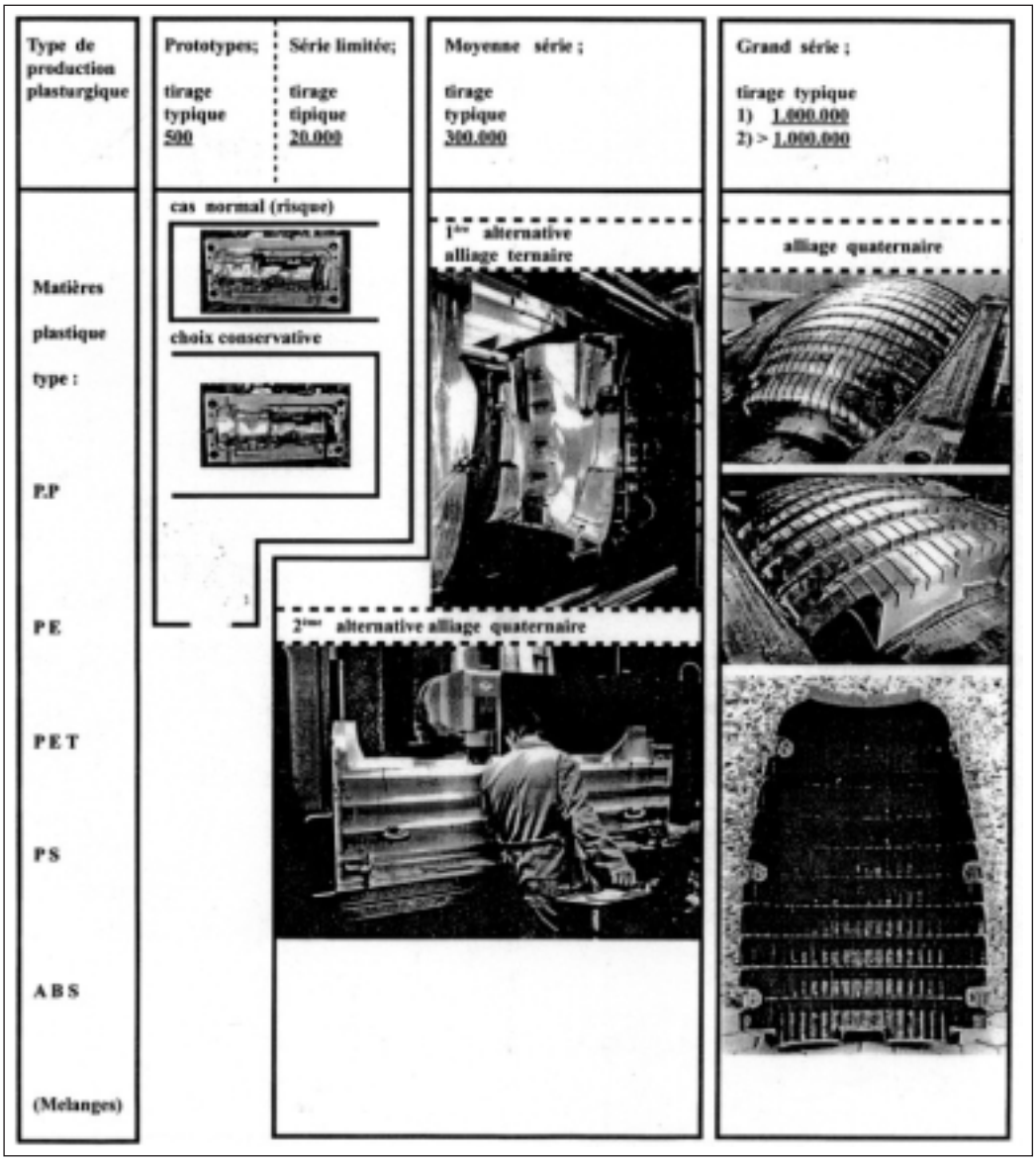
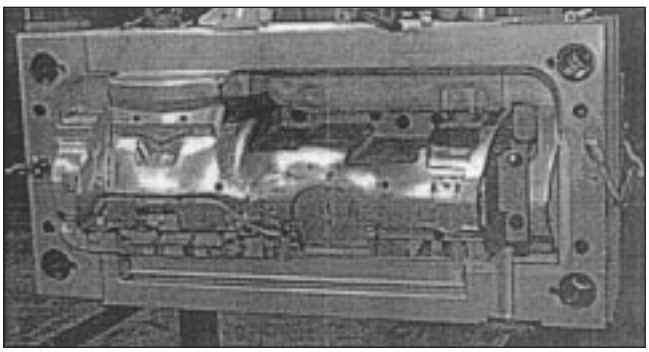


Fig. 19 – Dettaglio della seconda colonna di Figura 18.

Fig. 19 – Detail of the second column of Figure 18.



CONCLUSIONI

Un esame complessivo degli impieghi più recenti delle leghe di alluminio altoresistenziali mette in evidenza sviluppi sempre più positivi dopo il "bottle-neck" degli anni '60-'70 (si veda a questo riguardo la Figura 21).

In particolare, possono essere messi in risalto alcuni risultati "outstanding" delle leghe di alluminio ad alta resistenza (2XXX, 7XXX di prima e di seconda generazione). Alcuni di questi possono certamente essere definiti come vittorie tecnologiche italiane:

a) l'ottenimento del record mondiale di velocità col MC72;
b) la competitività "sul campo" del MC 205 contro velivoli considerati veri e propri "vertici" (K109, Spitfire);
c) il ruolo assolutamente determinante delle leghe 2XXX e 7XXX nelle costruzioni avio civili e militari fino al Saturno V (e fino allo splitting civile/ militare indicato in Figure 2.5);
d) l'eccezionale versatilità nei riguardi del design di ambedue le famiglie;
e) l'impiego estesissimo nelle costruzioni aerospaziali (sia per i vettori / missili; sia per i satelliti);
f) l'ottima compatibilità (ed in certi casi la competitività ...) nei riguardi di materiali molto più costosi, quali i compositi ad alto modulo e matrice plastica;
g) il ruolo insostituibile nell'approssimarsi della rivoluzione energetica (velivoli che sono veri e propri benchmarking);
h) l'adeguatezza complessiva (prestazioni e lavorabilità) anche nell'approntamento di costruzioni giganti: Saturno V, ma anche Airbus 380) .
i) la flessibilità tecnologica: le capacità di adeguamento ai nuovi problemi man mano che si presentano;
j) la sostituzione dell'acciaio negli stampi per la lavorazione della plastica (iniezione);
k) recentissimamente: la sostituzione dell'acciaio per gli stampi per la lavorazione a freddo di lamiere di acciaio sottili.

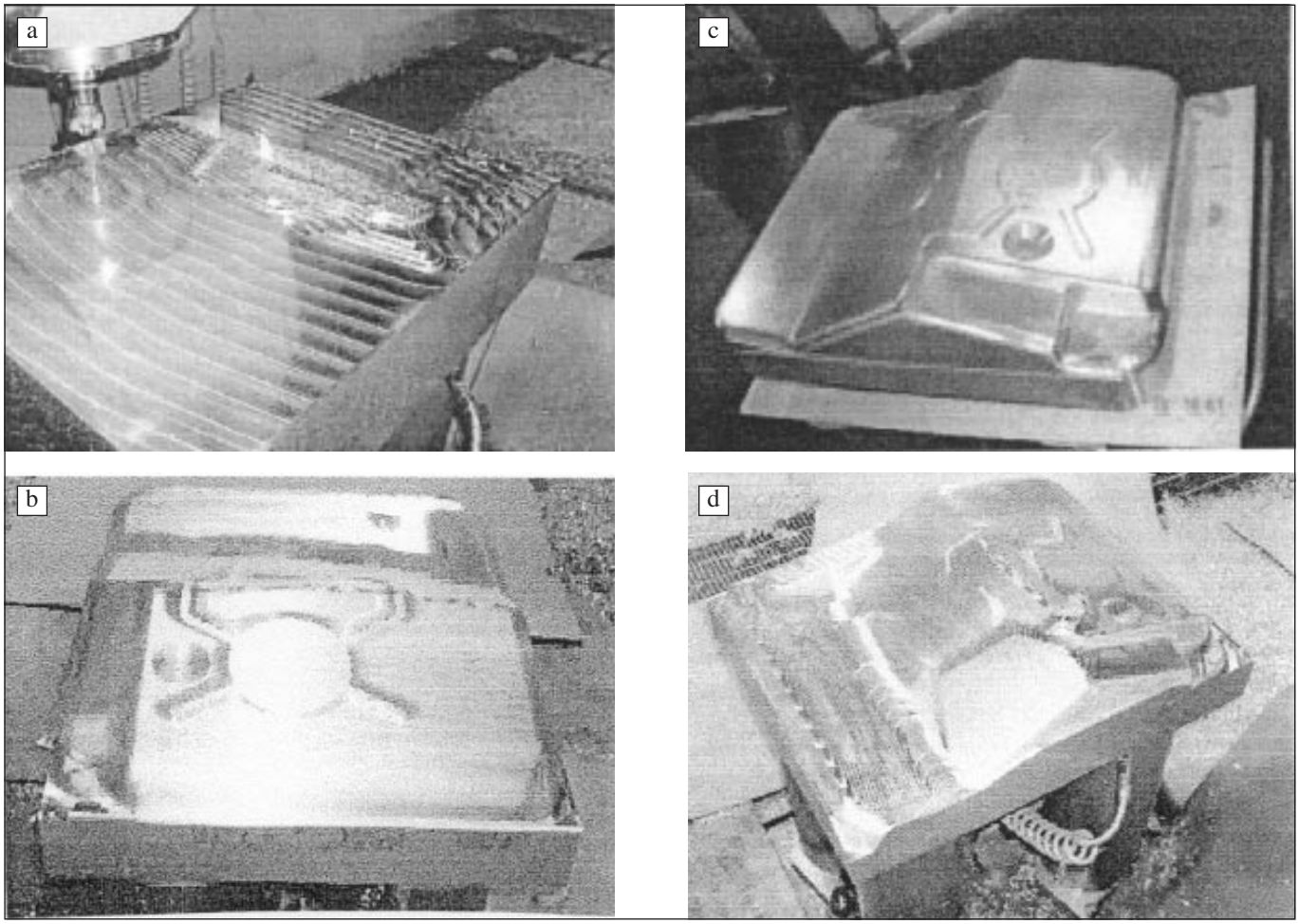


Fig. 20 – Lavorazioni di fresatura veloce e risultati sul finito – per uno stampo (punzone) che costituisce una novità mondiale: nuovo materiale / lega 7XXX Alcast - Alcan ed utilizzo oustanding: imbutitura di lamiera sottile di acciaio (1 m/m);
a) esecuzione dei "terrazzamenti" sul blocco di Alcast grezzo (presso Alcan Distribuzione - Treviglio)
b) c) d) stampo (punzone) finito visto lungo l'asse maggiore della figura ed in altre due posizioni.
Progettista dello stampo: S.T.A. Bologna
Impiego dello stampo: fanaleria auto di piccola serie.

Fig. 20 – High speed machining and results on the final shape for a die (punch) constituting a worldwide new: new material / alloy 7XXX Alcast - Alcan and outstanding use: deep drawing of thin steel foils (1 mm);
a) execution of the preliminary operation of the Alcast block (at Alcan Distribuzione - Treviglio)
b) c) d)various views of the final die (punch).
Die designed by S.T.A. Bologna
Application of the die: components for car lights, small lots.

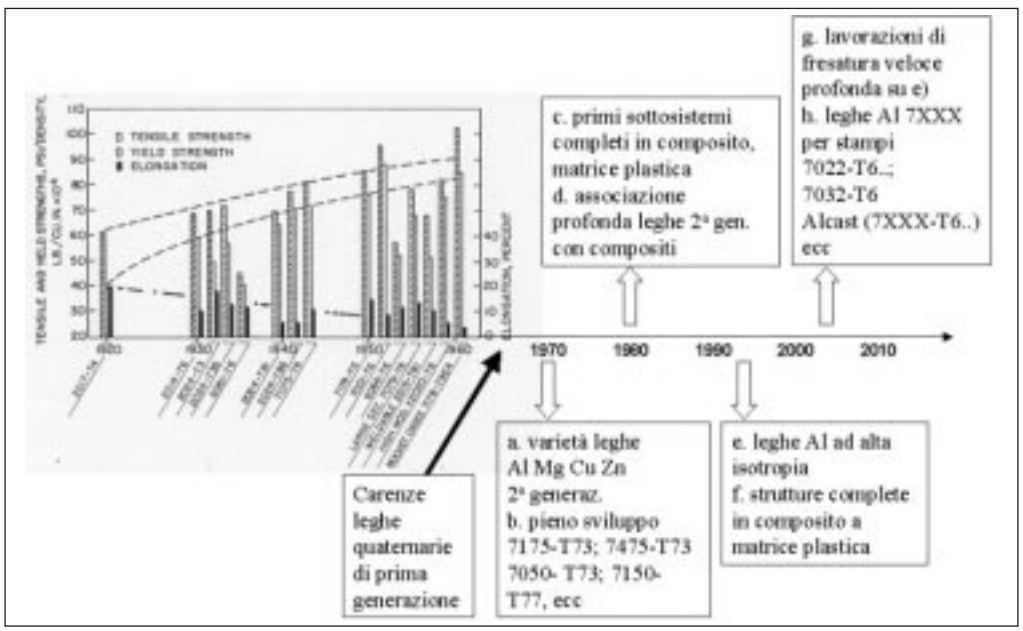


Fig. 21 – Sintesi dell'evoluzione delle caratteristiche e degli impieghi delle leghe di alluminio altoresistenziali.

Fig. 21 – Summary of the evolution of characteristics and uses of high strength Aluminium alloys.

ABSTRACT

EVOLUTION OF ALUMINIUM ALLOYS FOR AERONAUTICS AFTER THE TWO WORLD WARS

Keywords:
aluminium ad its alloys, materials evaluation, properties, review

This paper presents the evolution in characteristics and in applications of high strength Aluminium alloys for aeronautics and aerospace. Such an evolution will be described, after a short introduction, on the basis of the following path:

1. *1925; 1934; 1943. From the pre-Aluminium age in Europa to the top Italian constructions (prototypes of the M C 72 kind) and to the most significant military series constructions: M C 205 "Veltro", in the 1939 - 1942/43 period.*
2. *1943 ÷ 2004. The versatility of the Aluminium alloys after the Second World War (with detailed examples concerning the wings system). The division between the alloys of the first and second generation (mono- and di-isothermal treatments); first constructions using polymeric matrix composites.*
3. *1986 ÷ 2004. The strategic alliance between Aluminium alloys and non-metallic matrix composites. The new-concept aeroplanes and the energy crisis.(Piaggio P180 – "Avanti")*
4. *The aerospace constructions and the maximum use of Al alloys for the parts of Saturn Five first Stage ("Apollo Program")*
5. *(1999 ÷ 2003) The Aluminium aeronautics alloys and the "second aeronautics": the dies for injection moulding of plastics.*

The conclusions summarise some of the outstanding results for high strength Al alloys, highlighting the Italian technological victories.