

Capitolo XXXI
Perizia metallografica-frattografica Firrao ed altri - 30.07.94.

Apparendo necessarie cognizioni particolari in materia di metallografia e frattografia, per la soluzione di tutta una serie di questioni,

che si ponevano nell'inchiesta ed anche in particolar modo nella perizia tecnico-scientifica, e non essendovi in quel collegio alcuno in possesso specialistico di dette cognizioni, questo ufficio in data 29 novembre 91, ordinava procedersi a specifica perizia nominando i professori Donato Firrao e Roberto Roberti.

Ai periti venivano posti i seguenti quesiti: "Accertino i periti, esaminati gli atti e documenti processuali, analizzati i reperti acquisiti e che si acquisiranno, e compiuta ogni necessaria operazione peritale, quale è la morfologia ed il tipo delle fratture riscontrabili su parti dell'aeromobile recuperate, operando con osservazioni visive, macrografiche e micrografiche, e con ogni altra metodologia da essi ritenuta idonea, anche al fine di: 1° - contribuire ad una possibile ricostruzione dello stato di sollecitazione che ha causato dette fratture e le deformazioni rilevabili sulle varie parti; 2° - offrire ulteriori elementi utili per la formulazione delle risposte ai quesiti specifici elencati da 2.9 a 2.12 nel processo verbale di perizia affidata da questo Ufficio al collegio tecnico il 25.09.90." (v. verbale di incarico peritale del 07.12.91).

In unione a detto collegio peritale, l'Ufficio in data 20 dicembre successivo nominava il prof. Sergio Reale, al quale il 30 seguente venivano posti gli stessi quesiti già oggetto del precedente incarico (v. verbale di incarico peritale, 30.12.91).

Il collegio in data 30.07.94, così concludeva: "Nel corso dell'espletamento del mandato il collegio ha esaminato la documentazione degli atti di causa. Dopo una loro generale ricognizione, ne ha rilevato le parti di interesse, ai fini della risposta ai quesiti specifici proposti.

Dall'esame di tale documentazione si è evinto che le analisi metallografiche e frattografiche fatte in precedenza, anche a causa del limitato numero di reperti allora disponibili, sono state di limitata entità e di scarsa rilevanza ai fini della risposta ai quesiti specifici proposti, ad eccezione di quelle effettuate sulle schegge di metalli.

Si è quindi proceduto ad un'analisi delle deformazioni e delle fratture di:

1. Attacchi dei motori, ordinate di appoggio degli attacchi, piloni relativi; si è verificata in particolare la correlabilità delle azioni che hanno causato i danneggiamenti analizzati sui motori, distinguendo quelle associabili con un impatto in mare da quelle associabili con un distacco in volo; sulle ordinate 786 ed 860 si sono analizzate le differenti deformazioni sulla parte destra e sulla parte sinistra, probabilmente correlate con le azioni di distacco dei motori.

2. Varie zone identificabili sull'ala sinistra, dall'attacco con la fusoliera alla frattura che ha determinato il distacco del moncone terminale; si è

verificato in particolare che la zona dell'ala sinistra danneggiata si estende a notevole distanza dalla frattura completa del moncone terminale; il resto dell'ala non mostra danneggiamenti degni di nota.

3. Alcune zone sull'ala destra, dove sono stati analizzati, tra gli altri, due fori, di cui uno, in corrispondenza del flap, probabilmente causato da un oggetto a velocità medio-alta.

4. Varie zone della fusoliera con particolare attenzione alla parte superiore della cabina di pilotaggio, la parte anteriore destra, la parte anteriore sinistra, la sezione della fusoliera in corrispondenza delle ali, il tronco di coda. Di tutte si è suggerito un possibile quadro di azioni causa degli stessi danneggiamenti; si è verificato in particolare che in nessuna parte della fusoliera sono presenti zone con morfologia di frattura che siano associabili a tranciatura; si è verificato anche che la zona della fusoliera in corrispondenza delle ali ha subito nella parte superiore un'azione di flessione, con rottura dei terminali della ordinata 642 da entrambe le parti.

5. Numerosi reperti posizionati nella zona toilette; si è verificato in particolare che sui reperti analizzati, AZ498 (pezzo della fusoliera in lega di titanio prospiciente il motore destro), AZ519 (pezzo di ordinata ad esso adiacente), AZ511 (contenitore di fazzoletti), AZ558 (lavello), AZ453 (tubo lavaggio contenitore liquami WC), non sono presenti segni di esposizione ad alta pressione o ad alta temperatura; sui reperti AZ498, AZ519, AZ558 sono state anche svolte numerose ed approfondite analisi metallografiche che hanno escluso deformazioni a livello microcristallino o fenomeni connessi con una ricristallizzazione; sono stati analizzati anche lastre e lavelli di acciaio inossidabile, sottoposti a prova di scoppio a cura del collegio balistico-esplosivistico, ritrovando, invece, tutti i segni microstrutturali sopra menzionati ed anche talvolta, fenomeni di "rolled edges" e "gas washing"; si è anche osservato che la porta della toilette sembra essersi aperta verso l'interno (rep. AZ639, modanatura della porta).

In nessuno dei reperti osservati si è verificata la presenza di rotture iniziate da cricche di fatica.

Sono state effettuate di concerto con il collegio chimico, analisi relative alle schegge denominate 6-4M(i), 6-4M(ii) e 52-1M, accertando la completa dissomiglianza di composizione chimica fra le prime due. Operando confronti con frammenti prelevati in varie parti dell'aeromobile si è appurato che le schegge 6-4M(ii) e 52-1M possono provenire da zone della fusoliera in cui le leghe di alluminio base sono ricoperte da strati di rivestimento protettivo ("cladding").

In tutte le operazioni peritali si è assicurato il massimo di concerto con il collegio tecnico scientifico, il collegio chimico, il collegio balistico-

esplosivistico. I risultati delle analisi svolte sono stati progressivamente comunicati a tutti i collegi in numerose riunioni.”.

Come s'è detto l'esigenza di questa perizia nacque dalla necessità di affiancare al collegio peritale tecnico-scientifico, che ne appariva carente, persone dotate di specializzazione nell'area dei metalli e delle loro fratture, conoscenze indispensabili per la determinazione delle evidenze di rotture nel velivolo e quindi per l'identificazione delle cause dell'evento.

I periti hanno compiuto un lavoro di sommo rilievo, esaminando tutti i reperti di maggiore importanza del velivolo e arrivando a conclusioni chiare e precise, che, anche se non debitamente prese in considerazione del collegio tecnico-scientifico, non sono state contestate da nessuna delle parti e devono essere considerate valide, per le ragioni che si stanno per dire.

In effetti il lavoro è stato imponente e l'elaborato merita una attenta disamina, nella quale è più che opportuno riportare per intero quelle premesse di carattere sistematico, che ausiliano il lettore non provvisto delle necessarie cognizioni tecniche.

Le analisi frattografiche - così specificavano gli autori ad inizio della perizia - erano state condotte con i metodi di microscopia ottica (OM) ed elettronica a scansione (SEM). L'attenzione del collegio si era concentrata su:

1. parte superiore della cabina di pilotaggio;
2. telaio della porta passeggeri in corrispondenza delle ali, con particolare attenzione alla parte superiore dei montanti che apparivano estesamente deformati;
3. sezione dell'aviogetto in corrispondenza delle ali, con esplicito interesse per la parte sinistra dell'aereo;
4. sezione di coda con specifico interesse per le rotture dei correnti di collegamento con la sezione motori.

Inoltre, erano stati prelevati pezzi da:

1. posizioni differenti della parte superiore della fusoliera;
2. estintore con foro;
3. bordo di alettone con foro;
4. bombola di ossigeno.

Erano stati sottoposti ad analisi di laboratorio:

1. lavello del DC9 Itavia (rep.1566) ed, in seguito, lastre di acciaio inossidabile e lavelli sottoposti a prove di scoppio dal collegio balistico-esplosivistico nell'aprile-giugno 93;
2. tubo di acciaio inossidabile (rep.1382) inserito nel compartimento di raccolta liquami del "water" di bordo del DC9;
3. parte della modanatura di ingresso del vano toilette (rep.1493);

4. schegge repertate come 6-4 M(i), 6-4 M(ii) e 52-1 M (secondo la nota denominazione data dal Rarde).

Le operazioni di taglio dei pezzi erano state precedute da una fase preparatoria consistita nell'osservazione visuale dei pezzi di maggiori dimensioni, fotografia da varie angolazioni di tutti i pezzi e microfotografia di alcune porzioni dei pezzi più piccoli. Le operazioni di taglio e sezionatura dei campioni erano avvenute utilizzando un microtomo metallografico a bassa velocità (per evitare riscaldamenti e deformazioni plastiche) o, in casi particolari, seghetto alternativo a mano ed una macchina ad elettroerosione (per lo stesso motivo). Per le osservazioni di metallografia ottica i campioni erano stati inglobati in resina. Per i campioni 6-4 M(ii) e 52-1 M, pervenuti al collegio già inglobati in resina, si era proceduto ad una leggera "lappatura". Per effetto della lunga permanenza in mare, i campioni risultavano ricoperti di strati ossidati costituiti prevalentemente da idrossido di alluminio. Per la loro pulizia, si era proceduto a bagni ed immersioni in glicerina, in acqua, in acido cromico ed acido ortofosforico. Le analisi delle superfici di frattura dei pezzi facenti parte del complesso di attacco dei motori erano state sottoposte ad analisi locali mediante macrofrattografia e microfrattografia effettuata con videomicroscopio, che consentiva analisi non così efficaci come quelle del SEM, ma pur sempre più nettamente dettagliate di quelle possibili con macchine fotografiche, anche se dotate di obiettivo macro. Le operazioni di lappatura (lucidatura delle superfici) dei campioni inglobati in resina era avvenuta utilizzando carte abrasive, polveri di diamante, polveri di ossa ed allumina.

1. A tal punto la premessa, di cui s'è già detto, in cui più che utilmente sono stati specificati criteri usati anche in altri scritti, ma mai in dettaglio spiegati.

a) "I sistemi di riferimento sono adottati con riguardo ad una persona che guardi dalla prua all'interno dell'aereo (fronte=cabina di pilotaggio, retro=coda, basso=carrello, alto=parte superiore della fusoliera), accanto ad un sistema di riferimento ortogonale cartesiano xyz, orientato nella maniera usuale delle costruzioni aeronautiche (origine dell'incrocio fra le ali e la fusoliera, l'asse x col verso positivo verso la cabina di pilotaggio, l'asse y col verso positivo in direzione della punta dell'ala destra, l'asse z col verso positivo verso il basso).

b) La frattura è un processo di creazione di nuove superfici per distacco di due lembi di un manufatto, la cui propagazione si schematizza:

- modo I, propagazione perpendicolare alle tensioni normali principali (modo apertura);

- modo II, propagazione parallela alle tensioni di taglio locali;
- modo III, propagazione perpendicolare alle tensioni di taglio locali.

Se si descrive una frattura dal punto di vista cristallografico, si parla di fratture di scorrimento di taglio o di clivaggio (nei metalli si deve parlare più opportunamente di quasi clivaggio). Se invece si considera la morfologia globale della frattura è usuale definire le fratture duttili o fragili, oppure fibrose o granulari. Se infine interessa l'aspetto geometrico di una frattura, si preferisce distinguere tra fratture intergranulari o transgranulari da un punto di vista microscopico, oppure fra fratture oblique o normali da un punto di vista macroscopico. Comunque tale terminologia non qualifica in maniera univoca un tipo di frattura (es. transgranulari duttili o transgranulari fragili oppure intragranulari fragili o intragranulari duttili). Però, una frattura che si presenta obliqua rispetto al carico è quasi sempre una frattura di tipo duttile, mentre una frattura che si presenta normale rispetto al carico può essere sia duttile che fragile. Nel caso di leghe di alluminio le fratture sono usualmente di tipo duttile. Solo nel caso di infragilimento dei bordi di grano si possono verificare fratture fragili intergranulari. Segni di infragilimento di tale tipo si possono avere in leghe ad alta resistenza per fratture che si verificano con propagazione ad alta velocità. Sempre nelle leghe ad alta resistenza ottenute per la laminazione, è possibile avere, sotto sforzo normale agente in direzione parallela alle superfici esterne, la formazione di fratture secondarie per delaminazione, anch'esse parallele alle superfici.

2. Si passa poi alla analisi della zona dei motori e in tale parte si spiega che i motori sono collegati alla fusoliera mediante travature di attacco separate, generalmente chiamate piloni, posizionate su ciascun lato della fusoliera. Ciascun pilone è collegato alla struttura dell'aereo mediante due coppie di travi. La coppia anteriore, più rigida, comprende angolari, realizzati a sandwich e parzialmente collegati fra loro da lamiera, inseriti in uno scatolato complesso. Quella posteriore è costituita da due semplici bandelle, sempre collegate da lamiera e sempre inserite nello stesso scatolato. Ogni pilone si collega al motore con una forcella anteriore, terminante con due anelli (uno superiore ed uno inferiore) di serraggio dei perni che fuoriescono dalla struttura di carenatura esterna del motore e con un sistema posteriore articolato, molto meno rigido, vincolato al pilone. Anche in questo caso vi è un perno di collegamento col motore, che si inserisce in una sede alloggiata nella porzione di forma cilindrica del sistema. Nelle sedi in cui i perni anteriori si inseriscono negli anelli della forcella è presente materiale speciale con funzione di smorzamento delle vibrazioni.

Segue la descrizione dei motori del velivolo in oggetto.

a) Sia i motori sia i loro sistemi di attacco sono stati quasi interamente recuperati.

b) I due motori mostrano deformazioni e rotture della palettatura apparentemente speculari, distribuite longitudinalmente. Il danneggiamento della palettatura di entrambi i motori non presenta altre tracce di deformazioni macroscopiche generalizzate. Entrambi i motori mostrano una percettibile deformazione dell'asse, maggiore nel caso del motore di destra. Tali deformazioni, pur giacendo su piani all'incirca simmetrici, appaiono con concavità globali differenti.

c1) Collegamento anteriore motore sinistro/pilone.

Ad una vista frontale, si notano deformazioni globali della corona circolare, costituita da due anelli concentrici collegati da razze, con cui si realizza il collegamento tra il motore ed il perno. Le razze presentano rotture e deformazioni, con una accentuata deformazione ad andamento ad S. Si nota la mancanza del collegamento inferiore tra il perno e la forcella per rottura dell'anello terminale. Tale anello terminale è risultato erroneamente localizzato sul motore sinistro, mentre è attribuibile all'attacco superiore della forcella anteriore del motore di destra. La forcella nella quale sono riconoscibili due elementi verticali confluenti all'estremità negli anelli terminali non presenta deformazioni macroscopiche apprezzabili, mentre è possibile individuare due profonde fessurazioni, una per elemento verticale, in corrispondenza della sezione centrale, con direzione di propagazione dal motore verso la fusoliera. Per ogni elemento verticale, tali fessurazioni sono il risultato di due fratture abbastanza simmetriche e inclinate rispetto al bordo esterno degli elementi verticali che, a circa 20mm dalla superficie esterna, sono collassate in un'unica linea di frattura, fino ad interessare la quasi totalità della sezione. Nella relativa frattura a V è presente il materiale isolato dalle superfici di frattura e rimasto in loco anche se completamente distaccato e asportabile facilmente. L'interpretazione delle rotture, fatta anche tenendo presente i risultati delle analisi al videomicroscopio, porta ad ipotizzare che tali fratture siano dovute prevalentemente ad una forza con componente di forte intensità in direzione -z (verso l'alto).

c2) Collegamento anteriore pilone sinistro/fusoliera.

Si rilevano deformazioni con accumuli di materiale della paratia alla base dei rivetti che indicano un movimento relativo attacco-paratia con spostamento degli angolari in direzione -y (verso l'ala sinistra) rispetto alla paratia.

c3) Collegamento posteriore motore sinistro/pilone.

Il perno è rimasto inserito nel cilindro e le rotture si sono verificate invece nelle bandelle di collegamento pilone-fusoliera.

c4) Collegamento posteriore pilone sinistro/fusoliera.

La bandella superiore, per la parte rimasta attaccata al cilindro, si è rotta a trazione con limitati segni di strizione, mentre quella inferiore si è rotta per effetto combinato di trazione e flessione, con momento flettente ad asse parallelo a z (asse basso-alto). Anche la lamiera di collegamento fra le due bandelle mostra deformazioni coerenti con l'azione anzidescritta. Il complesso delle osservazioni porta ad ipotizzare che la rottura, originatasi nella porzione anteriore della giunzione pilone/fusoliera, abbia corso lungo tale giunzione, propagandosi progressivamente in direzione -x (verso la coda) in modo 1 (alto-basso), per poi ramificarsi in direzione -y (verso la sinistra).

c5) Collegamento anteriore motore destro/pilone.

Si rilevano il danneggiamento delle razze fra i due anelli concentrici della corona circolare, una vistosa deformazione globalmente simmetrica della razza ad U in corrispondenza del perno superiore, deformazioni ad S di modesta entità delle razze in corrispondenza del perno inferiore, danneggiamento della corona, la frattura di entrambi gli anelli di serraggio del supporto anteriore a forcella. La frattura dell'anello superiore è iniziata sul bordo esterno in condizioni di taglio e si è propagata lungo linee di scorrimento di taglio sotto l'azione di un momento flettente in direzione e verso -x (verso la coda), probabilmente originata da una azione trasmessa fra perno ed anello. Le prime fasi della rottura globale dell'anello inferiore sembrano corrispondere con la frattura anteriore dell'anello e la frattura del bordo anteriore esterno, sotto una azione prevalentemente x (coda-cabina). L'ultima parte a cedere è stata la parte posteriore del bordo esterno all'anello.

c6) Collegamento pilone destro/fusoliera.

1) Zona anteriore: lo scatolato che costituisce il pilone appare relativamente poco danneggiato con pezzi separati, ma non molto distorti. Nell'angolare superiore le rotture sono intervenute molto vicino alla parte esterna del pilone ed appaiono accompagnate da modesta deformazione plastica. Si presume che esse siano originate in seguito ad una azione di flessione sull'angolare con asse prevalente -z (verso alto). La rottura dell'angolare inferiore, intervenuta vicino alla paratia della fusoliera, è stata causata sostanzialmente dalla stessa azione che ha prodotto la rottura dell'angolare superiore, una flessione con direzione intermedia fra -z e -x (verso alto e verso coda);

2) Zona centrale: i danneggiamenti maggiori sono localizzati posteriormente all'attacco anteriore del motore. La paratia esterna del pilone è strappata sia dal bordo superiore sia dal bordo inferiore del pilone con azione locale verticale nel piano della lamiera. Il bordo della superficie

superiore del pilone presenta la fuoriuscita dei connettori elettrici con piegature verso l'esterno, presumibilmente per l'azione di tiro dei connettori stessi. Le deformazioni del bordo della superficie inferiore del pilone sembrano dovute ad una azione di compressione longitudinale cui sono associabili ondulazioni che hanno causato avvicinamenti ed allontanamenti. In corrispondenza degli allontanamenti la paratia sembra poco deformata, mentre in corrispondenza degli avvicinamenti le deformazioni sono maggiori con bombature verso l'esterno e deformazioni ad S. I danneggiamenti della zona interna del pilone sono caratterizzati da accartocciamenti e bordi ripiegati da successive azioni meccaniche.

In dettaglio i risultati delle analisi metallografiche e frattografiche relativamente ai reperti 1470 (target E121, AZ498), 1487 (target E139, AZ519), 1489 (target E142, AZ499), 1553 (target F10, AZ574), 1529 (target E183, AZ511).

3) Zona posteriore: in questa zona il pilone è globalmente meno danneggiato, con le due bandelle terminali rotte più o meno alla stessa distanza dalla base. Esse sono state dapprima significativamente deformate ad S (deformazione dovuta ad un carico assiale di compressione, che prima della rottura ha portato a deformazioni del tipo di quelle derivanti da carico di punta.) e poi si sono rotte (modo I=apertura) sotto l'azione di flessione con asse -z (verso l'alto).

c7) Collegamento posteriore motore destro/pilone.

Come nel caso del motore di sinistra, il perno è rimasto inserito nella cerniera cilindrica e le rotture si sono verificate nelle bandelle che delimitano la travatura di attacco del motore alla fusoliera.

3. In esito a tale analisi il commento globale.

A) Sul collegamento motore sinistro/fusoliera si precisa che l'analisi ha evidenziato, in corrispondenza della travatura di attacco:

a- una rottura per taglio della razza ad U;

b- rotture dell'anello esterno delle corona circolare, congruenti con azioni di flessione;

c- rotture dell'anello di serraggio inferiore della forcella, congruenti con una azione flettente;

d- distacco dei due angolari di collegamento con la fusoliera, causato da una azione di trazione esercitata dagli angolari sulla paratia cui sono rivettati, prevalentemente con direzione -y (verso l'ala sinistra);

e- rotture incomplete in mezzeria della forcella, che si possono far risalire ad un complesso di azioni;

f- deformazioni ad S delle razze, con deformazioni e rotture congruenti, dovute ad un movimento di traslazione relativa fra motore e forcella;

g- una serie di deformazioni e rotture delle razze e delle palette, congruenti con quelle riscontrate sulla carenatura del motore, sia nella sezione di imbocco che in quella di sbocco sia lungo tutto il motore;

h- rotture prevalentemente da trazione nelle due bandelle di collegamento posteriore fra il pilone e la fusoliera.

Le rotture in a) b) e c)- possono essere viste come congruenti fra loro per l'azione di una unica rotazione relativa fra motore e forcella, di verso coerente con le azioni locali di flessione (verso la fusoliera). Anche le deformazioni delle razze indicate in f) e l'azione di traslazione motore/forcella approssimativamente in direzione z (con movimento del motore dal basso in alto rispetto alla forcella) possono essere considerate congruenti con la rotazione globale. Tale traslazione potrebbe essere correlata con l'azione che ha prodotto lo schiacciamento cui sono conseguiti i danneggiamenti segnalati in g). Risulta più difficile pensare che la stessa rotazione relativa tra motore e forcella abbia potuto anche originare le rotture segnalate in e), poichè i movimenti relativi causati dalla rotazione non sono congruenti con quelli che avrebbero dovuto originare le rotture in mezzeria della forcella.

B) Sul collegamento motore destro/fusoliera, per la travatura di attacco anteriore, l'analisi ha evidenziato:

a- una forte azione di compressione della razza ad U;

b- rotture dell'anello di serraggio superiore della forcella, dovute ad una azione flettente in direzione e verso +x (verso la cabina), probabilmente originata da una azione trasmessa fra perno ed anello;

c- rotture dell'anello di serraggio inferiore della forcella, congruenti, almeno per la porzione anteriore dell'anello, con una azione di traslazione fra motore e forcella giacente prevalentemente in direzione +x (verso la cabina);

d- rottura dei due angolari di collegamento con la fusoliera causata da una azione di flessione ad asse prevalente -z (verso l'alto) per l'angolare superiore e ad asse intermedio fra -z e +x per l'angolare inferiore (verso l'alto e verso la cabina);

e- rotture degli anelli di serraggio della forcella;

f- deformazioni ad S di modesta entità, più accentuate verso il retro, di alcune delle razze, che fanno propendere per l'ipotesi di una leggera compressione radiale;

g- una serie di deformazioni e rotture delle razze e delle palette del motore, che sembrano progressivamente meno accentuate andando dal retro al davanti;

h- rotture a carico del collegamento posteriore fra pilone e fusoliera, dovute prevalentemente ad una azione di compressione in direzione y (ala destra-ala sinistra) della travatura di attacco posteriore.

Le deformazioni e le rotture sub a-/b- sono chiaramente correlabili in una unica azione di spinta dal motore verso la forcella o viceversa con forte componente nel piano yz (ala destra-ala sinistra/basso-alto). Se si correla questa azione di spinta con le rotture e le deformazioni delle razze e delle palette segnalate in g), risultano correlabili in un unico evento anche le deformazioni ad S delle razze, indicate in f). Non sono facilmente correlabili con la stessa azione globale le rotture segnalate in C). Per trovare una giustificazione a queste rotture, bisogna riprendere la considerazione che i danneggiamenti esterni del motore sono progressivamente meno accentuati dal retro verso avanti. Sulla base di questa evenienza, si può introdurre nel quadro globale un'azione dal motore alla forcella o viceversa con una componente importante in direzione x (cabina-coda). Non danno informazioni utili le rotture degli angolari, poichè non si può escludere che esse siano intervenute successivamente al distacco del motore, anch'esse correlate con il danneggiamento evidenziato lungo l'arco dell'interno motore; analogamente potrebbero rientrare nello stesso quadro le rotture per compressione della travatura di attacco posteriore. Per quanto attiene alle informazioni riguardanti l'analisi delle ordinate di attacco anteriore (ordinata 786) e posteriore (ordinata 860), si conclude affermando che:

- la parte sinistra dell'ordinata 786 è stata sottoposta a rotazione con asse -z (verso l'alto);
- la parte destra dell'ordinata 786 è stata sottoposta a flessione con asse -x, cioè verso l'esterno dell'aereo;
- la parte destra dell'ordinata 860 è stata sottoposta ad azione nel suo piano da parte della travatura di attacco posteriore del motore.

Da una parte si può confermare che il distacco del motore sinistro dell'aereo è avvenuto prima in corrispondenza del collegamento anteriore pilone/fusoliera ed è poi proseguito con la rottura progressiva delle lamiere di giunzione pilone/fusoliera fin quasi al collegamento posteriore, le cui bandelle hanno ceduto prevalentemente per trazione. Durante questo movimento l'ordinata 786 ha subito, nella parte sinistra una rotazione ad asse -z (verso l'alto). Dall'altra parte il motore destro si è distaccato in corrispondenza della travatura di attacco anteriore, provocando prima il cedimento del montante interno destro dell'ordinata 786 per flessione verso l'esterno dell'aereo, poi un analogo cedimento per analogo flessione della parte esterna della stessa ordinata ed in seguito una azione sulla travatura di

attacco posteriore che ha provocato la rottura del montante interno destro dell'ordinata 860.

4. La perizia procede poi con l'analisi sui fori dei cowling dei motori, precisando che i cowling sono le cappottature dei motori, costituite da due semigusci (superiore ed inferiore), e accertando che i fori riscontrati sono stati prodotti dalla penetrazione a bassa velocità di oggetti o frammenti estranei al cowling, alcuni dall'esterno verso l'interno ed altri viceversa.

5. Quindi l'analisi delle ali, indicando convenzionalmente come ala sinistra la semiala in direzione -y (verso ala sinistra) e come ala destra la semiala in direzione +y (verso ala destra).

1) Analisi ala sinistra.

L'ala viene divisa in tre zone, la prima dall'attacco alla zona intermedia, la seconda la porzione intermedia e la terza coincidente con il troncone terminale (figg.5.2.1.1 e 5.2.1.2.; il totale della sezione è compresa nelle figg. da 5.2.1.1 a 5.2.1.12 dell'elaborato).

1a) I segni di compressione riscontrabili alla radice dell'ala sul bordo di attacco anteriore, unitamente alla morfologia della superficie di frattura della lamiera dorsale, inducono a ritenere che l'azione globale prevalente che ha causato il distacco dell'ala sia un momento flettente verticale +z (verso il basso); esso ha provocato la rotazione iniziale dell'ala verso la parte anteriore della fusoliera attorno alla radice del bordo di attacco anteriore.

1b) - Zona 1. A parte alcuni segni di imbozzamento del bordo di attacco anteriore in vicinanza della radice dell'ala, molto probabilmente correlabili con la rotazione globale di cui al paragrafo precedente, non vi sono apprezzabili deformazioni della struttura esterna anteriore dell'ala. Alcuni danneggiamenti localizzati sono visibili nella parte posteriore, in corrispondenza degli alettoni. Un vistoso danneggiamento con accartocciamento e ripiegamenti delle lamiere è inoltre visibile sul primo alettone, vicino alla radice dell'ala. Assenza di deformazioni apprezzabili della struttura interna.

- Zona 2. La lamiera dorsale è interessata da varie importanti fratture. Vi sono inoltre altre due importanti rotture longitudinali che hanno portato alla separazione completa di un pezzo di lamiera dorsale. I danneggiamenti sono iniziati a partire dalla centina che idealmente separa la zona 1 dalla zona 2. I correnti lungo la lamiera ventrale mostrano deformazioni associabili con carichi di compressione assiale. Tali deformazioni della parte inferiore dell'ala e la mancanza di analoghe deformazioni nella lamiera dorsale, portano ad ipotizzare una azione di flessione verso il basso

con asse -x (verso la coda). Vi è una frattura trasversale di modo I (apertura) che appare originata dal bordo dell'attacco, sul davanti dell'ala, e propagatasi verso il retro. L'osservazione del bordo di attacco, in corrispondenza dell'inizio della frattura, fa rilevare la presenza di forti danneggiamenti localizzati con rottura del bordo di attacco e ripiegamenti della lamiera che lo costituisce sulla centina dell'ala localizzata in tale posizione. Sia il bordo di attacco che il longherone posizionato subito dietro il bordo di attacco dell'ala risultano rotti a partire dall'inizio della frattura trasversale sopradescritta. I lembi estremi della porzione di longherone rotto, rimasti solidali con il resto della struttura, sia a destra che a sinistra, sono ripiegati verso l'interno dell'ala. Inoltre, il bordo di attacco dell'ala sulla sinistra risulta mancante ed i pezzi separati dal bordo fanno che anche il bordo di attacco sulla sinistra risulti ripiegato verso l'interno, con piegatura fortemente localizzata. Tutte le ripiegature sopradette corrispondono a rotazioni intorno ad un asse z (basso-alto), orarie per quelle sulla destra, antiorarie per quelle sulla sinistra. Il bordo superiore della frattura del bordo di attacco verso la zona 3, in corrispondenza del quale il longherone è rimasto solidale con la struttura, ha i margini ripiegati verso il basso; questa frattura è probabilmente intervenuta per una flessione locale ad asse -y (verso ala sinistra). I due pezzi di longherone ritrovati appaiono piegati verso l'interno per una flessione ad asse y (verso ala sinistra-ala destra) e le alette di irrigidimento del longherone risultano con rotture di modo I (apertura), probabilmente conseguenti alla flessione ad asse y. Tutte le fratture, sia quelle a sviluppo in direzione y (orizzontali), sia quelle in direzione z (basso-alto verticali), sono risultate prevalentemente di modo I, con direzione di propagazione della frattura parallela alle superfici laterali. Il modo e la direzione di propagazione osservati fanno propendere verso una correlazione fra queste fratture e la flessione globale dell'ala a asse -x (verso la coda), che ha interessato l'intera zona 2. L'impronta di lieve urto ed i ripiegamenti verso l'interno dei lembi del longherone sono attribuibili verosimilmente ad eventi diversi. Anche le fratture del longherone vicino al bordo posteriore dell'ala sono correlabili con l'azione globale di flessione dell'ala.

- Zona 3. Il 2° troncone appare molto poco danneggiato, al di fuori della rottura che costituisce la separazione con la 2^a zona. La rottura ha interessato sia le lamiere di copertura dorsale e ventrale, sia i correnti alle quali queste si appoggiano, sia i longheroni adiacenti ai bordi di attacco e di uscita. Le modalità di rottura dei due longheroni sono totalmente analoghe ed appaiono determinate da una trazione, per le parti superiori dei longheroni, e da una compressione per le parti verso il basso. Tali modalità di rottura, anche per quanto riguarda i correnti, portano ad ipotizzare

un'azione flettente ad asse -x (verso la coda). Alcune deformazioni in corrispondenza dei longheroni adiacenti ai bordi anteriore e posteriore portano ad immaginare che la rottura, iniziata per flessione ad asse -x, sia terminata con una deviazione verso l'asse z (basso-alto).

5.1c) Conclusioni.

Le analisi condotte portano ad isolare due azioni principali:

- azione flettente ad asse z (alto-basso) alla radice dell'ala che ne ha causato il distacco dalla fusoliera;
- un'azione flettente ad asse -x (cabina-coda) che ha causato estesi danneggiamenti in corrispondenza dell'intera zona 2.

Le due azioni non sono collegate tra loro e, se si vuole dare una successione temporale, la seconda può essere considerata antecedente alla prima.

5.2) Analisi ala destra.

La frammentazione dell'ala è tale da non poter isolare zone sulle quali porre una attenzione specifica. Sulla lamiera ventrale nella zona più vicina alla radice dell'ala si può notare un danneggiamento continuo e definito come se l'ala fosse sottoposta ad una azione di compressione. Lo schiacciamento delle lamiere, localizzato nella zona vicina alla punta dell'ala, è attribuibile ad un impatto contro una superficie. Sulla lamiera dorsale e su un flap sono stati individuati due fori, presumibilmente causati da oggetti provenienti dall'esterno. Il foro sul flap ha una superficie di frattura prevalentemente normale alla superficie esterna, molto liscia, probabilmente dovuta a tensione tangenziale (modo III): si può ipotizzare l'azione di un oggetto a velocità medio-alta. Si può concludere che l'ala destra ha subito un diffuso danneggiamento probabilmente in conseguenza di un impatto che ha interessato l'intera ala.

6. Si passa quindi all'analisi della fusoliera e immediatamente risulta macroscopica la differenza fra la frammentazione e lo stato di deformazione dei reperti della parte destra e della parte sinistra.

6a) Analisi della parte destra.

Fino all'attacco dell'ala si presenta con estesa frammentazione, sostanzialmente irregolare; non si evidenziano linee macroscopicamente comuni di frattura, nè si possono individuare zone caratterizzate da modalità e linee di frattura che le rendano diverse e peculiari rispetto al resto della fusoliera. I vari reperti si presentano con bordi ripiegati ed accartocciati, lasciando ipotizzare successive e diverse azioni meccaniche. In generale, il grado di frammentazione tende a decrescere passando dal

davanti al retro dell'aeromobile. Sulla porzione anteriore destra della fusoliera, sono state esaminate in maggiore dettaglio due zone posizionate rispettivamente sotto e leggermente in avanti rispetto alla lettera A finale della scritta Itavia (la prima) e attorno alla lettera I della medesima scritta (la seconda). Per tali zone, l'analisi effettuata ha messo in evidenza che le fratture e le deformazioni sono analoghe a quelle delle zone circostanti e non presentano segni riconducibili ad effetti di tranciatura.

6b) Analisi della cabina di pilotaggio.

Si presenta, in analogia con il lato destro anteriore della fusoliera, ad elevato ed irregolare grado di frammentazione. Le deformazioni delle cornici dei finestrini consentono di ipotizzare in quest'area la prevalenza di azioni dall'esterno verso l'interno.

6c) Analisi della parte superiore della fusoliera.

Sui reperti non si sono potute effettuare analisi microfrattografiche perchè la lamiera di copertura risultava costituita da un lega di alluminio della serie 2000, sulla quale non si è riusciti a sperimentare un'efficace procedura di pulizia delle superfici di frattura. L'analisi visiva ha permesso di evidenziare che la deformazione dominante di vari pezzi della lamiera è stata da accartocciamento in quattro strati di materiale, con la lamiera piegata quasi a blocco: la deformazione è derivata da una forte compressione.

6d) Analisi della parte sinistra della fusoliera.

I reperti risultano caratterizzati da maggiori dimensioni o minore grado di deformazione rispetto agli analoghi reperti della parete destra. In generale, il grado di deformazione e di frammentazione tende a decrescere passando dal davanti al retro. Macroscopicamente è possibile riconoscere un andamento comune delle deformazioni, coerente con una generica e globale azione di compressione approssimativamente nella direzione longitudinale della fusoliera, cui si sono sovrapposte azioni locali di vario genere. La differente frammentazione fra i due lati della fusoliera potrebbe trovare una spiegazione nella osservazione delle morfologie di frattura e deformazione delle due zone. In esse si osserva che, laddove si è avuta una inflessione, con conseguente frattura dei correnti verso l'esterno, la lamiera della fusoliera presenta una serie di fratture che si dipartono a raggiera da tali punti. Sul lato sinistro, per effetto di una minore deformazione globale, tali fratture si sono arrestate non molto lontano dal punto di origine, mentre sul lato destro la propagazione a maggiore distanza di tali fratture ne ha determinato l'incontro portando in tal modo alla generazione di frammenti di più piccole dimensioni.

6e) Analisi del tronco di coda.

Si è evidenziata una azione locale che ha causato la rottura dei correnti sulla sinistra e che ha dato origine a differenti morfologie di frattura nelle zone a differente giacitura ed un'unica direzione di propagazione, approssimativamente verticale, probabilmente con verso basso-alto. Va sottolineato, però, che le azioni evidenziate alle analisi condotte sui correnti posizionati sulla parte sinistra e sulla parte destra della coda non risultano correlazionabili tra loro. Nella zona di culmine della porzione del tronco di coda in esame, le deformazioni e le rotture dei correnti sembrano indicare un'azione diversa. I correnti appaiono piegati, come se fossero stati sottoposti ad una compressione assiale.

6f) Analisi della sezione del velivolo in corrispondenza delle ali.

Si tratta della parte della fusoliera che è rimasta più integra e costituisce una fascia anulare che si presenta quasi continua. In questa sezione si trova l'unica parte di telaio del pavimento ancora presente del DC9. Sono rimasti in posizione i travetti di sostegno delle poltroncine situati sulla destra. Del travetto situato sulla estrema destra, ne è rimasta circa la metà. Le rotture sono intervenute con una rilevante componente di torsione ad asse -x (verso la coda). Dalle analisi si può concludere che verosimilmente vi è stata una flessione con una rotazione antioraria. Sulla lamiera di rivestimento della fusoliera, si hanno deformazioni localizzate che hanno provocato squamature localizzate della vernice esterna, evidenti nella parte superiore sinistra della fascia anulare. Esse possono essere correlate con la flessione innanzi detta. In conseguenza di tale flessione, la lamiera di rivestimento della fusoliera, in corrispondenza della fascia anulare, è stata sottoposta ad una azione di compressione nel piano della lamiera stessa. Tale compressione potrebbe esser causa di imbozzamenti, più marcati nelle aree in cui la lamiera è più lontana dai vincoli costituiti dalle rivettature di collegamento con correnti ed ordinate, e in corrispondenza delle intersezioni fra questi potrebbe indurre ulteriori deformazioni locali.

7. A questo punto il collegio prende in esame singoli reperti. In primo luogo quelli provenienti dalla zona della toilette. Questo ambiente è collocato in posizione posteriore del DC9, in corrispondenza del lato sinistro.

7a) Analisi del lavello (rep. 1566).

Esso è costituito da un solo pezzo di lamiera sottile, fabbricato mediante operazioni di deformazione plastica a freddo e di tranciatura, ed alloggiato nel mobiletto della toilette, cui è avvitato attraverso gli appositi elementi di fissaggio. E' collegato con i tubi di adduzione dell'acqua e con quello di scarico. La porzione in esame si presentava fortemente ripiegata ed

accartocciata. Gli esami effettuati hanno avuto lo scopo di individuare se il materiale di cui è costituito il lavandino (acciaio inossidabile austenitico stabilizzato al titanio del tipo AISI 321), presentasse precipitazioni di carburi di cromo al bordo del grano (intergranulari). L'esame metallografico con microscopio ottico e quello con microscopio a scansione (SEM) hanno escluso la presenza di tali carburi. I carburi di titanio rilevati sono precipitati assolutamente normali per l'acciaio inossidabile.

Dall'insieme delle osservazioni metallografiche e delle analisi chimiche effettuate, i periti desumono che:

- non vi è segno di precipitazione di carburi di cromo a bordo grano, ma solo presenza di carburi di titanio intergranulari. E ciò porterebbe ad escludere esposizioni del lavandino a temperature elevate per un tempo tale da provocare ridissoluzione dei carburi di titanio e successiva precipitazione di quelli di cromo;

- le dimensioni dei cristalli sono relativamente grandi nelle zone della coppa più in basso rispetto al piano del lavandino e nella zona del bordino superiore e sono più fini della coppa nella zona più in alto (zona di massimo stiramento). Tale differente dimensione potrebbe essere spiegata con il differente grado di incrudimento raggiunto nelle diverse zone nel corso delle operazioni di fabbricazione;

- non sono stati osservati fenomeni di deformazione plastica su cristalli con eventuale orientamento favorevole, quali quelli che solitamente si osservano nei metalli sottoposti ad onda d'urto;

- in nessun caso si è riscontrata una distribuzione duale della dimensione dei cristalli quale potrebbe essere indotta da un inizio di ricristallizzazione per una breve esposizione ad alta temperatura delle zone di localizzazione della deformazione;

- le piegature ottenute per deformazione plastica nella zona anteriore del lavello stesso risultano quasi completamente raddrizzate prima di ulteriori deformazioni: il fenomeno di raddrizzatura sembra estendersi anche nella zona destra del lavello ad eccezione del bordino rialzato dell'estremità destra. Il fenomeno si estende anche alla zona posteriore. Tali fenomenologie sembrano coerenti con un'azione di trazione globale subita dal lavello in direzione prevalentemente alto-basso con i vincoli di reazione che possono essere costituiti dal fissaggio del lavello alla sua sede.

7b) Analisi delle lamiere di acciaio inossidabili e dei lavelli sottoposti a prova di scoppio a La Spezia.

Le prove condotte sui lavelli sottoposti a prova di scoppio hanno permesso di rilevare:

- la totale dissomiglianza fra le deformazioni macroscopiche subite dai lavelli, per i quali la carica esplosiva era posizionata al di sotto di essi, e quella del lavello recuperato;
- una forte analogia delle deformazioni macroscopiche nel caso del lavello sottoposto a prova con carica esplosiva leggermente soprastante;
- una discreta somiglianza nel caso del lavello sottoposto a prova con carica esplosiva leggermente soprastante in simulacro di toilette. L'assenza nei campioni prelevati dal lavello recuperato di fenomenologie riconducibili all'effetto di onde di pressione o di temperatura, visibili invece nelle lastre e nei lavelli sottoposti a prova di scoppio.

8. Analisi del tubo di lavaggio del serbatoio WC (rep. 1382).

E' in acciaio inossidabile, del diametro di 12,5 mm circa; è fabbricato mediante operazioni di curvatura in modo da assumere un andamento all'incirca trapezoidale, corrispondente a quello del perimetro della base superiore del serbatoio WC stesso. E' fissato mediante fascette in materiale polimerico e viti. Lungo il tubo sono praticati fori attraverso i quali viene spruzzata la soluzione di lavaggio. La porzione di tubo recuperata è in massima parte relativa alle porzioni in corrispondenza della parete anteriore e della parete sinistra del serbatoio. Mostra deformazioni di entità notevolmente differente a seconda delle zone di reperto.

- la prima zona, corrispondente alla parte anteriore del serbatoio, presenta solo lievi deformazioni localizzate e conserva la forma originale con, pressoché integre, le due curve corrispondenti agli angoli anteriori del serbatoio;
- la seconda zona, quella che corre lungo la porzione posteriore del lato sinistro, risulta fortemente danneggiata, con schiacciamenti estesi, talune indentazioni e piegature di vario tipo. Termina con una frattura. Nella porzione finale, lo schiacciamento è pressoché completo ed i fori allungati. Ciò fa ritenere che sia intervenuta una azione omogenea di schiacciamento e di trazione;
- la terza, mediana, in cui lo schiacciamento è solo parziale e si accompagna ad una accentuata deformazione elicoidale.

Solo una delle varie indentazioni, tutte di piccole dimensioni, sembra il risultato di una azione di notevole severità da parte dello spigolo acuminato di un oggetto estraneo al tubo, in quanto ha provocato sulla faccia opposta a quella di indentazione un inizio di rottura. Tale indentazione è avvenuta pertanto successivamente alle azioni che hanno causato lo schiacciamento del tubo.

8a) Così conclude il collegio. Dall'esame globale delle deformazioni, che non si presentano omogenee, si ritiene di poter affermare che il tubo non sia stato assoggettato ad onde di pressione. Si è riscontrata l'assenza di segni o evidenze riconducibili a fenomeni esplosivi.

9. Quindi le analisi sulla modanatura della toilette (rep. n.1493, AZ639, target E147).

I fori di alloggiamento delle viti di fissaggio allo stipite appaiono improntati in direzione - y (verso l'ala sinistra), cioè nella direzione verso il corridoio. Il bordo della modanatura che funziona da battente della porta risulta invece ruotato dalla sua posizione originaria in senso antiorario rispetto allo stipite guardando dall'alto. La combinazione delle improntature e delle piegature del battente porta ad ipotizzare un movimento relativo fra stipite e porta che ha portato la porta verso l'interno della toilette. Tale ipotesi è rafforzata dalla rottura della sede dello scrocco, che è solidale con la porta.

10. Infine, per quanto concerne la cerniera della porta della toilette, (rep.1545, AZ537, target F2) essa è stata ritrovata piegata in posizione aperta, da cui si potrebbe desumere che la porta si sia aperta verso il corridoio prima di staccarsi dalla cerniera stessa. Dalle analisi delle sedi delle viti di fissaggio allo stipite ed alla porta si è rilevato che vi sono leggere deformazioni nella parte dei fori verso l'interno della toilette. Tali deformazioni non sono presenti su tutti i fori e sono più fuori del piano che nel piano della cerniera. Alcune delle viti di fissaggio con la porta sono ancora in sede. La deformazione della parte terminale verso il basso mal si raccorda con una ipotesi di apertura totale della porta fino al blocco contro lo stipite.

11. V'è poi la parte dedicata all'analisi dei reperti non correlabili con una area definita.

11a) Estintore.

Su tutta la superficie interna non si sono ritrovati segni di alcun genere. In corrispondenza del foro, che è stato rilevato sulla superficie interna, si ha materiale ripiegato verso l'interno da una sola parte. Il foro è stato prodotto da un oggetto acuminato che è penetrato solo parzialmente, probabilmente non in direzione ortogonale alla superficie.

11b) Bombola e centina.

Il codolo della bombola era stato asportato per precedenti analisi dell'AM. La centina si è rotta per flessione.

12. Da ultimo le analisi condotte per conto del collegio chimico.

12a) Il raffronto tra un pallino prelevato dall'ala sinistra ed una sfera di cuscinetto di tipo aeronautico ha evidenziato differenze per difetti interni, irregolarità nella forma, segregazioni dendritiche e microstruttura.

12b) Dalle analisi effettuate di concerto con il collegio chimico per confrontare le schegge 6-4M(i), 6-4M(ii) e 52-1M si è accertata la totale dissomiglianza di composizione chimica tra le prime due e che da confronti con parti prelevate dall'aeroplano le schegge 64-M(ii) e 52-1M possono provenire da zone della fusoliera in cui le leghe di alluminio base sono ricoperte da strati di rivestimento protettivo (cladding).

Sulle conclusioni di questo collegio s'è detto all'inizio. Qui si deve solo aggiungere che esse appaiono più che motivate, giacchè esse traggono origine dalle elevatissime conoscenze dei periti e dal loro notevole impegno nell'esame dei più rilevanti reperti. Questo elaborato ha riempito una grossa lacuna delle perizie tecniche, ha consentito un importante passo avanti nelle conoscenze dell'inchiesta, ha posto dei punti fermi nell'ambito degli effetti di esplosione, che tutti i collegi terranno, o avrebbero dovuto tenere, presenti.

* * * * *