

Tribunale Penale di Roma
Ufficio Istruzione - Sezione 1a Stralcio

Procedimento Penale n° 527/84A G.I.

**Ricostruzione dei fatti avvenuti la
sera del 27 Giugno 1980 nel cielo di
Ustica**

Prof. Dott. Ing. Franco Algostino
Prof. Dott. Ing. Mario Pent
Prof. Dott. Ing. Mario Vadicchino

19 marzo 1999

1

Introduzione

Abbiamo espresso, quali Periti di Parte Civile, in varie relazioni la nostra opinione su alcuni degli aspetti tecnici che riguardano la complicata vicenda che ha portato alla caduta del DC9 I-TIGI della società Itavia, avvenuto la sera del 27.6.1980 nel cielo tra Ponza e Ustica; abbiamo preferito in questi anni fornire contributi analitici su aspetti particolari che stimavamo essere cruciali per la comprensione della vicenda, ma non ci eravamo mai espressi in modo esplicito su quale fosse stata la causa di tale evento.

L'esame dei dati contenuti nelle relazioni delle indagini tecniche, le interpretazioni che di questi dati sono state date, la documentazione da noi acquisita in questi anni, ed in fine l'ampia rassegna che di questi dati è stata fatta nella Requisitoria dei Pubblici Ministeri¹ ci permettono ora di affermare che causa di questo incidente è stato un missile lanciato presumibilmente contro uno degli aerei che hanno accompagnato il DC9 durante il suo viaggio.

Lo scenario che ci apprestiamo a descrivere è il solo che, a nostro avviso, è in grado di giustificare la globalità dei dati acquisiti: se alcuni dettagli non appaiono completamente chiariti, ciò va attribuito anche al fatto che la quasi totalità delle indagini, degli esperimenti e della documentazione acquisita dalla Commissione Misiti è stata dedicata all'esame dell'ipotesi bomba.

Ciò è particolarmente evidente se si tiene conto delle perizie col-

¹ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998.

legate a quella principale², che indicheremo in seguito come PRU, tutte dedicate a quest'ultima ipotesi. Perizie utili in quanto permettono di escludere, al di fuori di ogni ragionevole dubbio, che una bomba esplosa all'interno del velivolo sia stata la causa dell'incidente.

Non paiono invece essere giunti ad alcuna conclusione i Pubblici Ministeri nella loro Requisitoria, per quanto molti degli elementi da essi considerati validi e sui quali è basata anche la nostra analisi avrebbero permesso, a nostro avviso, una ben più chiara conclusione, come illustreremo nelle pagine seguenti.

In questa relazione analizzeremo nuovamente l'intera vicenda, anche alla luce della nuova documentazione resasi disponibile recentemente; mostreremo in particolare come, a nostro avviso, non esiste alternativa all'ipotesi che ad abbattere il DC9 sia stato un missile e che anzi tale scenario dà ragione di una serie di dati che non era stato possibile precedentemente giustificare.

²Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Förshing H., Gunnval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.; *Relazione Tecnica*, 20.7.1994.

2

Il metodo dell'accertamento

2.1 Introduzione

È necessario, prima di sviluppare una analisi tecnica più dettagliata, premettere alcune considerazioni generali che illustrino la metodologia in base alla quale la ricostruzione dei dati da noi esaminati ci permette di affermare che un missile è stata la causa della caduta del DC9. Intendiamo cioè, preliminarmente ed in modo esplicito, illustrare il criterio logico in base al quale facciamo questa affermazione e perchè essa può essere considerata come l'unica tecnicamente possibile.

La metodologia da noi utilizzata in questo capitolo è quella del cosiddetto *albero delle probabilità*, la cui validità, ai fini dell'accertamento della verità, è tra l'altro condivisa dai Pubblici Ministeri nella loro requisitoria, dove scrivono¹

il metodo cosiddetto albero delle probabilità non corrisponde ad un minor grado di certezza sulle conclusioni, rispetto ad altri metodi espositivi.

Il significato di questa affermazione sul metodo può essere così sinteticamente descritto: se nel dovere scegliere tra varie ipotesi si riesce ad escluderle tutte ad eccetto di una, quest'ultima ha un grado di certezza equivalente a quello che si sarebbe avuto nel caso che essa fosse stata dimostrata direttamente.

¹ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (ed. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 25.

L'utilizzo dell'*albero delle probabilità* è in realtà la fase conclusiva di un processo che si basa sulla capacità di poter accettare o rifiutare le singole ipotesi, tenendo conto che questo processo ha ovviamente sempre un carattere probabilistico: l'utilizzo di questo metodo si ha infatti quando nessuna ipotesi è di per sé dimostrata. La parte più delicata di questo processo sta nel fatto che le modalità con le quali si decide l'accettazione di una ipotesi e quelle di un suo rifiuto non hanno difficoltà equivalenti. Si può esemplificare questo fatto riferendosi alle problematiche che appartengono a questa indagine: l'acquisizione di un detonatore permette di accettare con sicurezza l'ipotesi bomba, mentre la non acquisizione impone sempre di chiedersi se ciò è dovuto all'assenza di bomba o al mancato rinvenimento del detonatore. L'accettazione di una ipotesi può essere cioè fatta sulla base dell'acquisizione di un singolo significativo elemento, mentre la sua esclusione ha bisogno di una ben più complessa mole di dati². Avrebbe quindi ben agito la Commissione Misiti, in assenza di ogni segno di bomba, nell'operare una estesa campagna di esperimenti e simulazioni relativi all'ipotesi bomba, se poi avesse voluto trarne tutte le conseguenze che i risultati così ottenuti imponevano. Questa oggettiva difficoltà è stata invece male utilizzata dalla Commissione Misiti la quale, oltrepassando ampiamente i limiti della correttezza scientifica, ha sempre considerato l'assenza di indizi come mancato ritrovamento, e gli indizi contrari come irrilevanti. Scrivevamo a questo proposito³:

Essistono anche elementi contrari all'ipotesi; con un puro gioco verbale invece per la Commissione Misiti, gli elementi contrari alla tesi da loro privilegiata vengono degradati ad elementi che non forniscono convalide.

Questa affermazione ci pare in accordo con quanto scritto dai Pubblici Ministeri nella loro Requisitoria, quando affermano⁴ che:

²Senza addentrarci ulteriormente in questa complessa problematica, merita ricordare che l'osservazione qui fatta corrisponde alla leggendaria difficoltà che incontrano i matematici nel dimostrare i cosiddetti teoremi di non esistenza. Ed è esemplificativa di queste difficoltà la recente dimostrazione del Teorema di Fermat, tipico teorema di non esistenza, che ha richiesto cinque secoli di sforzi.

³Algostino F., Cancelli C., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.; *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, 22.11.1994, pag. 18.

⁴*Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 185.

... la mancanza di corroborazione per risultato contrastante con l'esperimento non è evento neutro, ma porta alla falsificazione della teoria; a meno che non si dimostri o che l'esperimento non era correttamente impostato o eseguito oppure che vi sono sotto-formulazioni della teoria che le consentono di sopravvivere al risultato negativo ...

2.2 Gli scenari ed i criteri

Come è noto, dei vari scenari ipotizzabili ed ipotizzati inizialmente nella perizia Blasi⁵, solo alcuni sono sopravvissuti alle successive analisi e possono essere oggi presi dignitosamente in considerazione; alcuni di questi saranno qui ancora una volta analizzati, più che per la loro credibilità tecnica, per il fatto che ad essi fa riferimento una considerevole mole di dati e di analisi.

I tre scenari che qui si prenderanno in considerazione sono:

1. Esplosione esterna (missile),
2. Quasi collisione,
3. Esplosione interna (bomba nella toilette).

Questi scenari sono di fatto, pur con diverso grado di approfondimento, anche quelli presi in considerazione dalla Commissione Misiti⁶, e di fatto sono anche quelli esaminati dai Pubblici Ministeri.

Non merita qui esaminare ulteriormente la PRU nella quale, come è noto, si sosteneva che la caduta del DC9 era attribuibile al terzo scenario; in una nostra memoria⁷, mostravamo come tale ipotesi non potesse essere accettata, a causa della totale assenza di ogni elemento di

⁵Blasi M., Cerra R., Imbimbo E., Migliaccio M., Romano C.; *Perizia sull'incidente del DC9 I-TIGI della società Itavia del 27-6-1980*, Roma 16.3.1989.

⁶Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Försching H., Gunnval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.; *Relazione Tecnica*, Roma 1994.

⁷Algostino F., Cancelli C., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.; *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, Roma 22.11.1994.

prova ed al contrasto con tutti gli elementi acquisiti durante le indagini, sia quelli ricavabili dagli esperimenti che dalle simulazioni numeriche. Né ulteriori chiarimenti sono venuti dalle successive relazioni di alcuni membri della Commissione Misiti che hanno anzi ulteriormente amplificato e aggravato le contraddizioni e le incongruenze presenti nella PRU. Non si può quindi che essere d'accordo con i Pubblici Ministeri quando in conclusione della loro analisi dell'ipotesi di una bomba nella toilette, scrivono che essa⁸:

non era stata suggerita da nessuno degli elementi sopra citati⁹ e anzi era con essi in contrasto. L'ipotesi derivava invece dalla constatazione della mancanza di una parte della fusoliera, che di conseguenza appariva essersi separata nelle fasi iniziali del collasso, unita alla valutazione delle modalità e dei tempi di collasso dell'aereo e dalle deformazioni patite da alcuni elementi strutturali.

Tutte le verifiche di questa ipotesi sono state sostanzialmente negative. Quelle non incompatibili trovano comunque ragionevole spiegazione alternativa. Tutte si scontrano con la possibilità di giustificare, con una unica ipotesi di collocazione e di composizione dell'ordigno, i danni attribuiti ad esplosione, ma riscontrati in posizione incompatibili tra di loro.

Tutte si scontrano, ancora, con l'assenza di danni su parti dell'aereo recuperate e che sia per una semplice operazione logica, sia per le simulazioni all'elaboratore che, infine, per le prove sperimentali, non potevano non essere direttamente esposte agli effetti primari e secondari dell'esplosione.

Riprenderemo quindi dall'inizio il percorso logico che ci porta, applicando l'*albero delle probabilità*, a fare l'affermazione da noi fatte nell'introduzione, che cioè la causa della caduta del DC9 sia stato un missile esploso nei pressi dell'aereo. L'utilizzo di questa tecnica di accertamento della verità è imposto dal fatto che per nessuno dei tre scenari sopra indicati è disponibile un dato tale da farlo accettare.

⁸ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag.186.

⁹ Ci si riferisce agli elementi indicatori di una esplosione.

Il problema da risolvere è in sostanza quello di individuare, tenendo conto dei dati tecnici fattuali acquisiti, quale dei tre scenari sopra indicati sia in grado di giustificarne il numero più ampio possibile; successivamente andrà verificato che non esistono dati in insanabile contrasto con lo scenario prescelto. Conviene a questo scopo dividere l'enorme mole dei dati tecnici disponibili, sia quelli connessi direttamente all'incidente, sia quelli acquisiti durante le indagini anche attraverso gli esperimenti e le simulazioni, secondo quattro criteri, tenendo conto sia della loro natura intrinseca, sia del loro rapporto logico con gli scenari sopra considerati.

I criteri in base ai quali i dati sono stati raggruppati possono essere così individuati:

- A. Presenza di velivoli contigui al DC9,
- B. Presenza di segni di esplosione,
- C. Segni sul relitto,
- D. Modalità di collasso.

Gli elementi che costituiscono questi criteri sono descritti ed analizzati singolarmente nei capitoli successivi; svilupperemo qui alcune considerazioni di carattere più generale che riguardano il loro ruolo nell'individuazione della causa che ha prodotto la caduta del DC9.

L'utilizzo di questi criteri come discriminanti rispetto ai tre scenari sopra ricordati, cioè l'applicazione ad essi di un albero delle probabilità, esige due passaggi logici strettamente connessi, ma che è utile in questa analisi metodologica pensare come distinti. Il primo è quello dell'accertamento fattuale di tutti i dati pertinenti ai criteri e questo tema sarà sviluppato in modo analitico nei capitoli successivi, ed il secondo è la connessione di questi criteri ai tre scenari da esaminare, cioè, in altre parole, la loro capacità di discriminazione.

Per quanto riguarda il primo passaggio è noto come, sia per la natura intrinseca dei dati, sia per le modalità con le quali essi sono stati acquisiti, il loro grado di affidabilità possa risultare diverso. Per alcuni dei dati non è possibile conoscere le modalità con le quali essi sono entrati nell'inchiesta: si pensi per esempio alle schegge inviate al RARDE¹⁰ od

¹⁰Si noti peraltro che il valore probatorio di tale reperto risulta accettato dai Pubblici Ministeri.

al problema della originalità ed integrità dei dati dei radar militari sui quali esistono, a nostro avviso, ancora dubbi. Per altri, ad esempio per le registrazioni dei radar civili, esiste solo un problema di interpretazione dei dati. Conviene, su questo aspetto cruciale della metodologia di indagine, effettuare una analisi più approfondita, esemplificandola sui problemi che si sono dovuti affrontare nell'esame dei dati relativi al criterio B, quello relativo alla presenza di segni di esplosione.

L'individuazione della presenza delle tracce e del tipo di esplosivo è operazione che oggi la chimica fa con eccezionale affidabilità: si potrà discutere delle modalità con le quali quelle particolari molecole si sono venute a collocare sui punti nei quali sono state trovate, ma non ci sono dubbi che si tratta di esplosivo e precisamente di T4 e TNT. Più delicata è l'individuazione e la validazione dei segni di esplosione: il criterio è qui meno discriminante, ma il buon senso e la letteratura tecnica danno indicazioni precise anche in questo senso¹¹; è il complesso di questi elementi che permette di dire che il DC9 ha sperimentato una esplosione.

Anche per quanto riguarda il secondo passo, cioè la capacità discriminatrice dei quattro criteri rispetto ai tre scenari va detto che essa è diversa; l'insieme di essi può tuttavia, a nostro avviso, considerarsi conclusivo rispetto alle cause dell'incidente.

Analizzeremo nel seguito, in modo più analitico, i dati disponibili che costituiscono i quattro criteri sopra indicati, in particolare il loro accreditamento fattuale; è utile però, preliminarmente, esaminare la loro valenza discriminante rispetto ai tre scenari che descrivono le cause dell'incidente. Gli scenari 1 (Esplosione esterna dovuta ad un missile) e 2 (Quasi collisione) richiedono ovviamente che sia positivo il criterio A, cioè che velivoli siano presenti nelle immediate vicinanze del DC9 al momento dell'incidente; si tratta di una condizione necessaria, ma che non è da sola sufficiente a discriminare tra i due scenari. In linea puramente teorica si è sostenuto¹² che tale presenza non permetterebbe di escludere lo scenario

¹¹ **Algotino F., Cancelli C., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.**; *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, 22.11.1994; paragrafo 2.2.

¹² **Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Förshing H., Gunnval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.**; *Relazione Tecnica*, 20.7.1994, pag. VII-30.

Casarosa C., Held M.; *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995.

3 (Esplosione interna nella toilette); va detto a questo proposito che una presenza puramente fortuita può essere considerata un evento altamente improbabile e comunque non darebbe conto della mancata segnalazione da parte dei piloti che, trovatisi nei pressi del DC9 esploso, dovevano sicuramente notare il fenomeno e lo avrebbero sicuramente segnalato; a meno che non si voglia credere alla bizzarra ipotesi che un ordigno sia stato collocato a bordo del DC9 a Bologna, ma la sua esplosione sia stata comandata da bordo di un aereo in volo vicino al DC9. Se invece non è fortuita, essa è necessariamente collegata all'avvenimento e tale collegamento può essere sensatamente pensato solo nell'ambito degli scenari 1 (Esplosione esterna dovuta a missile) e 2 (Quasi collisione). La presenza di aerei vicino al DC9 ha dunque una grande capacità discriminante; poichè abbiamo la certezza che aerei si sono trovati vicini al DC9 al momento dell'incidente, pensiamo che questo costituisca, oltre ovviamente alla totale assenza di segni favorevoli ed anzi la presenza di indicazioni contrarie, la dimostrazione più decisiva contro lo scenario 3 (Esplosione nella toilette).

Va notato come i criteri B, C e D non siano tra di loro totalmente indipendenti: essi vanno in effetti considerati conseguenziali, secondo un processo logico che vogliamo qui rendere esplicito. La presenza dei segni di esplosione (criterio B) può essere accertata in modo oggettivo a prescindere dalla *storia* degli elementi sui quali essi sono collocati ed in generale da tutti gli altri elementi.

Come è noto segni di esplosione, sia come tracce di esplosivo, che come segni caratteristici di contiguità ad una esplosione furono rinvenuti sui reperti del DC9 sin dal 1982¹³; il rinvenimento di tracce di esplosivo è stato successivamente confermato¹⁴ in quantitativi ben superiori a quelli minimi rilevabili dalle analisi chimiche. La presenza dei segni di una esplosione permette di escludere che lo scenario 2 (Quasi collisione) sia stata la sola ed esclusiva causa della caduta del DC9. Tali segni, a nostro avviso, convalidano maggiormente lo scenario 1 (Esplosione esterna dovuta a missile) rispetto a quello 3 (Esplosione all'interno della toilette); la caratteristica di questi segni di esplosione è infatti quella di non

¹³Abbiamo analizzato a fondo questo rinvenimento nel paragrafo 5.2.2 della nostra relazione **Algotino F., Cancelli C. Pent M., Tartaglia A., Vadamchino M.**; *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, 22.11.1994.

¹⁴**Graziani G., Lopez A., Nicoletti R.**: *Relazione peritale del collegio chimico*.

essere localizzati in un punto preciso del relitto e tanto meno di essere localizzati nella toilette, come sarebbe successo nel caso di esplosione di una bomba. Si noti che una esplosione interna può essersi verificata solo nella toilette; le parti del relitto che sono state recuperate permettono infatti di escludere che la eventuale bomba possa essere esplosa in qualsiasi altra parte del velivolo. Ammettendo pure che la discriminazione tra lo scenario 1 (Esplosione esterna dovuta a missile) e 3 (Esplosione interna alla toilette) possa essere opinabile se basata solo sul criterio B (Presenza dei segni di esplosione), essa è però molto forte nei riguardi dello scenario 2 (Quasi collisione); non possono esserci dubbi sul fatto che la presenza di segni di esplosione, di origine e di tipologie così diversificate sia incompatibile con lo scenario 2 di quasi collisione, ove questo venga considerato come unico ed esclusivo fattore causale.

L'accertamento della presenza di segni di esplosione acquista un significato nella vicenda qui in esame, se essi vengono riferiti al relitto, che è appunto quanto previsto dal criterio C. L'operazione di collegare, in modo scientificamente e logicamente corretto, i segni di esplosione al relitto rappresenta forse il passo più cruciale e delicato da compiere.

Tale collegamento permette in effetti di individuare la collocazione dell'esplosione e quindi di discriminare lo scenario 1 (Esplosione esterna dovuta a missile) da quello 3 (Esplosione interna di una bomba). La totale impossibilità di trovare una collocazione dei segni di esplosione coerente con lo scenario di una esplosione nella toilette, e la impossibilità di una collocazione alternativa, impongono di considerare, secondo il criterio C, lo scenario 3 (Esplosione interna) come **impossibile**. Si deve a questo punto ritenere che, come scrivono i Pubblici Ministeri¹⁵:

le difficoltà di individuare caratteristiche e posizione della bomba non siano un particolare secondario e che tali difficoltà derivino invece dal fatto che le parti recuperate della toilette non consentano di affermare che in quel vano si sia verificata un'esplosione.

A questo punto l'albero delle probabilità indica lo scenario 1 come unico possibile. Si tratta quindi, dato il carattere probabilistico delle

¹⁵ *Requisitorie del Pubblico Ministero, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 141.*

precedenti affermazioni, di accertare se lo scenario **1** incontra insuperabili difficoltà rispetto al criterio **D**, se cioè le modalità di rottura sono totalmente incompatibili con lo scenario **1**; mostreremo nel seguito come il criterio **D** sia particolarmente a favore dello scenario **1**, scenario questo già indicato dai precedenti criteri.

La caratterizzazione di *scientificamente e logicamente corretto* è stata da noi sintetizzata utilizzando il termine *coerente*, parola questa più volte utilizzata nelle memorie tecniche e non solo di questo procedimento. I Pubblici Ministeri, nella loro Requisitoria¹⁶ riferendosi agli elementi indicatori di una esplosione, li definiscono *tra loro incoerenti* ed individuando i motivi della incoerenza dicono:

le schegge provengono con ogni probabilità da elementi esterni o che si trovano lungo componenti esterne del velivolo; le particelle incombuste di esplosivo sono state rinvenute su oggetti che si trovavano certamente in un vano bagagli, ma anche su di un gancio all'interno della cabina passeggeri; il vestito di bambola è stato reperito tra i relitti della parte anteriore della cabina.

L'analisi di queste affermazioni necessita di un commento preliminare: l'incoerenza di un insieme di dati sperimentali non è definita in assoluto, ma è sempre riferita ad un criterio. I segni di esplosione possono essere veri o falsi, possono cioè essere dovuti ad una effettiva esplosione od essere dovuti ad altre cause che simulino le conseguenze di una esplosione, ma di per se non possono essere incoerenti, non possono cioè avere una *incoerenza interna*. Pur tenendo conto del carattere aleatorio che ha ogni esplosione e quindi del fatto che i criteri di coerenza possono essere considerati non rigorosamente restrittivi, se essi sono veri devono essere coerenti con uno scenario di esplosione. In particolare la necessaria localizzazione spaziale dell'esplosione impone alcune restrizioni alla localizzazione dei segni dell'esplosione: impone cioè quella che si potrebbe chiamare *coerenza spaziale*. Nel caso in esame quindi non si può tanto parlare di incoerenza interna, ma piuttosto di incoerenza con lo scenario **3** di esplosione nella toilette.

¹⁶ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 185.

Come abbiamo più volte fatto notare lo scenario 3 è stato sottoposto ad un ampio ed intenso esame, sia con la ricerca di tutti i possibili relitti appartenenti alla parte terminale del velivolo, sia con varie campagne di esperimenti: l'effettuazione di tutte queste ricerche era giustificata da valide motivazioni tecniche: in effetti tra le tre ipotesi sopra indicate, la terza è quella che implicherebbe segni sul relitto più numerosi ed anche più caratteristici¹⁷. Torneremo più a lungo su questo punto¹⁸: è doveroso fin d'ora affermare che l'assoluta assenza, sulla parte del relitto contigua alla toilette (motore destro e cono di coda), di segni di esplosione attribuibili ad una bomba obbliga ad escludere, di per se sola, lo scenario 3. Si è voluto giustificare questa assenza sulla base del fatto che non sono state recuperate varie parti della toilette; nell'Appendice A è mostrato, con una semplice analisi probabilistica, come sia molto improbabile che l'assenza dei segni sia dovuta al mancato recupero di alcune parti della toilette.

Il criterio D riguarda le modalità di rottura: è noto che molti sforzi sono stati fatti dalla Commissione Misiti per accertare la sequenza temporale e causale di tali rotture, con lo scopo di individuare la zona dell'aereo nella quale è iniziato il danneggiamento. La sequenza è stata individuata essenzialmente collegandola alla posizione dei relitti in mare: si è concluso in particolare che la prima parte ad essersi staccata è stato il motore destro, seguito quasi immediatamente dal motore sinistro, dalla parte finale della fusoliera e dalla parte estrema dell'ala sinistra. Questa modalità è stata confermata anche dalle analisi frattografiche.

Noi concordiamo con questa ipotesi, anche sulla base del fatto che il Flight Data Recorder(FDR) ed il Cockpit Voice Recorder(CVR) hanno cessato di funzionare, per la caduta dell'alimentazione elettrica, in un tempo talmente breve da essere incompatibile con il fatto che la prima parte a staccarsi possa essere stata l'ala sinistra. L'alimentazione elettrica è infatti fornita da un alternatore collegato al motore destro; ove si fosse staccata per prima l'ala sinistra il FDR avrebbe sicuramen-

¹⁷Conviene ricordare come in alcuni classici casi di indagini su attentati ad aeromobili, per quanto la percentuale dei pezzi recuperati fosse ridottissima, purtuttavia furono rinvenuti segni di esplosione inequivocabili. Si veda a questo proposito il classico lavoro di Higgs D. G., Jones P. N., Markham J. A., Newton E.; *A Review of Explosives Sabotage and its Investigation in Civil Aircraft*, J. Forens. Sci. Soc. (1978), 18, 137-160.

¹⁸Si veda il Capitolo 4 di questa relazione.

te avuto il tempo di registrare almeno la parte iniziale delle alterazioni di assetto di volo causate dalla perdita dell'ala sinistra. La sequenza di cessazione dell'alimentazione elettrica è stata individuata analizzando le registrazioni del CVR; la natura elettrica degli ultimi segnali registrati determina una sequenza temporale tale da fare pensare che il distacco del motore sinistro sia avvenuto dopo quello destro entro un breve intervallo di tempo. Dal criterio D, dal fatto cioè che la prima parte a staccarsi sia stato il motore destro si ricava quindi una ulteriore motivazione per escludere lo scenario 2 (Quasi collisione). L'ipotesi della quasi collisione è infatti collegata al fatto che un velivolo passando con la propria ala sopra quella sinistra del DC9, ne abbia provocato la rottura. Va detto che esisterebbero ragioni più dirette per escludere tale ipotesi, basate sull'analisi dell'entità delle forze aerodinamiche necessarie in tale situazione ad operare la rottura dell'ala sinistra. A tale conclusione sarebbero giunti alcuni membri della Commissione Misiti secondo quanto si può leggere in un loro documento¹⁹. Alla pagina 10 del documento 1, in una parte indicata come contributo specifico di Hans Försching, si dice appunto come dall'analisi dei segnali del CVR si possa

dedurre con certezza che l'evento deve essersi prodotto direttamente nelle immediate vicinanze del generatore elettrico, ossia vicino al motore destro

e si aggiunge, con una frase peraltro un poco oscura, che

la improvvisa interruzione di potenza non può essere razionalmente spiegata con ... una quasi-collisione, per la quale Försching ha dimostrato che, anche nel peggiore caso di avvicinamento transonico, i carichi aerodinamici sarebbero troppo piccoli per produrre la rottura del sistema elettrico

Esistono in sostanza motivi diretti, anche a prescindere dalla presenza dei segni di esplosione, per considerare lo scenario della quasi collisione, quale unico scenario dell'incidente, non tecnicamente sostenibile:

¹⁹Si tratta di una raccolta di 8 documenti intitolata *Alcune osservazioni finali e generali sulle risultanze tecniche del "Caso Ustica"*, redatta a cura dai periti Paolo Santini e Aurelio Misiti, in date comprese tra il 18.6.1995 ed il 25.6.1996, ma contenente anche contributi di Frank Taylor, Goran Lilja e Hans Foersching e depositato in data 23.12.1997.

la presenza dei segni di esplosione permette di escluderlo in modo definitivo.

Come mostreremo nel capitolo finale di questa relazione l'esplosione di una testata missilistica nella parte anteriore destra permette di giustificare, anche quantitativamente, le modalità di rottura accertate del DC9 e quindi anche il criterio **D** è in perfetto accordo con lo scenario **1**.

2.3 Conclusioni metodologiche

Non dovrebbero fare parte delle relazioni tecniche le considerazioni di carattere epistemologico; esse dovrebbero essere contenute implicitamente nella completezza dei dati considerati e nella razionalità delle conclusioni che da tali dati sono tratte. Ma siamo stati chiamati paradossalmente in causa, proprio su questo terreno²⁰, da alcuni membri della Commissione Misiti, il cui lavoro, come abbiamo mostrato, è ampiamente criticabile proprio dal punto di vista della correttezza di metodo; quindi dobbiamo fare anche noi alcune osservazioni a questo proposito.

Avevamo già notato²¹ come per la Commissione Misiti lo scenario **3** abbia il singolare stato di ipotesi priva di elementi anche potenzialmente contrari; la Commissione Misiti non ha infatti mai esplicitato, quando proponeva ed effettuava simulazioni ed esperimenti allo scopo di verificare l'ipotesi bomba, quale fosse il risultato da considerare favorevole a questa ipotesi e quale invece dovesse considerarsi contrario. Questa posizione ha facilitato tra l'altro l'artificio retorico di definire i risultati **contrari** alla teoria come risultati che non forniscono convalide.

Da un punto di vista metodologico l'ipotesi bomba risulta essere un esempio di ipotesi non *falsificabile*²², priva cioè dell'elemento essenziale per essere considerata scientifica. Infatti per citare direttamente Popper²³

²⁰Casarosa C., Held M.; *Osservazione sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995; pag. 1-1.

²¹Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995; pag. 18.

²²Il termine *falsificare* è usato nel senso indicato in Popper K. R.; *Logica della scoperta scientifica*, Torino 1970 e non in quello di produrre monete, quadri etc. contraffatti.

²³Popper K. R.; *Logica della scoperta scientifica*, Torino 1970; pag. 22.

... io ammetterò certamente come empirico, o scientifico, soltanto un sistema che possa essere controllato dall'esperienza. Queste considerazioni suggeriscono che, come criterio di demarcazione, non si deve prendere la verificabilità, ma la falsificabilità di un sistema. In altre parole: da un sistema scientifico non esigerò che sia capace di esser scelto, in senso positivo, una volta per tutte; ma esigerò che la sua forma logica sia tale che possa essere messo in evidenza, per mezzo di controlli empirici, in senso negativo: un sistema empirico deve poter essere confutato dall'esperienza.

(Così l'asserzione "Domani qui pioverà o non pioverà" non sarà considerata una asserzione empirica, semplicemente perchè non può essere confutata, mentre l'asserzione "Qui domani pioverà" sarà considerata empirica).

La non falsificabilità dell'ipotesi bomba, che deriva dalla metodologia utilizzata, pervade tutte le relazioni della Commissione Misiti; essa è ulteriormente dimostrata dalle modalità con le quali viene neutralizzato l'elemento contrario all'ipotesi rappresentato dall'assenza di segni primari e secondari di esplosione. Santini e Misiti scrivono²⁴:

La mancanza di segni primari e secondari di esplosione sui pezzi recuperati è certamente un elemento che può indurre seri dubbi. Le giustificazioni offerte dal Collegio, come è noto, si possono così riassumere:

1. possibile lontananza dei pezzi dal centro dell'esplosione;
2. numero estremamente ridotto dei frammenti;
3. effetto di schermatura prodotto da altri pezzi.

La prima giustificazione è chiaramente insufficiente per una bomba esplosa nella toilette che ha dimensioni di pochi metri quadri, anche tenendo conto che gli esperimenti hanno mostrato come i fori prodotti dalle schegge abbiano interessato anche le parti non contigue alla toilette. La seconda è una tipica affermazione non verificabile, nel senso che,

²⁴ *Alcune osservazioni finali e generali sulle risultanze tecniche del "Caso Ustica"*, 23.12.1997; pag. 8.

non essendo possibile concepire un recupero integrale di tutti i frammenti, esisterà sempre un pezzo sul quale si può ipotizzare la presenza dei segni²⁵. La terza è incomprensibile, nel senso che i segni di esplosione dovrebbero trovarsi sui pezzi schermanti.

Quanto ciò contraddica la pretesa dei PCH di avere utilizzato il metodo galileiano²⁶:

fondato, in estrema sintesi, sulla formulazione di una ipotesi e sulla convalida attraverso il confronto con i dati oggettivi derivanti da indagini sperimentali o teoriche basate, queste ultime, su algoritmi convalidati dall'esperienza.

ci sembra del tutto evidente.

Crediamo in conclusione che gli scenari 2 e 3 siano da rigettare, perchè contraddetti esplicitamente dai criteri metodologici sopra indicati (A, B, C, D): la compatibilità di tutti questi criteri con lo scenario 1, cioè con quello che attribuisce la perdita del DC9 all'esplosione di un missile, la rende l'unica tecnicamente sostenibile.

²⁵Mostreremo nell'Appendice A come tale affermazione sia quantitativamente non sostenibile. Si ricordi in ogni caso come il cono di coda e la carenatura del motore destro siano stati recuperati per intero.

²⁶Casarosa C., Held M.; *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995; pag. 1-1.

3

I velivoli vicino al DC9

3.1 Introduzione

Non c'è dubbio che uno degli aspetti più discussi dell'intera vicenda del DC9 sia stato lo scenario radar, quale si può ricavare dai nastri e dai tabulati del controllo aereo di Fiumicino e dell'Aeronautica Militare; ciò è giustificato alla luce della grande capacità di discriminazione posseduta da questo criterio, come abbiamo precedentemente mostrato. Si tratta sostanzialmente di accertare se, durante il volo ma soprattutto al momento dell'incidente, altri aerei si fossero trovati vicino al DC9. Abbiamo dedicato a questo aspetto, come Periti di Parte Civile, quattro relazioni¹; ed è sulla base di queste relazioni che illustreremo qui i motivi per i quali esiste la certezza che la caduta del DC9 è avvenuta in uno scenario nel quale erano presenti altri velivoli.

Prenderemo in considerazione in questo capitolo solo quanto si può dedurre dall'analisi dei dati dei radar civili, ma si deve ricordare che esistono altri dati a supporto di questa tesi. Intendiamo riferirci alle numerose testimonianze in tale senso; esse non sono state mai da noi

¹Pent M., Vadacchino M.; *Analisi dei rilevamenti dei radar di Fiumicino: dati precedenti l'incidente*, 21.5.1992

Algostino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995

Pent M., Vadacchino M., *Sull'interpretazione di alcune tracce di solo primario*; 30.6.1998.

Pent M., Vadacchino M., *Sulla presenza di un velivolo nascosto in prossimità del DC9 ITAVIA*; 20.7.1998.

tenute in conto, in quanto crediamo che una consulenza tecnica debba trarre esclusivamente dai dati oggetto di analisi le sue verità. Anche il ritrovamento del serbatoio, le cui implicazioni sullo scenario aereo nel quale è avvenuto l'ultimo volo e la fine del DC9, sono state illustrate dalla requisitoria dei Pubblici Ministeri², non è stato da noi preso in considerazione.

L'importanza che ha avuto questo criterio nell'ambito della storia delle indagini e delle relazioni tecniche dedicate a questa vicenda, è illustrata nella requisitoria dei Pubblici Ministeri. Particolarmente rilevante ci pare quanto riferito in merito agli esperimenti effettuati dalla Commissione Pratis³; in tale frangente la presenza o meno di velivoli vicino al DC9 è l'elemento che è stato in grado di fare cambiare opinione ad alcuni membri della Commissione Blasi.

Sin dai primi esami effettuati sui dati radar, è stato in effetti espresso il sospetto che prima, durante e dopo l'incidente alcuni velivoli volassero vicino al DC9. In particolare noi abbiamo mostrato⁴ come almeno un aereo si sia accostato al DC9 durante il volo e lo abbia seguito sino al momento dell'incidente. In una successiva memoria⁵, riguardante gli istanti che seguono l'incidente, abbiamo dimostrato come non tutti i plot del radar primario possano essere attribuiti a relitti del DC9. Poiché si è giunti a questo risultato applicando tre criteri indipendenti, pensiamo che esso possa considerarsi certo.

Convieni dividere, seguendo un criterio di logicità, i quesiti relativi allo scenario radar in due parti: una precedente ed una successiva all'incidente.

Dal punto di vista dell'utilizzo di questo criterio quale discriminante tra le diverse ipotesi di incidente, risulta particolarmente decisivo lo scenario **dopo** l'incidente. Mentre infatti la presenza di uno o più aerei con traiettoria contigua a quella seguita dal DC9, soprattutto nei minuti precedenti l'incidente, potrebbe anche ipotizzarsi non strettamente col-

² *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 336.

³ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 292

⁴ **Pent M., Vadacchino M.**; *Analisi dei rilevamenti dei radar di Fiumicino: dati precedenti l'incidente*, 21.5.1992.

⁵ **Algostino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.**, *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995.

legata ad esso, questa correlazione non può ragionevolmente negarsi per gli istanti immediatamente successivi all'incidente. D'altro canto, se l'accostamento alla traiettoria del DC9 durante il suo volo da parte di altri velivoli non è stata casuale, ma voluta, anche tenendo conto del modo con il quale si è concluso il viaggio del DC9, c'è da supporre che i piloti di tali velivoli abbiano utilizzato tutte le possibilità che avevano a disposizione per nascondere la loro presenza ai radar di controllo; tale possibilità era evidentemente molto più ridotta nell'immediatezza dell'incidente.

È quindi comprensibile come possano esserci discussioni sulle diverse situazioni rilevabili nei minuti precedenti l'incidente dal radar del controllo aereo di Fiumicino, che sono interpretabili con la presenza di uno o due aerei. Particolarmente importante appare quindi l'analisi degli istanti successivi all'incidente; questo è il motivo per il quale abbiamo dedicato particolare attenzione ai 34 echi di solo primario registrati dal radar di Fiumicino dopo l'incidente.

Questa analisi⁶ ha mostrato come sicuramente dopo l'incidente almeno tre velivoli con il motore funzionante abbiano attraversato lo spazio nel quale si muovevano anche i relitti del DC9: questo risultato non appare a tuttoggi contestato da nessuno. È da questo dato certo che si deve partire per ricostruire tutto lo scenario radar che descrive l'intero viaggio del DC9.

3.2 Lo scenario dopo l'incidente

Come è noto l'ultimo segnale di radar secondario si è avuto alle 19.59.33. Il successivo, che avrebbe dovuto aversi alle 19.59.39, non si è avuto perchè nel frattempo il DC9 è andato distrutto. Dopo l'incidente il radar primario di Fiumicino ha registrato 34 echi di solo primario; l'attribuzione di questi 34 echi ai frammenti del DC9 è uno degli argomenti più studiati di tutta la vicenda.

Noi crediamo che sia accertato senza ombra di dubbio come almeno 8 echi non possano assolutamente essere attribuiti ai frammenti del DC9.

Abbiamo esaminato in modo dettagliato questo problema ed il

⁶ Algostino F., Pent M., Tartaglia A., Vadachino M., *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995.

risultato di questa analisi è riportato in una nostra memoria⁷; daremo qui una sintesi semplificata delle argomentazioni sviluppate per esteso nella memoria sopra citata. La presenza di plot non attribuibile ai frammenti del DC9 è stata ricavata applicando tre criteri che possono essere sinteticamente indicati come:

1. Criterio di Newton⁸
2. Criterio di coerenza⁹
3. Criterio di Lockerbie¹⁰

3.2.1 Criterio di Newton

La legge del moto, cioè la corrispondenza tra la posizione di un oggetto ed il tempo, è determinata esclusivamente dalle forze applicate al corpo, dalla sua massa e dalle condizioni iniziali, cioè dalla posizione e dalla velocità ad un certo istante, assunto come istante iniziale: è questo il contenuto della legge di Newton della meccanica.

Questa legge ha avuto nella storia della fisica e della scienza un ruolo ben più ampio di quello, pure amplissimo, di giustificare il moto dei corpi: essa infatti è l'esempio più tipico di legge **deterministica**, cioè di legge che afferma la assoluta prevedibilità dell'evoluzione delle grandezze fisiche.

La legge di Newton ha una applicazione particolarmente rilevante nel caso in esame: essa infatti non solo permette di determinare, una volta nota le forze applicate e la posizione del corpo ad un certo istante, la posizione che il corpo assumerà in tutti gli istanti successivi, ma anche,

⁷ Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995.

⁸ Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995; Capitolo 5, intitolato *Rilevamenti successivi all'incidente; 1° livello di analisi*.

⁹ Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995; Capitolo 6 intitolato *Rilevamenti successivi all'incidente; 2° livello di analisi*.

¹⁰ Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995; Capitolo 8 intitolato *Confronto con l'incidente di Lockerbie*.

risalendo a ritroso nel tempo, in quale posizione si doveva trovare il corpo in un qualsiasi istante **precedente** a quello assunto come iniziale.

Nel caso che qui interessa¹¹, di un corpo che si muove in aria, è facile individuare quali sono le forze applicate: se non si tratta di un velivolo, cioè di un corpo sottoposto alla forza dovuta alla spinta dei motori, le forze applicate sono semplicemente quella di gravità e quella aerodinamica, dovuta al fatto che il corpo si muove rispetto al fluido che lo circonda. Nel caso invece che si tratti di un velivolo bisognerà aggiungere a queste forze la spinta dovuta ai motori.

Dal punto di vista della meccanica, al momento dell'incidente, il DC9 ha subito una variazione delle forze applicate: all'atto dell'incidente infatti hanno cessato di funzionare i motori, e quindi è venuta a mancare una delle forze applicata alla massa del velivolo. I singoli frammenti si sono trasformati in quello che in meccanica è detto un corpo in *caduta libera*, cioè un corpo cui sono applicate solo le forze di gravità e le resistenze aerodinamiche. Cruciale è il fatto che la dinamica di un corpo in caduta libera e quindi la sua legge del moto è diversa da quello di un velivolo poiché sono diverse le forze loro applicate; è possibile quindi facilmente discriminare tra i due corpi.

Si noti come dai dati radar sia possibile ricavare proprio la legge del moto; da essi è infatti possibile dedurre, per ogni istante, la posizione assunta dai vari frammenti. Se tutti gli echi radar fossero attribuibili a frammenti del DC9 essi dovrebbero obbedire alla legge del moto di un corpo in caduta libera, e le traiettorie di tutti i frammenti dovrebbero ovviamente avere origine nel punto e nell'istante nel quale il DC9 ha subito l'incidente, che sono noti perchè sono circa quelli in cui ha cessato di funzionare il radar secondario¹².

I singoli frammenti si muoveranno quindi sotto l'azione della forza di gravità, e delle forze aerodinamiche. Le forze di gravità sono rappresentate dal peso di ciascun frammento.

Una analisi più approfondita è necessaria per le forze di natura

¹¹ Abbiamo analizzato in modo completo questo caso nell'Appendice C di **Algo-stino F., Pent M., Tartaglia A., Vadamchino M., Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino, 27.10.1995.** Diamo qui una sintesi semplificata delle argomentazioni là sviluppate.

¹² La posizione e l'istante dell'incidente sono stati calcolati nel Capitolo 4 di **Algo-stino F., Pent M., Tartaglia A., Vadamchino M., Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino, 27.10.1995.**

aerodinamica: esse difatti dipendono dalla forma dell'oggetto, dalle sue dimensioni, dalla massa e dalla velocità con cui l'oggetto si muove rispetto al fluido che lo circonda ed hanno direzione opposta rispetto a quella del moto. Si noti che la velocità rispetto al fluido non coincide con quella rispetto al suolo, a causa del vento che era presente sul luogo dell'incidente. Queste forze non sono in realtà note in quanto non sono note la forma, le dimensioni e quindi la massa dei pezzi nei quali si è spezzato il DC9; è possibile però fare uno studio parametrico che tenga conto di tutte le possibili forme e dimensioni dei frammenti.

Le forze di natura aerodinamica sono determinate dal parametro R definito dalla:

$$R = \frac{mg}{C_D A} \quad (3.1)$$

dove m è la massa, g l'accelerazione di gravità, C_D un fattore che dipende dalla forma ed A la sezione normale dell'oggetto.

I diversi frammenti nei quali si è spezzato il DC9 possedevano diverse forme, dimensioni e masse e quindi R diverse e di conseguenza hanno seguito traiettorie diverse, traiettorie tutte originate nel punto e nell'istante dell'incidente; questo fatto ha trovato conferma nella posizione in mare nella quale sono stati trovati i frammenti stessi¹³.

La posizione dei successivi echi radar permette di determinare la posizione e l'istante nel quale è presente l'oggetto che produce l'eco. Non è naturalmente possibile sapere quale fosse l'oggetto, si sa solo che ha prodotto un eco radar.

Il carattere deterministico della legge del moto e la possibilità di definire a ritroso la posizione dell'oggetto permette di definire, per ciascuna posizione di un eco, una porzione di spazio, da noi chiamato *poligono delle origini*, da cui deve essere partito il frammento che ha dato luogo a quell'eco. La necessità di definire una porzione di spazio e non un punto dipende dal fatto che non conosciamo la massa ed il valore di R dell'oggetto che ha prodotto l'eco; ciascuno dei punti appartenenti a questo spazio corrisponde infatti ad uno dei valori possibili della massa e di R .

¹³Ipotezziamo, per semplicità di descrizione, in questa parte nella quale descriviamo semplicemente il metodo utilizzato, che il DC9 si sia disintegrato istantaneamente; in realtà, come si desume anche dalla nostra analisi dei dati radar, il processo di disintegrazione è durato alcuni secondi.

L'osservazione fondamentale a questo punto è che, se il punto nel quale è avvenuto l'incidente è contenuto nel poligono delle origini relativo ad un certo eco, l'eco può essere considerato come prodotto da un frammento appartenente al DC9; se invece non vi appartiene, esso deve essere considerato un oggetto volante estraneo al DC9.

L'analisi effettuata applicando questo criterio ci portava a concludere che¹⁴

Sono interpretabili come echi di frammenti originati nel punto dell'incidente i plot 2a, 4, 6, 8b, 13b, 15, 16, 18. Va notato tuttavia che il punto 13b si trova ai limiti della fascia di incertezza, per cui la sua interpretazione come frammento va intesa con qualche cautela.

I plot 17, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 presentano un poligono delle origini che, pur non includendo il punto dell'incidente, attraversa la traiettoria¹⁵ in un punto temporalmente successivo, e quindi è pensabile siano interpretabili come frammenti distaccatisi successivamente¹⁶.

I rimanenti plot 1, 2b, 3, 5, 7, 8a, 9a, 9b, 10, 11, 12, 13a, 19 non sono interpretabili come frammenti originati nel punto dell'incidente.

Confermiamo quindi totalmente queste conclusioni e vogliamo solo fare un commento ad alcune osservazioni, peraltro più formali che sostanziali, che sono state fatte a proposito di questa nostra relazione. Il perito Paolo Santini ha infatti redatto alcune osservazioni, approvate anche dal perito Aurelio Misiti¹⁷, in seguito indicati come SM, relative proprio all'Appendice C della nostra relazione¹⁸; le osservazioni riguardano specificatamente le procedure di calcolo delle traiettorie.

¹⁴ **Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.**, *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995; pag. 77.

¹⁵ del DC9

¹⁶ Si noti come l'analisi radar permetta di ricavare come la rottura del DC9 non sia avvenuta istantaneamente, fatto questo confermato dalla posizione dei relitti recuperati.

¹⁷ **Santini P., Misiti A.**, *Documento 8. Appendice C - Traiettorie di caduta dei relitti del DC9*, 25.6.1996.

¹⁸ **Algotino F., Cancelli C. Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.**; *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, 22.11.1994.

Stimiano queste osservazioni assolutamente inconsistenti, e confermiamo che il metodo seguito per determinare le traiettorie di caduta dei frammenti si basa precisamente, come da noi scritto, sull'integrazione numerica delle equazioni C5, C6, C7 e delle:

$$\frac{dx}{dt} = v_x \quad (3.2)$$

$$\frac{dy}{dt} = v_y \quad (3.3)$$

$$\frac{dz}{dt} = v_z \quad (3.4)$$

con le condizioni iniziali appropriate per ogni singolo passo. Il termine *risolvere* è adeguato nel senso evidente del termine¹⁹. Poichè si tratta di una equazione differenziale *risolvere* vuole dire *integrare*, termine usato anche se si utilizza un metodo algebrico. Di queste equazioni non è nota peraltro una soluzione algebrica; se lo fosse sarebbe ovviamente adatta anche alla meccanica del volo come a qualsiasi altra applicazione.

Il riferimento alle equazioni 7.11, 7.12 e 3.4 è implicitamente contenuto nell'espressione *integrazione numerica* del paragrafo C.2 (terza e quarta riga) che ha sollevato le obiezioni di SM: il punto non è stato reso più esplicito di così perchè lo si è ritenuto ovvio e banale.

La procedura seguita è assolutamente standard, ma qui spieghiamo i passi seguiti in maggiore dettaglio. Essi sono:

1. Discretizzazione delle equazioni C5, C6 e C7 (col che esse da differenziali si trasformano in algebriche). Il passo temporale prescelto è stato generalmente $\delta t = 0,1 s$; la sensibilità del metodo al valore di δt è in realtà variabile lungo la traiettoria, tuttavia simulazioni effettuate con valori diversi hanno indicato che $0,1 s$ era in generale adeguato (considerando anche le incertezze ben maggiori derivanti dall'approssimazione con cui erano note le condizioni iniziali alle diverse quote); solo per i valori più elevati di R (e quindi per i tempi di caduta più brevi) si sono utilizzati i valori $\delta t = 0,05 s$ e $\delta t = 0,01 s$.

¹⁹Dizionario Garzanti della Lingua Italiana, Garzanti 1970. Alla voce *risolvere* si legge ...trovare la soluzione di qlco.

2. Introduzione delle condizioni iniziali alla quota considerata.
3. Soluzione delle equazioni (essendo esse algebriche, a questo punto anche la semantica è salva) rispetto a v_x , v_y , e v_z .
4. Discretizzazione delle equazioni 7.11, 7.12 e 3.4.
5. Introduzione dei valori di v_x , v_y , e v_z così trovati sempre nelle equazioni 7.11, 7.12 e 3.4.
6. Soluzione rispetto a x, y, z .
7. Determinazione del valore dei parametri relativi alla nuova quota.
8. Ripetizione dell'intero ciclo a partire dai valori di v_x, v_y, v_z appena calcolati e con i parametri relativi alla nuova quota.

La procedura continua fino a quando si ottiene un valore negativo della quota z (che vuole dire che l'oggetto è finito al di sotto della superficie marina; come coordinata del punto di impatto si adottano quelle dell'ultimo o penultimo punto dalla superficie marina a seconda di quale dei due ha un valore assoluto di z minore).

Non vi è dunque nulla di strano se il risultato finale è, come dicono SM, *vicino alla soluzione corretta*, in quanto questa è **la soluzione corretta** (anche se i metodi pratici di integrazione numerica utilizzabili sono più di uno) e quindi i risultati sono corretti (non solo vicini) nel senso che essi stanno, rispetto ai valori analitici (non determinabili) entro un raggio variabile (in quanto si è usato un passo temporale fisso), ma sempre inferiore al metro.

In conclusione vogliamo porre in evidenza il fatto che SM, a parte alcune critiche di carattere esclusivamente formale, alle quali abbiamo qui risposto, confermano la validità dei risultati da noi ottenuti.

3.2.2 Criterio di coerenza

Come sopra detto il criterio di Newton individua alcuni plot come echi dovuti ad oggetti che al momento dell'incidente non si trovavano nel punto nel quale si trovava il DC9 e quindi non possono essere considerati frammenti del DC9. L'interpretazione dell'origine di questi plot può essere duplice; da un lato si può pensare che si tratti di falsi plot e dall'altro

che siano causati da oggetti effettivamente presenti. In questo secondo caso essi devono obbedire ad un ulteriore criterio che abbiamo chiamato di *coerenza*; deve essere cioè possibile collegare tra di loro questi plot, che non sono attribuibili ai frammenti del DC9, in modo che la sequenza di posizioni e tempi individuino una *traiettoria* e che questa traiettoria corrisponda ad un velivolo la cui velocità e la cui accelerazione siano compatibili con quelle che possono essere assunte da un velivolo reale. Più precisamente²⁰:

Una traiettoria è costituita da un insieme di punti, definiti nello spazio $[R, \Theta, t]$ (cioè distanza, azimuth e tempo), logicamente raggruppabili per contiguità spaziale e temporale, e tali da poter essere approssimati, o interpolati da funzioni $R(t), \Theta(t)$ che soddisfano alle seguenti condizioni:

- *siano assicurate le continuità di posizione e velocità;*
- *velocità ed accelerazione siano, in ogni punto della traiettoria, compatibili con traiettorie di tipo aeronautico, cioè non superiori (in valore assoluto) ai limiti massimi tollerabili da oggetti aeronautici;*
- *nel caso di traiettorie approssimate, gli scostamenti tra i punti rilevati e quelli approssimati ottenuti mediante interpolazione siano inferiori ai limiti di errore (in azimuth e distanza) propri del radar...*

Pertanto, qualora si riescano ad individuare insiemi di punti che soddisfano a tali condizioni, rimangono individuate altrettante traiettorie e di conseguenza altrettanti oggetti distinti.

Come si è notato nel paragrafo precedente un certo numero di plot non sono interpretabili come frammenti del DC9; si tratta di plot relativi a scansioni radar con numero d'ordine inferiore a 13. Per poter correttamente applicare il criterio di coerenza e verificare se questi plots possono appartenere ad una traiettoria è stata effettuata una analisi ulteriore, che è stata detta di secondo livello²¹. Lo scopo di questa analisi

²⁰ *Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino, 27.10.1995, pag. 139*

²¹ *Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino, 27.10.1995, Capo 6.*

era di utilizzare tutte le informazioni disponibili nei dati radar²² al fine di permettere una più precisa collocazione spazio-temporale dei plot, verificando ulteriormente la loro attribuzione a frammenti del DC9.

L'applicazione di questo criterio permette di individuare tre traiettorie; due di queste si raccordano con i plot -17 e -12 e permettono quindi di²³:

ipotizzare la presenza di due velivoli di tipo militare che viaggiano di conserva su una rotta circa parallela al DC9; i rilevamenti -17 e -12 potrebbero essere dovuti al fatto che in corrispondenza di essi i due velivoli, che singolarmente danno dei ritorni radar insufficienti per la loro visibilità, danno luogo a un ritorno radar combinato di entità maggiore, tale da produrre i rilevamenti in questione.

Una terza traiettoria si origina da punti della traiettoria del DC9 che, per alcune loro anomalie, avevano fatto ipotizzare la presenza di un aereo nascosto sotto il DC9: viene naturale quindi pensare che questi plot appartengano alla traiettoria di questo velivolo. In conclusione lo scenario che si ricava da questa analisi è stato così descritto²⁴:

Nell'ultima parte del volo il DC9 è affiancato da due velivoli che percorrono una rotta circa parallela a quella del DC9, ad una distanza di circa 30 NM ad Ovest del DC9; poco prima dell'incidente, i due velivoli compiono una virata verso Est e si separano, percorrendo due traiettorie distinte (separazione tra le traiettorie di circa 1 NM). Le due traiettorie convergono su un'unica traiettoria in direzione Est che i due aerei percorrono distanziati di circa 30 s, scomparendo al radar in direzione Est.

Il DC9 Ilavia è seguito, nell'ultima parte del volo, da un velivolo relativamente piccolo, che percorre approssimativamente la stessa rotta del DC9 mantenendosi nella sua "ombra" radar; poco prima del momento dell'incidente, il velivolo

²² Algostino E., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995, pag. 91.

²³ Algostino E., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995, pag. 166.

²⁴ Algostino E., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995, pag. 4

in questione compie una virata verso sinistra e quindi scompare al radar in direzione approssimativamente verso Est.

3.2.3 Criterio di Lockerbie

Il terzo criterio, che abbiamo chiamato di Lockerbie, è stato suggerito dal fatto singolare che le condizioni di volo del DC9 e del Boeing 727, distrutto da un attentato nel cielo di Lockerbie il 21.12.1988, erano al momento dell'incidente, simili²⁵. Poichè è accertato che il Boeing 727 è stato distrutto da una bomba e poichè tale evento è stato seguito dai radar, veniva naturale verificare se la dinamica temporale dei plot radar nei due casi presentasse o meno delle analogie. Applicando questo criterio è stato possibile individuare un certo numero di plots registrati dal radar di Fiumicino, relativi quindi all'incidente del DC9, il cui comportamento era difforme a quello del caso di Lockerbie. Dato fondamentale ed a nostro avviso conclusivo era che i plot anomali erano gli stessi che, in base ai due criteri precedenti, non era stato possibile attribuire ai frammenti del DC9 e che rappresentano traiettorie di oggetti in volo.

Premessa

A proposito del confronto fra i dati dell'incidente di Ustica e quelli relativi all'incidente di Lockerbie, i Pubblici Ministeri nella loro requisitoria²⁶ ritengono la comparazione da noi proposta *non completamente attendibile*, soprattutto in relazione alle *dinamiche di funzionamento dell'apparato radar*. In particolare, essi affermano che:

non è possibile valutare se anch'esso [radar di Lockerbie] fosse affetto dagli errori e dalle anomalie che invece caratterizzavano i radar di Fiumicino, ed in particolare il Marconi.

In sostanza, si afferma che la mancanza di informazioni relative alla precisione dei rilevamenti radar del caso Lockerbie non consente di *attribuire al confronto un valore di positivo accertamento.*

²⁵ *Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M., Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino, 27.10.1995; Paragrafo 8.2.*

²⁶ *Requisitorie del Pubblico Ministero, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (ed. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 266.*

In questo documento verranno presentate ulteriori analisi dei dati radar relativi all'incidente di Lockerbie finalizzate a individuare una stima della precisione dei rilevamenti, allo scopo di consentire una valutazione di tipo quantitativo, che consenta di attribuire al confronto quel valore di *positivo accertamento* a cui fanno riferimento i Pubblici Ministeri nella loro requisitoria citata.

Valutazione della precisione dei rilevamenti radar di Lockerbie

Questo problema presenta notevoli difficoltà sul piano metodologico, dovute soprattutto alla mancanza di informazioni documentarie sulle caratteristiche dei radar che hanno prodotto i rilevamenti disponibili, ma anche al fatto che i rilevamenti contenuti nella documentazione sull'incidente sono il frutto dell'integrazione di più rilevamenti da parte di radar differenti.

Questo fatto fa sì che gli unici elementi sui quali basare la stima della precisione siano gli stessi rilevamenti, e quindi la metodologia adottata prescinde dalla conoscenza specifica delle caratteristiche dei singoli radar e delle modalità di fusione dei dati.

La metodologia adottata consente solamente una valutazione approssimata della precisione; tuttavia adatteremo appropriate tecniche in modo da ottenere, come risultato, una valutazione "pessimistica" della precisione; ciò vuol dire che la precisione effettiva è superiore a quella da noi utilizzata. Tale valutazione è tuttavia, a nostro giudizio, sufficiente per trarre conclusioni più circostanziate sulla validità del confronto fra le due situazioni.

Se fosse possibile individuare una sequenza temporale di plot associabili ad uno stesso oggetto, e pertanto in grado di individuare una traiettoria, dal confronto fra la traiettoria ideale e quella reale rappresentata dalla sequenza di plot sarebbe possibile ricavare informazioni relative alla precisione del radar stesso.

Tuttavia nel caso in esame una simile procedura non è percorribile, in quanto per ciascuna osservazione sono disponibili più rilevamenti e pertanto non è ricostruibile una traiettoria associabile ad uno specifico oggetto.

In alternativa, possiamo considerare, per ciascun istante di osservazione, il baricentro della distribuzione dei rilevamenti di quel particolare istante. Le coordinate X_j, Y_j di tale punto virtuale sono definite

come:

$$X_j = \frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} x_j^{(k)}$$

$$Y_j = \frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} y_j^{(k)}$$

dove $x_j^{(k)}, y_j^{(k)}$ sono le coordinate del k -simo rilevamento all'istante j e N_j è il numero di rilevamenti all'istante j .

Chiaramente questo punto non rappresenta il centro di massa dei frammenti che danno luogo a rilevamenti radar, ma unicamente il baricentro *geometrico* delle posizioni di tali frammenti. Tuttavia questo punto è in una certa misura rappresentativo della distribuzione dei frammenti nel periodo immediatamente successivo al momento dell'incidente.

Anche questo punto virtuale si muove, dopo l'incidente, seguendo una traiettoria che non è calcolabile a priori, ma che, per brevi tratti è certamente approssimabile come rettilinea.

Consideriamo allora un segmento della traiettoria del baricentro geometrico definito come sopra; noti i punti rilevati è possibile ricavare la migliore approssimazione possibile di tipo rettilineo con la ben nota tecnica della regressione lineare. Inoltre è possibile valutare l'entità del valore quadratico medio (varianza) dello scostamento rispetto all'approssimazione lineare.

Analizziamo ora le cause che fanno scostare la traiettoria reale del baricentro geometrico rilevato da una traiettoria rettilinea; esse sono:

1. la legge del moto del baricentro non esattamente rettilinea;
2. la variabilità aleatoria delle sezioni equivalenti radar dei frammenti;
3. gli errori del sistema radar.

Chiaramente ciascuna di tali cause contribuisce alla varianza dello scostamento, ed, essendo tali cause fra di loro indipendenti, la varianza totale dello scostamento sarà la somma dei contributi delle varie cause.

Mentre è possibile valutare la varianza totale con la tecnica precedentemente enunciata, non abbiamo nessun elemento per suddividere

tale varianza totale fra le varie cause sopra elencate. Tuttavia se, una volta ricavata la varianza totale, la attribuiamo completamente agli errori del radar, otteniamo certamente quella che abbiamo chiamato una stima pessimistica (cioè approssimata per eccesso) della varianza delle osservazioni radar.

Seguendo tale procedura, l'intero insieme dei rilevamenti radar disponibili è stato suddiviso in 8 "clusters", corrispondenti agli 8 tempi di rilevamento. Si sono costruiti, per ciascuno dei "clusters" i rispettivi baricentri, e la traiettoria descritta da tali baricentri è stata suddivisa in due tratti, il primo (individuato come tratto A) comprendente i primi 4 punti, e il secondo (individuato come tratto B) comprendente i rimanenti 4 punti.

Eseguendo separatamente sui due tratti le regressioni lineari e valutando le varianze degli scostamenti si sono ottenuti i seguenti risultati:

Dev. standard (m)	tratto A	tratto B
σ_X	120.0	96.8
σ_Y	50.6	116.7

Tali pertanto risultano le varianze (approssimate per eccesso) dei baricentri delle rilevazioni radar. Tuttavia siamo interessati a stimare le varianze associate alle singole osservazioni. Per ottenere tale risultato, ricordiamo che la varianza σ_X^2 della variabile X_j definita come media delle N_j variabili casuali $x_j^{(k)}$, $k = 1, \dots, N_j$ nell'ipotesi che queste ultime abbiano la stessa varianza σ_x^2 , è legata a quest'ultima dalla relazione:

$$\sigma_X^2 = \frac{\sigma_x^2}{N_j - 1}$$

per cui, invertendo la relazione, si ottiene:

$$\sigma_x^2 = \sigma_X^2 (N_j - 1)$$

I valori di N_j variano chiaramente da "cluster" a "cluster"; tuttavia, per ricavare un limite superiore, adotteremo, per ciascuno dei due tratti in cui abbiamo suddiviso la traiettoria del baricentro, il massimo valore di N_j , che in particolare vale 6 per il tratto A e 9 per il tratto B. Sulla base di tali valori si possono ricavare le deviazioni standard delle coordinate dei plot per i due tratti, ottenendo:

Dev. standard (m)	tratto A	tratto B
σ_x	268.3	273.8
σ_y	113.1	330.0

Scegliendo il più grande fra i quattro valori ottenuti, possiamo affermare che la deviazione standard dell'errore delle osservazioni radar di Lockerbie è inferiore a 330 m.

Formulazione quantitativa del criterio "Lockerbie"

Una prima ovvia considerazione nasce dal confronto fra il risultato precedentemente individuato e la deviazione standard stimata per il radar di Fiumicino, valutata (per la componente azimutale) in circa 2600 m: il radar di Lockerbie presenta una precisione molto migliore rispetto a quella del radar di Fiumicino. Questo significa che i rilevamenti radar del caso Lockerbie possono ritenersi praticamente esatti, nel senso che individuano con buona precisione le zone dove, in caso di esplosione interna, dovrebbero venire a trovarsi i frammenti del velivolo dopo l'esplosione stessa.

Pertanto alla luce dei risultati ottenuti il confronto a suo tempo sviluppato nella nostra precedente relazione assume maggiore consistenza.

Possiamo tuttavia ulteriormente approfondire l'analisi con l'obiettivo di attribuire all'incidente di Lockerbie la qualità di *incidente probatorio* nei confronti del caso Ustica, alla ricerca del valore di *positivo accertamento* in qualche misura richiesto dai Pubblici Ministeri nella loro requisitoria.

In effetti, se si volesse organizzare un esperimento, sul tipo di quelli utilizzati nell'ambito delle perizie esplosivistiche, destinato a riprodurre le condizioni in cui è avvenuto l'incidente e a verificare l'ipotesi di esplosione interna, si dovrebbe allestire un aereo, provvisto di una carica esplosiva collocata opportunamente, lo si dovrebbe far decollare e portare alla quota e alla velocità voluta, quindi far avvenire la detonazione e studiare gli effetti significativi in relazione alla caduta dei frammenti.

Ma la successione degli eventi sopra ipotizzata è proprio quella avvenuta nel cielo di Lockerbie, e le similitudini in termini di quota, velocità e direzione del vento consentono, con le correzioni a suo tempo

discusse, di utilizzare l'incidente di Lockerbie alla stregua di esperimento significativo nei confronti dell'incidente di Ustica.

Per approfondire questi aspetti possiamo fare ricorso ad un esperimento concettuale così concepito:

- si consideri un oggetto (ostacolo) la cui posizione reale è definita dalle coordinate x_0, y_0 .
- si supponga che tale oggetto venga osservato da due sistemi radar differenti, che nel seguito indicheremo come 1 e 2, ciascuno dei quali caratterizzato da una deviazione standard σ_i , con $i = 1, 2$. Chiaramente i due sistemi in questione rappresentano uno il sistema radar di Lockerbie e l'altro quello di Fiumicino,
- ciascuno dei sistemi radar fornisce una stima della posizione dell'oggetto; indicheremo con x_1, y_1 le coordinate prodotte dal radar 1 e con x_2, y_2 quelle prodotte dal radar 2.

Faremo inoltre alcune ipotesi semplificative, tenendo sempre presente, tuttavia, l'esigenza di individuare limiti superiori che possano assicurare l'affidabilità dei risultati raggiunti; in particolare:

- assumiamo che la deviazione standard dell'errore commesso da ciascun radar sia uguale per le due coordinate x e y
- il valore numerico attribuito alle due deviazioni standard sarà, per ciascuno dei due radar, il massimo fra quelli osservati: per il radar di Fiumicino (radar 1) assumeremo allora $\sigma_1 = 2600 m$ mentre per quello di Lockerbie (radar 2) assumeremo $\sigma_2 = 330 m$
- assumiamo che la statistica degli errori sia Gaussiana e che gli errori da cui sono affetti i due radar siano indipendenti

Con tali premesse possiamo scrivere le espressioni dei rilevamenti dei due radar secondo le seguenti equazioni:

$$x_1 = x_0 + \Delta x_1$$

$$y_1 = y_0 + \Delta y_1$$

$$x_2 = x_0 + \Delta x_2$$

$$y_2 = y_0 + \Delta y_2$$

dove Δx_1 e Δy_1 sono variabili casuali gaussiane, a valore medio nullo e deviazione standard σ_1 , mentre Δx_2 e Δy_2 sono variabili casuali Gaussiane, a valore medio nullo e deviazione standard σ_2 .

Ricaviamo ora le componenti del vettore che rappresenta la differenza fra le due osservazioni; indicando con u la componente lungo x e con v quella lungo y , avremo:

$$u = x_1 - x_2 = \Delta x_1 - \Delta x_2$$

$$v = y_1 - y_2 = \Delta y_1 - \Delta y_2$$

Si vede subito che entrambe le componenti sono ancora variabili casuali Gaussiane, a valore medio nullo e con uguale varianza σ^2 :

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

Possiamo ora determinare le caratteristiche statistiche della lunghezza r del vettore (che rappresenta la distanza fra le due osservazioni) e della sua orientazione ϕ . E' immediato dedurre che la variabile casuale r ha una densità di probabilità alla Rayleigh, mentre la variabile casuale ϕ ha una distribuzione uniforme tra 0 e 2π .

Fatte queste premesse possiamo ora valutare la probabilità che gli eventi osservati sperimentalmente siano riconducibili al modello di esperimento concettuale precedentemente delineato; ciò significa valutare la probabilità che le differenze di posizione osservate nel caso Ustica e nel caso Lockerbie siano riconducibili all'osservazione dello stesso oggetto e pertanto, tenuto conto che nel caso Lockerbie tutti gli oggetti osservati sono frammenti del velivolo, che anche nel caso di Ustica le osservazioni radar si riferiscano a frammenti del velivolo stesso.

Per tali valutazioni possiamo fare riferimento alla stessa modalità di rappresentazione geometrica utilizzata nella precedente memoria che, ricordiamo, considera:

- il punto corrispondente ad una osservazione del radar di Fiumicino;
- il poligono convesso contenente tutti i rilevamenti del radar di Lockerbie relativi ai tempi di osservazione immediatamente precedente e immediatamente seguente l'istante di osservazione del radar di Fiumicino.

In tutti i casi considerati il rilevamento Fiumicino è *esterno* al poligono Lockerbie (Si veda Figura 1A). Il vettore differenza avrà un estremo sul rilevamento di Fiumicino, mentre l'altro estremo sarà un qualunque punto interno al poligono di Lockerbie. La probabilità che ci interessa valutare è appunto la probabilità che l'estremo del vettore differenza stia all'interno del poligono, e ciò è ottenibile mediante l'integrazione della densità di probabilità del vettore differenza sulla regione definita dal poligono di Lockerbie.

Per ottenere espressioni più maneggevoli sul piano analitico, considereremo una regione di integrazione più ampia che comunque contiene al suo interno il poligono di Lockerbie (Si veda Figura 1B). Si tratta di un arco di corona circolare, compresa fra una distanza minima r_{min} e una distanza massima r_{max} , con un'apertura ϕ_0 tale da contenere al suo interno tutti i punti contenuti nel poligono Lockerbie.

Con tale sostituzione la probabilità P di interesse vale:

$$P = \frac{\phi_0}{2\pi} (e^{-\frac{r_{min}^2}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{r_{max}^2}{2\sigma^2}})$$

Con tale procedura è possibile calcolare il valore di P per ciascuno dei rilevamenti del radar di Fiumicino. L'utilizzazione di tali probabilità calcolate al fine di valutare la possibilità che i rilevamenti di Fiumicino siano o meno attribuibili a frammenti richiede una ulteriore considerazione.

In effetti occorre costruire un termine di riferimento con cui paragonare tali probabilità, e tale termine di riferimento si ottiene applicando la medesima procedura ai punti che rappresentano i vertici del poligono di Lockerbie: in tale modo si tiene conto del risultato del nostro esperimento concettuale se applicato a uno dei rilevamenti di Lockerbie, che sicuramente è associato ad un frammento del velivolo. Tale probabilità di riferimento, che indicheremo con P_r , può essere valutata con la stessa procedura di cui sopra.

Possiamo infine costruire il rapporto $\eta = P/P_r$ e sulla base di tale rapporto sviluppare le valutazioni circa l'attribuibilità dei rilevamenti del radar di Fiumicino a eventuali frammenti del velivolo:

- se P è dello stesso ordine di grandezza di P_r , cioè η è vicino all'unità, possiamo sicuramente interpretare tale eco come relativo a un frammento. Per tale condizione abbiamo fissato il limite $\eta > 0.3$.
- se P è per contro molto inferiore a P_r , possiamo ritenere l'eco come sicuramente non attribuibile a un frammento e quindi da attribuire ad un oggetto diverso. Per tale condizione abbiamo fissato il limite $\eta < 0.15$.
- negli altri casi (cioè per $0.15 < \eta < 0.3$) ci troviamo in una condizione di incertezza, non potendo attribuire con sicurezza quel particolare eco all'una o all'altra categoria.

I risultati ottenuti applicando tale metodologia sono rappresentati nella tabella che segue.

Plot	P	P_r	η	Attribuzione
1	0.007	0.104	0.074	ALTRO
2a	0.134	0.176	0.760	FRAMMENTO
2b	0.005	0.176	0.030	ALTRO
3	0.041	0.176	0.236	INCERTO
4	0.122	0.512	0.238	INCERTO
5	0.056	0.512	0.111	ALTRO
6	0.146	0.647	0.225	INCERTO
7	0.123	0.647	0.190	INCERTO
8a	0.111	0.787	0.141	ALTRO
8b	0.277	0.787	0.352	FRAMMENTO
9a	0.025	0.787	0.031	ALTRO
9b	0.126	0.787	0.159	INCERTO
10	0.119	0.787	0.151	INCERTO
11	0.171	0.778	0.220	INCERTO
12	0.007	0.778	0.009	ALTRO

Le conclusioni che si possono trarre al termine di tale analisi sono del tutto analoghe a quelle a suo tempo ricavate con una procedura più approssimativa, e si possono così riassumere:

- Dei 15 plot esaminati solo due (e precisamente i plot 2a e 8b) sono interpretabili sicuramente come echi di frammenti del velivolo;
- Sei dei 15 plot (e precisamente i plot 1, 2b, 5, 8a, 9a e 12) sono interpretabili sicuramente come echi di altri oggetti e non di frammenti;
- Per i rimanenti 7 plot l'attribuzione rimane incerta. Si noti in ogni caso come per i plot 9b e 10 il valore di η sia vicino alla soglia

Come si vede i risultati ottenuti con questo metodo più raffinato confermano i risultati della nostra precedente relazione²⁷.

3.3 Gli aerei vicino al DC9

Molti sforzi sono stati dedicati, sin dall'inizio delle indagini, ad accertare se aerei non identificati avevano volato in prossimità del DC9; è noto come anche un approssimato esame dei dati radar di Fiumicino possa immediatamente suggerire che, al momento dell'incidente, più di un aereo estraneo fosse vicino al DC9.

Questa fatto è stato rigorosamente confermato in una nostra memoria²⁸ della quale abbiamo sopra brevemente ricordato i punti salienti; nasce a questo punto la logica necessità di accertare la provenienza dell'aereo o degli aerei estranei, che al momento dell'incidente erano sicuramente vicino al DC9, allargando i limiti temporali e spaziali dell'indagine sui dati radar²⁹.

In una prima memoria³⁰ abbiamo mostrato come ci sono precise indicazioni che un aereo con trasponder spento abbia viaggiato di conserva con il DC9 e come tra l'altro esso riveli la sua presenza proprio alcuni istanti prima dell'incidente.

²⁷ **Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.**, *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995, pag. 198.

²⁸ **Algotino F., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.**, *Analisi dello scenario fornito dai dati radar di Fiumicino*, 27.10.1995.

²⁹ Si noti come l'interesse per uno scenario aereo più ampio, che riguarda l'intero viaggio del DC9 si possa ricavare anche dalle testimonianze. Si veda *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 486.

³⁰ **Pent M., Vadacchino M.**; *Analisi dei rilevamenti dei radar di Fiumicino: dati precedenti l'incidente*, 21.5.1992.

Successive indagini compiute da un Collegio Radaristico composto da Dalle Mese, Donali e Tiberio hanno individuato un certo numero di risposte radar di solo primario che davano luogo a traiettorie circa parallele a quella seguita dal DC9; il collegio radaristico stimò che tali risposte corrispondessero a traiettorie di velivoli effettivamente volanti di conserva con il DC9. Una caratteristica di tali plot, che non pare essere stata notata dal Collegio Radaristico, è che questi echi hanno una correlazione spaziale con analoghi echi prodotti dal DC9. Tale correlazione è tanto stretta, che pare difficile poter pensare che un velivolo sia stato in grado di collegare il proprio moto con quello del DC9, in modo così rigido. Tale caratteristica è stata invece notata dal perito Giubbolini che ha quindi attribuito tali echi ad un effetto strumentale; li ha più precisamente attribuiti a lobi laterali dell'antenna del radar primario, e quindi ad un *difetto* dell'antenna.

In una nostra relazione³¹ abbiamo mostrato come in realtà nessuna di queste due interpretazioni sia sostenibile e come sia proprio la presenza di un aereo vicino al DC9 la causa di questo fenomeno, anche se il meccanismo che lo produce è più complesso di quello, semplice e diretto, ipotizzato dal Collegio Radaristico.

A proposito dell'ipotesi del perito Giubbolini osservavamo che³²:

se tale fenomeno fosse dovuto ad un "difetto" dell'antenna, esso dovrebbe manifestarsi per la quasi totalità dei voli, e specialmente quelli che si svolgono a breve distanza dal radar, in particolare i voli in atterraggio o in partenza da Fiumicino o da Ciampino; ma questo fenomeno non si verifica.

Un altro fatto da evidenziare, non osservato in nessuna delle due relazioni, è che, da questo punto di vista, il DC9 presenta una particolarità essendo, fra tutti i voli di cui si dispone della registrazione radar, quello che presenta tale fenomeno nella misura di gran lunga maggiore, maggiore anche dei riscontri originati da velivoli di più grandi dimensione e quindi caratterizzati da radar cross-section maggiori.

³¹ Pent M., Vadacchino M., *Sull'interpretazione di alcune tracce di solo primario*, 30.6.1998

³² Pent M., Vadacchino M., *Sull'interpretazione di alcune tracce di solo primario*, 30.6.1998., pag. 4.

Una prima analisi statistica³³ delle caratteristiche fenomenologiche di questa anomalia, estesa a tutti i voli di cui si possiede registrazione, ha mostrato come la presenza di tale anomalia, pur interessando un certo numero di voli, fosse massima per il DC9. Si è quindi proceduto ad una caratterizzazione fisica più dettagliata del comportamento radaristico del DC9, confrontandolo con quello dei velivoli che, al momento dei rilevamenti anomali, si trovavano in prossimità del DC9. Si è quindi individuato il parametro fisico che governa il fenomeno: si tratta della sezione radar. Per quanto riguarda il DC9 esso appare avere una sezione radar ben maggiore di quella che corrisponderebbe alle sue effettive dimensioni. Questo fatto è giustificato³⁴

dalla presenza, nelle immediate vicinanze del DC9, di un altro velivolo che, confondendosi dal punto di vista del radar con il DC9 stesso, fa aumentare la sezione equivalente radar complessiva fino a renderla paragonabile a quella di un velivolo medio.

Concludevamo tale relazione scrivendo che³⁵

- 1. *L'analisi dei rilevamenti anomali osservati su voli diversi dal DC9 Itavia ha mostrato che per giustificare tali rilevamenti è necessario ipotizzare la presenza di vari lobi secondari nell'antenna del radar Marconi.*
- 2. *Il livello relativo (rispetto al lobo laterale) è decisamente più elevato di quanto normalmente riscontrato nelle antenne radar; bisogna pertanto ipotizzare qualche causa occasionale come giustificativa di tale anomalia;...*
- 3. *Sulla base dei rilevamenti anomali osservati su voli diversi dal DC9 è stato messo a punto un modello di studio in grado di rappresentare, sia pure in forma molto schematica, il comportamento del radar da questo punto di vista.*

³³Pent M., Vadacchino M., *Sull'interpretazione di alcune tracce di solo primario*; 30.6.1998., pag. 7.

³⁴Pent M., Vadacchino M., *Sull'interpretazione di alcune tracce di solo primario*; 30.6.1998, pag. 48

³⁵Pent M., Vadacchino M., *Sull'interpretazione di alcune tracce di solo primario*; 30.6.1998, pag. 48

- 4. *Applicando il modello di studio ai rilevamenti del DC9, si osserva come esso sia in grado di giustificare in termini di lobi laterali molti rilevamenti di solo primario osservati nell'intorno del DC9 stesso.*
- 5. *Con riferimento alla relazione Dalle Mese et. al. le tracce di solo primario denominate PR1, PR2, PR6, PR7, PR9, PR10, PR11, PR12 sono da ritenersi originate da rilevamenti anomali di altri aerei (1136, 5356 e 5357) tramite i lobi secondari dell'antenna. Le tracce denominate PR3, PR4 e PR5 invece corrispondono a oggetti reali.*
- 6. *Confrontando il comportamento, dal punto di vista della risposta ai lobi secondari, del DC9 con altri aerei che si sono trovati in condizioni simili, si osserva che i rilevamenti osservati sono molto più numerosi di quanto non ci si aspetti da un velivolo di tali dimensioni, comparabili invece con il comportamento di aerei di dimensioni maggiori.*
- 7. *È pertanto ipotizzabile la presenza di un secondo velivolo nelle immediate vicinanze del DC9 che artificiosamente ne aumenti la sezione equivalente radar, fino a renderlo paragonabile ad un velivolo di dimensioni medie.*

Contrariamente quindi a quanto sostenuto dai Pubblici Ministeri nella loro Requisitoria³⁶ riaffermiamo che, sulla base delle analisi qui descritte, uno o più aerei hanno interferito con il volo del DC9.

3.3.1 Ulteriori considerazioni sull'interpretazione dei plot -17 e -12

È noto come ad Ovest della traiettoria del DC9, rispettivamente 17 e 12 battute radar prima dell'incidente siano stati registrati due plot indicati come -17 e -12. La relazione della Commissione Misiti aveva stabilito

³⁶ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 336.

che tali rilevamenti non potevano essere associati con la presenza di un velivolo. In una nostra relazione da un lato si metteva in luce come tali deduzioni fossero fondate su valutazioni probabilistiche errate sul piano metodologico, dall'altro si proponeva una valutazione che, basandosi su una corretta impostazione matematica, portava alla conclusione opposta, nel senso che non poteva essere scartata l'ipotesi che tali plot fossero associabili alla presenza di un velivolo.

Una recente nota dei consulenti Santini e Misiti³⁷, a parziale correzione della precedente relazione, riconosce la correttezza del metodo proposto dalla parte civile, ma formula alcune riserve quanto ai valori numerici utilizzati per le valutazioni quantitative. A questo punto pare doveroso esprimere il nostro pensiero in merito a tali riserve.

Il metodo utilizzato si riduce a un test di accettazione basato sul criterio di verosimiglianza, cioè sul confronto fra le probabilità che, date le osservazioni e lo scenario, i plot -17 e -12 siano da attribuirsi ad un velivolo oppure siano da attribuirsi a falsi allarmi.

La quantità da esaminare dipende da vari parametri, ed in particolare:

- dalla probabilità di falso allarme P_{fa} , che è una caratteristica propria del radar
- dalla probabilità β che non vi sia nessun aereo nell'area di studio, che è una caratteristica dello scenario
- dal numero S di scansioni radar considerate nello studio
- dalla probabilità di rilevamento dell'ostacolo P_D , che è una caratteristica del bersaglio considerato.

Lo studio è stato condotto in forma parametrica rispetto ai parametri P_D e β , in quanto da un lato tali grandezze non sono note a priori, dall'altro si vuole proprio condurre una valutazione in funzione delle caratteristiche del potenziale aereo e dello scenario.

Le quantità P_{fa} e S sono state invece fissate in quanto desumibili da varie considerazioni. In primo luogo la probabilità di falso allarme è

³⁷Santini P. *Commenti e osservazioni su alcuni aspetti della relazione dei periti di parte civile*. 23.12.1997.

stata desunta da valutazioni contenute nella relazione della Commissione Misiti in relazione delle registrazioni disponibili; in effetti la probabilità di falso allarme è stata ricavata conteggiando tutte le risposte radar non riconducibili a echi di aerei o evidenti disturbi.

Per quanto riguarda S , si è assunto lo stesso valore usato nella Commissione Misiti nella versione originale.

Le riserve avanzate nell'ultima nota, redatta da Santini e Misiti, riguardano la mancata analisi parametrica rispetto a P_{fa} e S , e, in sostanza, tendono ad affermare che se si considerano *range* di valori sufficientemente ampi di tali grandezze, accade che l'ipotesi che i plot -17 e -12 debbano essere attribuiti ad un velivolo per determinati valori può essere rifiutata.

Questo approccio, a nostro avviso, non può essere accettato, in quanto lo studio si riferisce a questo preciso radar, e non a un generico radar la cui caratteristica di falso allarme possa variare fra 10^{-4} e 10^{-6} . Il valore utilizzato deriva, come già detto, da rilievi effettuati sui dati registrati, e rappresenta certamente la miglior stima possibile. Si può anzi affermare che tale stima è *conservativa* nel senso che qualora alcuni dei plot che sono stati considerati falsi allarmi fossero in realtà dovuti a velivoli privi di transponder o ad altri fenomeni come i cosiddetti "lobi laterali", il valore di P_{fa} sarebbe ancora minore, e ciò rafforzerebbe l'ipotesi da noi sostenuta, circostanza questa peraltro riconosciuta come valida da Santini e Misiti.

Analogo ragionamento vale per quanto riguarda il valore di S , e non si comprende come sia stato lecito da parte della Commissione Misiti utilizzare un valore predeterminato, (peraltro ritenuto ragionevole) mentre nella nostra analisi si sarebbe dovuto prendere in considerazione un vasto *range* di valori. A quanto pare, sembra che la scelta della procedura dipenda, secondo Santini, dai risultati raggiunti, nel senso che la procedura va scelta in modo tale che i risultati ottenuti siano in linea con una tesi predeterminata!

Le osservazioni di Santini, inoltre, non tengono conto della procedura alternativa da noi seguita, sulla scorta di quanto indicato nell'Allegato C della relazione della Commissione Misiti, alternativa che, se seguita correttamente, fornisce una conferma ai risultati della precedente analisi. Evidentemente l'approccio di Santini si completa nel senso che le procedure che portano a risultati non in linea con la tesi predeterminata

non vanno nemmeno prese in considerazione!

4

Gli indizi di esplosione

Abbiamo già esposto in una precedente relazione¹ alcune nostre osservazioni sulle problematiche relative al rinvenimento di segni di esplosivo e di esplosione sui frammenti del DC9 e sul modo come esse erano state affrontate nella PRU: osservavamo in particolare come tali segni²:

appaiono paradossalmente sottovalutati nella Perizia Tecnica (PRU). Il motivo di tale sottovalutazione sta nel fatto che tali indicazioni di esplosione non si accordano con una esplosione nella toilette, ma sono più facilmente comprensibili nell'ipotesi di una esplosione esterna.

Le osservazioni contenute in questo capitolo sono state contestate dai periti Casarosa ed Held³ che le hanno stimate prive di *consistenza tecnica*⁴; mostreremo qui di seguito come, a nostro avviso, le osservazioni dei PCH non siano assolutamente in grado di sminuire il significato ed il valore di quanto da noi là scritto.

È però doveroso ancora una volta fare un commento generale relativo al testo dei PCH qui citato, commento che accomuna, da questo

¹ **Algotino F., Cancelli C. Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.**; *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, 22.11.1994. Si veda il Capitolo 5.

² **Algotino F., Cancelli C. Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.**; *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, 22.11.1994, pag. 56.

³ Nel seguito indicati come PCH.

⁴ **Casarosa C., Held M.**; *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995. pag. 5-1.

punto di vista, questo testo agli altri prodotti dalla Commissione Misiti. Si tratta di un testo puramente assertivo, con asserzioni talvolta contraddittorie, mai dimostrate, talvolta riferite a fonti anonime e quindi non verificabili e talvolta contrarie al più elementare senso comune. Si tratta cioè di un testo che manca anche dei minimi requisiti formali per essere considerato un testo scientifico, perlomeno nel significato che si dà a questa espressione dal tempo di Galileo in poi.

Il buon senso, prima ancora che un approccio scientifico, avrebbero dovuto consigliare i PCH a guardare con un poco più di attenzione alle tracce di esplosivo; ed in ogni caso a giustificare in modo ben più ampio perchè essi hanno guardato a queste tracce *con grande sospetto*⁵. Si tratta, a nostro avviso, di un dato fattuale che assume particolare rilievo proprio quando si sostiene la tesi che una esplosione si è verificata. I PCH, inoltre⁶ affermano che:

non possono non rilevare l'imprudenza di tutte le Commissioni Tecniche che si sono succedute nelle indagini le quali, sulla base di questi unici e tenui indizi (erano i soli alle varie epoche disponibili) hanno formulato differenti ipotesi di esplosione, che hanno poi sempre condizionato le successive indagini, senza preoccuparsi di verificare la storia del recupero dei reperti e della loro conservazione, con conseguente possibilità di una loro contaminazione.

A nostro avviso invece le Commissioni tecniche precedenti non sono state *imprudenti*, ma, in modo scientificamente corretto, hanno dovuto tenere conto di un dato acquisito.

I motivi in base ai quali i PCH hanno *guardato con grande sospetto* ai ritrovamenti di tracce di esplosivo sono così descritti:

Le tracce ritrovate, in particolare quelle sul gancio, sono esigue e, generalmente, gli esperti esplosivisti non attribuiscono a simili quantità particolari significati nelle loro indagini.

⁵Casarosa C., Held M.: *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995, pag. 5-2.

⁶Casarosa C., Held M.: *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995, pag. 5-6.

Non è dato sapere quali sono gli esperti esplosivisti qui citati⁷; va detto che ogni esplosione comporta sempre che tracce di quella parte di esplosivo che non subisce decomposizione vengano proiettate nello spazio circostante. In letteratura⁸ si trova anche una formula che da la quantità di esplosivo depresso sulle superfici circostanti il punto dell'esplosione. Tale quantità è data dalla formula:

$$c = \frac{10^{-4}W}{4\pi r^2} \quad (4.1)$$

In questa relazione c rappresenta l'esplosivo non decomposto, misurato gr/m^2 , depositato dall'esplosione di una carica di W grammi su di una superficie posta alla distanza di r metri; il coefficiente numerico 10^{-4} significa che ogni 10 kg di esplosivo non partecipa alla reazione 1 gr . Come si ricava da questa formula, una carica di 20 kg deposita su di una superficie posta alla distanza di 6 m una quantità di esplosivo di circa $0.5 \times 10^{-2}\text{ gr}/m^2$; si noti come tale quantità, apparentemente piccola, sia in realtà enormemente superiore a quella rilevabile con le attuali tecniche della chimica analitica.

È doveroso quindi collegare la presenza di tracce di esplosivo ad una esplosione, mentre ipotesi alternative quali l'inquinamento ambientale non paiono in grado di giustificare le modalità particolari di tale presenza⁹. In ogni caso ben maggiore attenzione avrebbe dovuta essere dedicata a questo elemento; esso è infatti un esempio quasi emblematico di tutte le difficoltà che si sono incontrate nell'approccio tecnico-scientifico a questa vicenda¹⁰. Il rinvenimento di tracce di esplosivo in-

⁷È stata purtroppo prassi costante della Commissione Misiti fare affermazioni relative ai fatti tecnici dichiarandole derivate da fonti anonime; poichè non appaiono chiare le motivazioni processuali di questo comportamento esso può essere solo dovuto al desiderio di impedire una reale verifica della serietà della fonte stessa.

⁸Yallop H. J.; *Explosion investigation*, The Forensic Science Society and Scottish Academic Press, 1980; pag. 104.

⁹Tale pare essere anche l'opinione espressa dai PM nella loro requisitoria (*Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 116). Non vogliamo qui neanche prendere in considerazione l'ipotesi che tale presenza sia dovuta ad errore nelle analisi: è noto a tutti che le tecniche analitiche disponibili sono in grado di individuare in modo certo la presenza di tali sostanze.

¹⁰Tale difficoltà sono poste in evidenza anche nella requisitoria. *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage

decomposto è in generale considerato elemento decisivo in ogni inchiesta su di una esplosione; infatti¹¹:

*Quando le analisi chimiche hanno dato risultato positivo per la presenza di esplosivo indecomposto quali la nitroglicerina, il RDX (T4) e il TNT, vi è poca necessità di controllo sull'ambiente poichè anche il critico più capzioso ha difficoltà nel sostenere con argomenti convincenti che queste sostanze erano già presenti*¹²

È utile nel caso qui in esame, per poter risalire dalla constatazione della presenza delle tracce di esplosivo alla localizzazione dell'ordigno e quindi alla causa dell'incidente, più precisamente alla determinazione del carattere interno od esterno dell'esplosione, analizzare i meccanismi di trasferimento dell'esplosivo indecomposto.

Il meccanismo di trasferimento, che sta alla base della formula sopra ricordata, è quello mediato dall'onda d'urto; la carica indecomposta viene cioè trasportata sugli oggetti circostanti dall'onda d'urto. La quantità di esplosivo depositata, dipende dalla distanza dal centro dell'esplosione e non è quindi corretto associare la bassa quantità rinvenuta ad un fenomeno di inquinamento ambientale; anche perchè, come notato dagli stessi PCH¹³ in un caso da loro esaminato, l'inquinamento dovrebbe produrre sui bagagli concentrazioni inferiori a quelle effettivamente ritrovate, ma soprattutto perchè avrebbe dovuto interessare un numero ben più ampio di oggetti. In ogni caso un fenomeno di inquinamento dovuto alla permanenza in ambienti contenente tracce di esplosivo non giustificherebbe la collocazione singolare delle tracce di esplosivo sul gancio del sedile rosso, collocazione che infatti i PCH¹⁴ giudicano *inspiegabile*. Gli

di Ustica), 30.7.1998, pag. 186.

¹¹ Yallop H. J.; op. cit.; pag. 107.

¹² *When chemical examination gives positive results for undecomposed explosives such as nitroglycerine, RDX and TNT, there is little need of controls from the scene since the most captious critics has difficulty in sustaining a convincing argument that these substances were already present.*

¹³ Casarosa C., Held M.: *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995, pag. 5-5.

¹⁴ Casarosa C., Held M.: *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995, pag. 5-2.

stessi Periti giudicano poi le tracce di esplosivo sui bagagli *non congruenti* con una esplosione esterna, perchè protetti dalla parete della fusoliera ed ancora *incongruenti* con l'ipotesi di esplosione interna e questo a causa del fatto che i bagagli erano collocati nel bagagliaio anteriore e cioè ben lontano dalla toilette e quindi *non nella posizione ipotizzata dalla Commissione Misiti* per l'esplosione.

Esiste in realtà un meccanismo di trasporto dell'esplosivo non decomposto, perfettamente plausibile dal punto di vista tecnico, anche se una sua validazione completa avrebbe richiesto probabilmente alcune verifiche sperimentali. Tale meccanismo si basa sul fatto che gli esplosivi trovati e cioè il TNT ed il T4, sono molto poco solubili in acqua¹⁵: si può quindi ipotizzare che all'atto dell'esplosione molte parti dell'aereo siano state ricoperte dall'esplosivo indecomposto. Una volta che esse sono giunte in mare assieme ai bagagli ed ai sedili, a causa appunto della insolubilità degli esplosivi, questi si sono potuti depositare sugli oggetti che galleggiavano vicino¹⁶. Questa modalità di trasferimento giustificerebbe il fatto che solo su alcuni oggetti sono state trovate le tracce di esplosivo ed anche la collocazione dell'esplosivo sul gancio estratto dal sedile *rosso*. Infatti attraverso il mezzo acquoso l'esplosivo può essere penetrato dentro la sede del gancio; l'esplosivo deposto all'esterno del foro del gancio, si è quindi decomposto, sotto l'azione dell'ossigeno dell'aria e della luce, dopo che il reperto era stato recuperato, mentre quello finito nel foro, protetto dall'azione degli agenti atmosferici, ha potuto essere rinvenuto anni dopo.

Non è in ogni caso possibile, a nostro avviso, dare per scontato che l'accertata presenza di esplosivo su parti molto probabilmente collocate in cabina significhi esplosione interna, in particolare esplosione nella toilette, come credono i Pubblici Ministeri¹⁷. Si deve al contrario notare come ogni ipotesi di esplosione interna dovuta a bomba non sia in grado di giustificare le caratteristiche del rinvenimento dell'esplosivo. Diceva-

¹⁵ Meyer R.; *Explosives*, Verlag Chemie 1981. pag. 75 e 359.

¹⁶ Se si volesse visualizzare il meccanismo qui descritto si può immaginare di avere versato dell'olio in un recipiente d'acqua, nella quale siano stati poi posti a galleggiare degli oggetti; si comprende come all'atto dell'estrazione degli oggetti dall'acqua qualcuno di essi possa essere inquinato dall'olio.

¹⁷ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 186.

mo in una nostra relazione¹⁸ come le modalità di collasso della toilette non fossero in accordo con una deposizione di esplosivo in cabina. Altre considerazioni, più direttamente contrarie a questa ipotesi e forse più dirette possono farsi; se effettivamente l'onda d'urto incanalatasi nella cabina avesse trasportato tracce di esplosivo inesplosivo, non si comprende come solo due bagagli ed uno schienale di sedile siano risultati contaminati. Da questo punto di vista il rinvenimento di tracce di esplosivo in quantità relativamente elevate su pochissimi oggetti fanno pensare che il processo di trasferimento abbia operato con meccanismi meno diretti di quello che si sarebbe avuto con una esplosione in cabina; in questo senso ci pare che il meccanismo di trasferimento da noi sopra indicato sia molto più probabile.

Si noti come questa caratteristica di essere *consistente*, ma su pochissimi pezzi riguardi anche gli altri indizi di esplosione; tra le centinaia di schegge recuperate solo due mostrano segni di esplosione e solo un vestitino di bambola mostra segni di bruciatura.

I segni di esplosione non vengono considerati dai Pubblici Ministeri come dovuti a cause diverse da quelle che hanno provocato la caduta dell'aereo; essi però vengono considerati tra loro *incoerenti*¹⁹. Abbiamo già commentato in modo generale nel Capitolo 2²⁰ il significato che va attribuito al termine *incoerente*; applichiamo quindi quelle considerazioni generali al caso qui in esame.

Conviene rifarsi ad un passo della nostra relazione²¹, riportato per esteso nella requisitoria dei Pubblici Ministeri²² nella quale si notava che l'insieme delle *deformazioni presenti sui pezzi della toilette erano elementi contraddittori tra di loro*. Trattandosi di dati fattuali, indubitabili nella loro presenza e nel loro collegamento con il danneggiamento dell'aereo è chiaro che quando si parlava di contraddittorietà tra di loro ci si riferiva

¹⁸ Algotino F., Cancelli C. Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.; *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, 22.11.1994, pag. 59

¹⁹ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 185.

²⁰ A pag. 11 di questa Relazione.

²¹ Algotino F., Cancelli C. Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.; *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, 22.11.1994, pag. 5.

²² *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 181.

ad una incoerenza rispetto alla causa che si ipotizzava li avesse prodotti. Se un pezzo presenta una parte con una deformazione concava verso l'interno della cabina ed un'altra parte con una deformazione convessa verso l'interno, questo significa che il pezzo contraddice l'ipotesi che possa essere stata una sovrappressione sviluppatasi nella cabina a produrre tale deformazione. La causa di queste deformazioni va quindi cercata nelle sollecitazioni, di gran lunga più complesse, che si sono prodotte all'atto dell'impatto del velivolo con il mare.

Le modalità con le quali la Commissione Misiti ha trattato tutta la tematica dell'esplosione è la dimostrazione della assoluta mancanza di ogni scientificità nell'approccio al problema: da un lato si è minimizzato, con puri trucchi verbali, il fatto che **nessun** segno di bomba è stato trovato nella zona della toilette, dall'altro, con altrettanta leggerezza, ci si è disinteressati del fatto che i massimi esperti del campo hanno continuato a dichiarare che esistono sui frammenti del DC9 segni indiscutibili di esplosione.

In una lettera inviata in data 25.2.1994 al perito Santini²³, nella quale si passavano in rassegna tutte le ricerche effettuate sui relitti del DC9, i ricercatori Baker e Winn appartenenti al DRA, che viene considerato il maggior centro di ricerca al mondo su questi temi, si sentivano in dovere di *ricordare alla Commissione le evidenze, ottenute al DRA (ex RARDE), favorevoli al fatto che una esplosione era implicata*²⁴; tale opinione era supportata dalla presenza in almeno quattro reperti che mostravano segni certi di esplosione. Anche volendo ammettere che la storia di alcuni tra questi reperti non sia completamente chiara, non ci si può facilmente sbarazzare della loro presenza, dicendo semplicemente che non si riesce a giustificarla.

Una motivazione della difficoltà incontrata dalla Commissione Misiti nel giustificare tali rinvenimenti sta da un lato nella precisa indicazione che un fenomeno esplosivo si è verificato, e dall'altro nell'impossibilità di dedurre una localizzazione nella toilette. Crediamo in effetti che questa sia la causa del fatto che la Commissione Misiti ed anche i PCII hanno sottovalutato questi segni: essi mal si accordavano con l'ipotesi di esplosione nella toilette.

²³Baker M T, Winn J M, Defence Research Agency.

²⁴*to remind the Commission of the positive evidence obtained at the DRA (formerly RARDE) that an explosion was involved.*

Tale nostra convinzione è giustificata anche da quanto osservato nella stessa lettera sopra citata; a proposito del vestito della bambola, sul quale esistono segni di esplosione, si dice che: *È stato suggerito in una discussione da un membro della Commissione, che questo oggetto è stato recuperato da una zona "sbagliata" dei rottami*²⁵. Si noti la scorretta metodologia scientifica di questo sconosciuto membro della Commissione Misiti, che contesta la presenza dei segni di esplosione sulla base del fatto che la bambola non poteva essere vicina alla toilette; obbligando tra l'altro i ricercatori del DRA, molto più corretti scientificamente, ad affermare, a proposito del vestitino della bambola: *In ogni caso le evidenze di una esplosione che esso porta non possono essere ignorate da qualsiasi parte esso sia stato trovato*²⁶.

È noto come presumibilmente la bambola fosse in possesso di una bambina che era seduta nella parte anteriore della cabina al momento dell'incidente: di tale posizione è rimasta traccia nella posizione di ritrovamento, che era la cabina di pilotaggio.

I segni di esplosione, se si vuole che la loro presenza abbia un significato scientificamente valido devono essere validati da proprietà oggettive, indipendenti da ogni altro dato, e non possono essere discusse sulla base della posizione di rinvenimento dei reperti interessati. Non è quindi scientificamente sostenibile, né rappresenta certo una corretta applicazione del metodo galileiano quanto affermato, a proposito del rinvenimento di tracce di esplosivo sul gancio 2 rosso e su due valigie²⁷

Tale indizio è stato ritenuto discutibile in quanto tali tracce sono state ritrovate in posizioni e zone che male si accordano con l'ipotesi di esplosione nell'interno della toilette e, di conseguenza, i Periti Casarosa ed Held, tenendo anche conto delle quantitativamente esigue tracce trovate, sarebbero più propensi ad attribuirle a fenomeni di contaminazione dei reperti.

²⁵ *It has been suggested in discussion by a member of the Commission, that this item was recovered from the "wrong" area of the wreckage.*

²⁶ *In any case the evidence of an explosion which it bears cannot be ignored wherever it was found.*

²⁷ Casarosa C., Held M.: *Quesiti a chiarimento posti dall'AGI*, 23.11.1994, pag. 3-7.

Non possono esserci dubbi sul fatto che i segni di una esplosione che ha interessato il DC9 sono tanto precisi e di origine così diverse (dalle tracce di esplosivo ai segni sulle schegge, alle tracce di bruciatura) da imporre di credere che un fenomeno esplosivo ha interessato il DC9. Non si può quindi che essere d'accordo con la tesi sostenuta dai Pubblici Ministeri, a proposito dei segni di esposizione ad esplosione, secondo cui tali segni²⁸:

appaiono a questo Ufficio fortemente indicativi di una esplosione, che ha proiettato frammenti incandescenti.

I segni di esplosione sono indubbiamente presenti, ma sono giustificabili solo con modalità più complesse rispetto a quelle di una esplosione interna: essi sono infatti netti, ma rari e soprattutto non possiedono alcuna *coerenza spaziale*. Questo ci fa dire che essi sono coerenti con una esplosione che si è verificata nei pressi dell'aereo, ma non nel suo interno.

²⁸ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 108.

5

I segni sul relitto

5.1 Introduzione

Nella fase iniziale delle indagini si è pensato che dovesse essere essenziale, per accertare le cause dell'incidente, effettuare esclusivamente l'analisi del relitto, intesa come ricerca di segni che, per le loro caratteristiche, permettessero una discriminazione inequivocabile tra i vari scenari.

Questa idea, che può per certi aspetti essere considerata ovvia, è stata sostenuta anche facendo riferimento al manuale ICAO, che descrive le modalità più opportune da seguire nel corso di indagine sulle cause degli incidenti aerei: poichè però il nostro non è un **normale** incidente aereo, e le norme ICAO si riferiscono ai normali incidenti aerei, queste prescrizioni non vanno applicate in modo troppo rigido. Se esse infatti, proprio per la singolarità dell'evento che ha interessato il DC9, vengano sottoposte ad una minima analisi critica, mostrano alcuni aspetti di problematicità che saranno ora discussi.

Il punto fondamentale è che il grado di correlazione tra i diversi scenari possibili in questo caso ed i relativi segni sul relitto è diverso per i vari scenari. Nello scenario di esplosione interna infatti la localizzazione del danno implica la presenza di inequivocabili segni di esposizione all'azione della bomba, segni localizzati nelle immediate vicinanze dell'esplosione, che permettono di individuare la causa in modo sicuro. Per gli altri due scenari invece, dove la più importante componente al danno è data da forze di natura aerodinamica¹, quindi da azioni distribuite

¹ Non si vuole naturalmente dire che la testata missilistica non produce schegge,

su zone molto più ampie, i segni sul relitto possono non essere così facilmente caratterizzabili o addirittura non essere presenti; e questo è quanto giustamente osservato anche dalla Commissione Misiti², quando caratterizza la tipologia del danno prodotto dall'azione combinata delle forze d'inerzia della manovra e di quelle aerodinamiche dovuta ad una raffica quando esse portano al superamento del fattore di carico di progetto e quindi ad un cedimento.

La tipologia di frattura in tale caso

sarebbe stata tale da non lasciare alcun segno caratteristico di natura macroscopica sul relitto stesso che, come in precedenza osservato, è la peculiare caratteristica di questo incidente di volo.

Anche per quanto riguarda l'esplosione interna ed esterna va detto che i segni non sono identici. Ovviamente entrambe le esplosioni producono frammenti in moto (schegge) e onda d'urto, ma semplici e logiche considerazioni di natura geometrica permettono di prevedere che le conseguenze ed i segni debbano essere differenti nelle due situazioni.

Per quanto riguarda i fori dovuti alle schegge, nel caso di una esplosione in un volume chiuso, non ci sono dubbi e ciò è stato confermato dagli esperimenti effettuati, che i fori prodotti dalle schegge sono in gran numero. Si noti tra l'altro, nel valutare questo aspetto, che non è corretto considerare semplicemente le pareti della toilette, ma bisogna tenere conto delle parti del velivolo che circondano la toilette, quali il motore destro ed il cono di coda, come suggeriscono gli esperimenti. Per quanto riguarda invece una esplosione esterna questo numero dipenderà ovviamente dalla posizione relativa della testata e del velivolo. In tal caso certamente questo numero sarà inferiore: esso infatti dipende dall'angolo solido sotto il quale dal punto dell'esplosione sono viste le strutture dell'aereo che nel caso di una esplosione interna vale 4π , cioè l'intero angolo solido, mentre nel caso di una esplosione esterna può essere molto minore.

Abbiamo già osservato come una notevole parte del lavoro della Commissione Misiti sia stato dedicato allo scenario che prevede come

ma semplicemente che in questo caso il danno da onda d'urto è quello rilevante.

²Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Förshing H., Gummval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.; *Relazione Tecnica*, 20.7.1994; pag. IX-49.

la caduta del DC9 sia stata causata dall'esplosione di una bomba nella toilette: in particolare tutti gli esperimenti effettuati hanno riguardato questo scenario. I risultati di questi esperimenti hanno mostrato l'imponente ed inequivocabile presenza dei segni caratteristici di esplosione su **tutti** i pezzi collocati vicino al punto di esplosione. Abbiamo più volte detto come la conclusione che si può trarre da questi esperimenti, come anche dalle simulazioni è che lo scenario dell'esplosione nella toilette può essere considerata *estremamente improbabile*³.

Non crediamo francamente che meriti ulteriore attenzione la relazione della Commissione Misiti; dedicheremo invece una analisi più puntuale ad un documento⁴ con il quale i PCH hanno voluto replicare alle nostre osservazioni.

Vogliamo però fare preliminarmente una considerazione generale che riguarda tutta la relazione della Commissione Misiti e purtroppo anche il documento dei PCH sopra ricordato e che esamineremo in seguito più analiticamente: tale osservazione è già sinteticamente contenuta nelle conclusioni della nostra relazione⁵, ma conviene qui ribadirla ed ulteriormente svilupparla, tenendo anche conto dei risultati acquisiti dopo la consegna della relazione della Commissione Misiti.

Il punto fondamentale è che **non esiste un solo elemento** appartenente a parti vicine alla toilette, dove si è ipotizzato fosse stata collocata la bomba, sul quale la Commissione Misiti possa affermare che esistano i segni di una esplosione: e questo è tanto più paradossale in quanto, come abbiamo detto sopra, secondo i massimi esperti in questo settore, tali segni sono presenti sui reperti collegati al DC9; essi però non sono collocabili in parti del velivolo vicini alla toilette.

³Perizie Esplosivistiche.

⁴Casarosa C., Held M.; *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995.

⁵Algostino F., Cancelli C. Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.; *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, 22.11.1994.

5.2 La relazione di Casarosa ed Held

Vorremmo qui rispondere ad alcune osservazioni⁶ fatte dai PCH, a proposito della nostra relazione⁷ nella quale commentavamo la RPU.

Come è noto i PCH hanno aderito all'ipotesi bomba, ma la hanno stimata⁸ *molto probabile ma affetta da non trascurabili livelli di incertezza*. A loro avviso però sarebbe errato pensare che questa affermazione sia riduttiva della affidabilità dell'ipotesi bomba; anzi in un altro testo prodotto dagli stessi PCH si può leggere⁹

... il fatto che due gruppi di addetti ai lavori, seguendo percorsi logici diversi e pesando diversamente i molti elementi disponibili, avessero raggiunto la stessa soluzione, anche se con diverso grado di convincimento, non poteva che rafforzare la validità della soluzione stessa.

Nel testo che i PCH dedicano alla nostra precedente memoria¹⁰, pur dichiarandosi in sostanza d'accordo con noi sulla scarsità e sulla discutibilità di reperti che portino inequivocabili segni di una esplosione avvenuta nella toilette, essi confermavano ancora che la loro adesione all'ipotesi bomba era sostanzialmente basata sulle caratteristiche di deformazione di due pezzi, precisamente l'AZ 497 e l'AZ 534. Essi infatti sostengono¹¹:

Questo esame ha portato ad identificare le deformazioni e le improntature visibili sui frammenti AZ 497 ed AZ 534 come possibili indizi di una esplosione in quanto esse sono

⁶Casarosa C., Held M.: *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995.

⁷Algotino F., Cancelli C., Pent M., Tartaglia A., Vadacchino M.: *Osservazioni dei Consulenti di Parte Civile sulla Relazione dei Periti d'Ufficio*, 22.11.1994.

⁸Casarosa C., Held M.: *Quesiti a chiarimento posti dall'AG*, 23.11.1994; pag. 2-11.

⁹Casarosa C., Held M.: *Quesiti a chiarimento posti dall'AG*, 23.11.1994; pag. 2-5.

¹⁰Casarosa C., Held M.: *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995.

¹¹Casarosa C., Held M.: *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995, pag. 2-3.

immediatamente riconducibili ad effetti di sovrappressione all'interno della toilet e non contrastano con le deformazioni sui corrispondenti frammenti rilevate nelle prove di simulazione effettuate dal Collegio Balistico-Esplosivistico.

E poco oltre, ancora più esplicitamente¹²:

Tale posizione sarebbe in accordo anche con le deformazioni rilevate sui frammenti AZ 497 e AZ 534 che, a parere di PCH, sono gli unici frammenti che mostrano deformazioni congruenti con quelle derivanti dalle prove di simulazione di esplosioni con carica posta nella predetta posizione.

Tale convincimento era stato espresso varie volte in precedenza; tenendo conto delle critiche fatte, i pezzi sui quali sono rilevabili segni non ambigui favore della esplosione si riducono sostanzialmente a due¹³:

Questo esame ha portato ad identificare le deformazioni e le improntature visibili sui frammenti AZ 497 ed AZ 534 come possibili indizi di esplosione

In un documento redatto successivamente sempre dai PCH¹⁴ si sostiene ancora:

Pertanto a conclusione delle analisi e delle discussioni effettuate, i PCH non possono che confermare come l'ipotesi di esplosione nel vano toilet del velivolo, a loro giudizio, sia una ipotesi sostenibile, con le più volte citate riserve, solo in virtù delle particolari caratteristiche di frammentazione della parte posteriore della fusoliera e delle deformazioni visibili sui frammenti AZ 497 e AZ 534.

¹² Casarosa C., Held M.; *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995, pag. 2-19.

¹³ Casarosa C., Held M.; *Quesiti a chiarimento posti dall'AG*, 23.11.1994, pag. 2-3.

¹⁴ Casarosa C., Held M. *Osservazioni sui commenti generali dei consulenti di parte inquisita*, 20.2.1995; pag. 4-1.

In un altro¹⁵ i due frammenti sono definiti come *unici*, mentre in un punto poco precedente¹⁶ si ipotizza che essi possano non essere unici. Si dice infatti:

Infatti, l'esame critico delle deformazioni dei predetti frammenti consente di individuare almeno due di essi caratterizzati da deformazioni ed improntature difficilmente imputabili ad evento diverso da sovrappressione interna.

In ogni caso non risultano essere stati indicati in seguito altri pezzi aventi caratteristiche tali da poter far dire ai PCH che essi portino un qualche segno di esplosione.

Non è dato sapere quando sono state scritte le frasi sopra ricordate; la relazione che le contiene¹⁷ risulta essere stata depositata in data 1.6.1995, né risulta che successivamente i PCH siano intervenuti su questo argomento.

Quello che appare singolare è però il fatto che i PCH non paiono sapere che circa due mesi prima e precisamente il 18.3.1995 era stata depositata una relazione di perizia del collegio frattografico¹⁸ nella quale, a proposito proprio dei pezzi AZ 534 e AZ 497, si dice che essi **non** mostrano:

segni di deformazione a livello cristallino o altri fenomeni riconducibili all'effetto di un'esposizione ad onde di elevata sovrappressione o di elevata sovratemperatura, connesse ad un evento esplosivo a breve distanza dal reperto

Si deve quindi ancora una volta constatare come le analisi specialistiche siano trascurate o addirittura in questo caso ignorate, senza che di ciò si dia alcuna giustificazione: e questo avviene essenzialmente quando esse sono contrarie all'ipotesi di esplosione nella toilette.

¹⁵Casarosa C., Held M.; *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995, pag. 2-19.

¹⁶Casarosa C., Held M.; *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995; pag. 2-3.

¹⁷Casarosa C., Held M.; *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995.

¹⁸Firrao D., Reale S., Roberti R., *Il Relazione di perizia metallografica-frattografica sull'incidente al velivolo DC9 ITAVIA - 27 giugno 1980.*

Questa è la ragione per la quale, alla luce della quantità di reperti disponibili e degli esperimenti effettuati, è possibile escludere che una bomba collocata a bordo dell'aereo sia stata la causa della caduta del DC9.

6

Le modalità di rottura

6.1 Introduzione

Le modalità di rottura del DC9, in particolare la sua sequenza temporale, sono state oggetto di intense indagini, in quanto si è giustamente pensato che l'individuazione del punto nel quale è iniziata la rottura potesse dare una indicazione precisa della causa che ha prodotto l'incidente.

Sono diversi gli elementi acquisiti in grado di fornire indicazioni sulle modalità di rottura del DC9: ciascuno di questi elementi fornisce informazioni su aspetti particolari del complesso fenomeno della frammentazione in volo del velivolo. Una prima informazione, che riguarda essenzialmente la sequenza temporale della frammentazione, è fornita dalla collocazione in fondo al mare dei relitti: tenendo conto che la fase di frammentazione del velivolo è durata parecchi secondi e che il velivolo procedeva alla velocità di 230 *m/s* si capisce come sia possibile risalire, dalla collocazione delle varie parti in fondo al mare alla successione temporale con la quale le varie parti del velivolo si sono distaccate. Sulla base di questi elementi si può ricavare una sequenza di frammentazione che è stata così determinata¹

Il primo principale evento che si è verificato a bordo e che ha determinato l'inizio del collasso della struttura, è stato il

¹Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Förshing H., Gunnval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.: *Relazione Tecnica*, 20.7.1994, pag. IV-87.

cedimento dell'attacco anteriore del motore destro, in corrispondenza del vincolo con l'ordinata 786.

...

Immediatamente dopo si è avuto il distacco del motore sinistro per cedimento completo dell'ordinata di attacco 786 ed il cedimento dell'ordinata di forza 642...

...

Il cedimento dell'ordinata di forza 642 ha determinato, in rapida sequenza, il distacco, in corrispondenza ad essa, della parte posteriore della fusoliera e la sua distruzione...

Subito dopo questi eventi si è avuto il distacco del tronco di coda e dell'estremità della semiala sinistra.

Il resto del relitto non ha subito ulteriori importanti frammentazioni durante la caduta e si è distrutto al momento dell'impatto con la superficie del mare...

Questa sequenza di rottura è suffragata anche dalle modalità di cessazione delle varie utenze del velivolo (FDR e VCR). Tali apparati sono infatti alimentati da un generatore collocato nel motore destro; la repentina ed iniziale cessazione delle registrazioni è quindi giustificata proprio dal fatto che è stato il motore destro a staccarsi per primo. Un secondo elemento di supporto della sequenza sopra indicata, come si ricava dalla citazione stessa, è data dalla considerazione della struttura del velivolo, che permette, a partire dalla causa iniziale che ha interessato il motore destro, di connettere causalmente, in modo razionale le varie successive fasi di frammentazione.

Considerazioni di natura diversa vanno fatte in relazione all'ultima delle fasi di frammentazione sopra descritte, cioè al distacco dell'estremità dell'ala sinistra. È accertato il carattere aerodinamico delle forze che hanno prodotto questa rottura; il movimento dell'ala dovuto ad una flessione dall'alto verso il basso e l'assenza di segni di danneggiamento obbliga a pensare che l'ala si sia rotta per un assetto di picchiata assunto dall'aereo in seguito al distacco della parte posteriore del velivolo, più precisamente dal tronco di coda.

Un ulteriore livello di approfondimento è fornito dall'analisi frattografica dei frammenti². In particolare, per quanto riguarda il motore

²Firrao D., Reale S., Roberti R., *Relazione di perizia metallografica*

destro, che è la parte di aereo che ha *sentito* direttamente l'azione dell'evento che ha prodotto la caduta del DC9 si dice che³

...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..

La determinazione della dinamica di frammentazione del DC9 e soprattutto delle sue fasi iniziali permettono di fare alcune ipotesi preliminari su quali possono essere state le cause dell'incidente. Una volta localizzato il danno, che è stato iniziato da una azione applicata al motore destro ed al suo collegamento con la fusoliera attraverso l'ordinata 786, si tratta di individuare quale possa essere stata la causa di tale azione. Il problema non è di immediata e facile soluzione a causa del fatto che questa parte della fusoliera ha un ruolo strutturale particolare.

A tale proposito è illuminante quanto detto nella PRU⁴, dove analizzando le modalità di rottura e le cause dell'incidente si dice:

Dalle analisi effettuate sia nella Parte IV della Perizia sia nei paragrafi precedenti emerge con plausibile certezza che, al verificarsi dell'incidente, si è avuto il pressoché contemporaneo cedimento degli attacchi anteriori dei motori della fusoliera, con leggero anticipo del cedimento dell'attacco destro rispetto a quello sinistro, dell'ordinata 642 e del sistema di vincolo del tronco di coda alla parte posteriore della fusoliera.

L'esame della documentazione fornita dalla Mc Donnell-Douglas e riportata in Doc.I-1, consente di rilevare che i predetti elementi risultano elementi critici del velivolo quando esso è sottoposto a condizioni di carico derivanti da manovra

frattografica sull'incidente al velivolo DC9 ITAVIA - 27 Giugno 1980. Roma, 29.7.1994.

³Firrao D., Reale S., Roberti R., *Relazione di perizia metallografica-frattografica sull'incidente al velivolo DC9 ITAVIA - 27 Giugno 1980. Roma, 29.7.1994, pag. 61.*

⁴Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Förshing H., Gunnval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.: *Relazione Tecnica, 20.7.1994, pag. VIII-9.*

bilanciata al massimo valore del fattore di carico di manovra e raffica.

In altre parole, se il velivolo viene sottoposto a condizioni di carico derivanti dal superamento del massimo valore del fattore di carico a causa di effetti combinati di manovra e raffica, su di esso agiscono accelerazioni e, quindi, carichi inerziali che, in aggiunta a quelli di esercizio, possono essere tali da determinare il cedimento della struttura del velivolo in corrispondenza dei predetti elementi critici.

Sulla base di queste considerazioni può pertanto formularsi la plausibile ipotesi che, al momento dell'incidente, il velivolo sia andato soggetto alle predette condizioni di carico che, attraverso il cedimento degli elementi critici della struttura del velivolo, abbiano poi innescato la sequenza degli eventi in precedenza discussa.

Da queste affermazioni si ricava quindi che un danneggiamento nella parte posteriore dell'aereo, in particolare nella sezione cui sono vincolati i motori, danneggiamento in grado di fare precipitare l'aereo, può essere prodotto da sollecitazioni aereodinamiche (raffiche) e da manovre. Esiste quindi un meccanismo, che non è quello rappresentato da una bomba nella toilette, che è in grado di produrre proprio la sequenza di rotture il cui verificarsi è accertato nel caso del DC9. Un tale tipo di danneggiamento avrebbe inoltre la caratteristica di *non lasciare alcun segno caratteristico di natura macroscopica su relitto*⁵.

Come mostreremo in seguito l'esplosione di una testata missilistica nelle vicinanze del DC9 può produrre condizioni di sollecitazione aerodinamica tali da produrre il meccanismo di cedimento sopra descritto.

⁵Si veda citazione a pag. 54.

7

Analisi dello scenario missile

7.1 Introduzione

Si è già detto come l'albero delle probabilità rappresenti una struttura logica adeguata a raggiungere conclusioni con un accettabile grado di affidabilità: come abbiamo visto nel Capitolo 2, dedicato alla metodologia dell'accertamento, l'albero delle probabilità impone di considerare altamente improbabili tutte le ipotesi di incidente che non siano quella che a causare la caduta del DC9 sia stato un missile.

Si tratta a questo punto di un risultato raggiunto per via logica, che ha quindi bisogno di una verifica indipendente: si deve sostanzialmente verificare, visto che l'abbattimento del DC9 per mezzo di un missile risulta essere il solo scenario possibile in base alla totalità dei dati tecnici disponibili, se non esistono elementi che siano in insanabile contraddizione con tale scenario. Come vedremo non esistono a nostro avviso elementi di tale tipo ed anzi la spiegazione di alcune delle caratteristiche di questo incidente, che non hanno trovato fino ad ora una qualche giustificazione, appare particolarmente convincente proprio alla luce di questo scenario.

All'inizio di questo capitolo analizzeremo il problema che genericamente può essere indicato come quello dell'interazione tra un velivolo ed una testata missilistica. Non è pensabile, data la sua complessità, che se ne possa dare una trattazione generale: esiste però una certa documentazione relativa ad aspetti particolari di esso, che permette di trarre alcune informazioni utili al caso che qui stiamo esaminando. Di questa

documentazione sarà qui data una rassegna ragionata¹. Poichè il relitto non mostra segni di fori dovuti a schegge, si dovrà in particolare esaminare la possibilità che siano state azioni di natura aerodinamica, attribuibili all'esplosione di una testata, quelle in grado di causare la perdita del DC9: abbiamo infatti già fatto notare², citando un risultato della Commissione Misiti, come a tali azioni non debbano corrispondere segni macroscopici particolari sul relitto. La rilevanza di tali azioni non può d'altro canto essere messa in dubbio: esse infatti sono ben tenute presenti nel valutare gli effetti di una testata missilistica e vengono considerate un importante meccanismo di danneggiamento.

Analizzeremo quindi le motivazioni che hanno portato i periti d'ufficio a sostenere, nella loro relazione, che l'ipotesi missile non è plausibile: mostreremo come tali motivazioni derivino da una indagine che su questo punto è stata particolarmente insufficiente e non ha tenuto conto della complessità del problema. Dall'assenza di fori attribuibili a schegge e dalla supposta impossibilità dell'onda d'urto di abbattere un aereo si è ricavata la insostenibilità dell'ipotesi che sia stato un missile la causa dell'abbattimento: mostreremo come il primo fatto abbia varie giustificazioni e come il secondo sia evidentemente falso.

In conclusione di questo capitolo dimostreremo con dati quantitativi come una testata missilistica può avere prodotto il distacco del motore destro, può cioè avere danneggiato il DC9 con le stesse modalità di rottura riscontrate sul relitto.

7.2 L'interazione missile-velivolo

Si è detto come non esistano soluzioni generali del problema dell'interazione missile-velivolo; ciò è dovuto da un lato alla difficoltà intrinseca del problema e dall'altro alla sua assoluta peculiarità interdisciplinare.

¹La documentazione, sicuramente non esaustiva, da noi consultata è quella disponibile ai privati cittadini, e ci è stata suggerita dal nostro collaboratore Dr. Sewell. L'argomento dell'interazione testate missilistiche-velivoli ha peraltro una particolare valenza dal punto di vista militare ed è quindi sicuro che esistono ulteriori importanti informazioni non accessibili ai comuni cittadini; esso interessa infatti, in un ovvio ed inevitabile processo di mutua influenza, sia i costruttori di missili che i costruttori di aerei militari.

²Alla pagina 54 di questa relazione.

Questa situazione è ben descritta in un rapporto dedicato a questo tema³, dove si dice:

Il problema di predire la risposta della struttura di un velivolo ad una detonazione esterna è difficile per la semplice ragione che ai progettisti di aerei non è mai stato richiesto di progettare aerei che possano sopravvivere all'onda di detonazione di una testata missilistica. Poichè ai progettisti di aerei non è mai stato richiesto di progettare aerei che possano sopravvivere ad un'onda di detonazione, gli analisti delle sollecitazioni degli aerei non hanno mai dovuto sviluppare gli strumenti per prevedere la risposta del rivestimento e della struttura di un velivolo ad una detonazione in aria libera.

D'altro canto, gli analisti della vulnerabilità ed i progettisti di testate sono continuamente interrogati sulle dimensioni della testata necessaria per distruggere il velivolo nemico. Essi sono impediti dal prendere un approccio razionale ed una reale definizione del problema almeno da tre fattori:

1. I dettagli costruttivi dei nuovi velivoli nemici non sono ovviamente ad essi disponibili. Usualmente sono disponibili solo le fotografie della configurazione esterna. Quindi un modello razionale di risposta strutturale dai primi principi (i. e. legge di Newton, ecc.) non può essere sviluppato poichè essi non hanno accesso ai necessari dettagli per completare un modello razionale.

2. Il principale meccanismo di distruzione delle testate è usualmente la frammentazione, mentre la detonazione è un meccanismo secondario. Quindi la maggior parte del lavoro è stato fatto sulla modellazione degli effetti dei frammenti.

3. L'analista della vulnerabilità ed il progettista di testate sono in generale molto poco familiari con l'approccio di base tipo dadi e bullone dell'analista delle sollecitazioni degli aerei e, quindi, non utilizzano mai la forma del linguaggio ingegneristico che viene utilizzato dai progettisti di aerei

³Ankeney D. B., *Physical Vulnerability of Aircraft due to Fluid Dynamic Effects*. AGARD Advisory report No. 106, July 1977.

e dagli analisti di sollecitazioni. A questo si associa il fatto che i progettisti di aerei non hanno mai dovuto prendere in considerazione gli effetti delle testate e non hanno alcuna confidenza con la risposta strutturale al carico dovuto alla detonazione⁴.

È evidente come i progettisti di aerei civili, cui fa riferimento questo testo, non dedichino particolare attenzione alle problematiche delle sollecitazioni cui sarebbe sottoposto un tale aereo nel caso di esplosione di una testata missilistica; un tale evento non può essere considerato tra quelli che si prevede un aereo civile debba affrontare. Quello di cui tali progettisti devono tenere conto sono esclusivamente le normali sollecitazioni aerodinamiche. Un aereo può peraltro incontrare particolari condizioni di sollecitazione, quali quelle che si hanno in presenza di perturbazioni atmosferiche; e per tali situazioni, che sono le più gravose che si prevede possa subire il velivolo, sono infatti definiti particolari criteri di sicurezza.

Queste considerazioni non si applicano invece ai progettisti di aerei militari, in particolare di caccia; l'azione della testata missilistica è

⁴ *The problem of predicting the response of an aircraft structure to external blast is difficult for the simple reason that the aircraft designer has never been required to design aircraft that would survive the blast wave of a warhead. Since the aircraft designer has never been requested to design aircraft that could survive a blast wave, the aircraft stress analyst has never had to develop the tools for predicting the response of aircraft skin and structure to a free air blast. On the other hand, the vulnerability analyst and the warhead designer are continually consulted about the size of warhead needed to defeat enemy aircraft. They are prevented from taking a rational approach and really settling the problem by at least three factors: 1) Construction details of new enemy aircraft are obviously unavailable to them. Usually, only some photographs of the external configuration are available. Hence, a rational structural response model from first principles (i.e., Newton's law, etc.) cannot be developed since they do not have access to the necessary details to complete a rational model. 2) The main kill mechanism of warheads is usually fragmentations, with air blast being a secondary kill mechanism. Hence, most work has been done on fragmentation effects modelling. 3) The vulnerability analyst and the warhead designer are usually quite unfamiliar with the basic "nuts and bolts" approach of the aircraft stress analyst and, therefore, they never adopt the form of engineering language that the aircraft designer and stress analyst use. This is also compounded by the fact that the aircraft designer has never had to consider warhead effects and has no familiarity with warheads and structural response to blast loading.*

infatti finalizzata alla neutralizzazione di un aereo nemico, essenzialmente un caccia; e di ciò tengono conto a loro volta i progettisti di missili. Aiuta a tale scopo una più precisa definizione di quella che si può indicare come la *vulnerabilità* dei velivoli ad un attacco effettuato per mezzo di missili; la riduzione della vulnerabilità, termine di cui daremo in seguito una definizione tecnicamente più completa ed articolata, può essere ottenuta dopo che siano state individuate la tipologia e l'entità del danno potenzialmente subito dal velivolo nella sua interazione con una testata missilistica; si tratta come già detto di un fenomeno estremamente complesso che dipende da vari parametri, non tutti rilevanti con il caso che qui si esamina. Si pensi ad esempio al fatto che tra i meccanismi di abbattimento di un caccia militare non vi è solo la sua distruzione strutturale, ma anche l'uccisione del pilota o il danneggiamento degli impianti idraulici od elettrici di bordo, compiti questi ultimi cui sono specificamente dedicate le schegge.

Quello che ci siamo proposti di fare, nell'analisi della letteratura sulla vulnerabilità dei velivoli militari, era di individuare la natura e l'entità delle cause di danneggiamento prodotto da una testata missilistica; questo è stato il primo passo verso l'individuazione dei danni che una tale testata poteva avere prodotto sul DC9.

La letteratura che riguarda queste problematiche può dividersi in due filoni complementari, ma per certi aspetti indipendenti. Da un lato molti studi riguardano il problema della più razionale utilizzazione dell'energia resa disponibile dall'esplosione della testata ai fini di massimizzare l'efficacia e l'entità del danno prodotto ad un velivolo, da un altro lato interessano le modifiche che vanno apportate alle strutture dei velivoli al fine di renderli in grado di sopravvivere ad un attacco esterno portato con missili e quest'ultima problematica viene indicata nella letteratura anglosassone con il nome di *analisi della sopravvivenza dell'aereo*⁵.

Va naturalmente ribadito ancora una volta che gli aerei di cui si parlerà qui di seguito sono aerei militari, in particolare caccia: essi hanno una resistenza ai carichi aereodinamici e quindi all'onda di detonazione almeno doppia rispetto ad un aereo quale il DC9. Mentre quindi per i caccia non ci sono dubbi che il meccanismo principale di abbattimento siano le schegge e che l'onda di detonazione sia un meccanismo meritevole di considerazione, ma secondario, ci si deve attendere che ciò possa non

⁵ *aircraft survivability analysis.*

essere più vero per un aereo con la struttura e le dimensioni del DC9.

Una delle ragioni della difficoltà del problema sta anche nel fatto che la base sperimentale sulla quale valutare le caratteristiche dell'interazione tra missile e velivolo, quindi la vulnerabilità dei velivoli ai missili, i punti deboli e gli interventi da effettuare, è costituita dai dati sulla tipologia dei danneggiamenti di velivoli colpiti da missili nelle reali condizioni di combattimento, dati di non facile reperimento ed in genere riservati. A tale scopo il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti ha costituito il **Survivability/Vulnerability Information Analysis Center**⁶ (SURVIAC), che ha come compito quello di fornire:

*la raccolta, la conservazione, la diffusione e l'analisi dell'informazione tecnica e scientifica, i modelli e le raccolte dati riguardanti la sopravvivenza e la vulnerabilità non nucleare degli obbiettivi americani e stranieri aeronautici e di superficie (con esclusione delle navi)*⁷.

Di tali studi, dai quali si può trarre una più realistica valutazione dei danni che sono prodotti da un missile sulla struttura di un aereo e quindi confrontarli con quelli rilevati sul DC9, è disponibile tuttavia un'ampia esposizione in un testo considerato classico in questo settore⁸.

Informazioni utili e rilevanti, anche per la fonte da cui provengono, si possono inoltre trarre dall'esame dei manuali delle norme militari; intendiamo in particolare riferirci ad un testo⁹ che contiene indicazioni sulle avvertenze da seguire nella progettazione degli aerei militari. Lo scopo di questo testo è così descritto¹⁰:

⁶Centro di analisi ed informazione sulla sopravvivenza e la vulnerabilità. Il centro ha il sito Internet: <http://surviac.flight.wpaafb.af.mil/>. L'accesso ai dati del sito è naturalmente concesso solo ad istituzioni presentate dai rispettivi governi.

⁷*the collection, storage, dissemination, and analysis of scientific and technical information, models, and data bases related to nonnuclear survivability and vulnerability of US and foreign aeronautical and surface (excluding ships) targets.*

⁸**Ball R.** *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*; AIAA Education Series, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1985. Tale testo è interamente dedicato alla valutazione della capacità dei velivoli militari di resistere agli attacchi missilistici: ribadiamo ancora una volta che andranno sempre tenute presenti, soprattutto all'atto di fare considerazioni di natura quantitativa, la differenza più volte indicata tra un aereo civile ed uno militare.

⁹MILITARY HANDBOOK, Survivability, aircraft, nonnuclear; Department of Defense, 25.10.1983, che sarà nel seguito indicato con la sigla MIL-HDBK-336-1.

¹⁰MIL-HDBK-336-1, pag. ii.

Questo documento fornisce le informazioni fondamentali e di base sulla metodologia di valutazione e sui requisiti di progetto per la sopravvivenza dei velivoli militari¹¹.

La valutazione della vulnerabilità è basata sulla tipologia del danno inflitto al velivolo; sono definiti¹², nell'ambito di quei livelli di danneggiamenti che non rendono né economico, né ragionevole una riparazione del velivolo, i seguenti principali livelli di abbattimento:

- KK: che corrisponde ad un danneggiamento tale da comportare l'immediato abbattimento del velivolo,
- K: che corrisponde ad un danneggiamento tale da causare la caduta del velivolo entro 30 secondi,
- A: che corrisponde ad un danneggiamento in grado di produrre la caduta del velivolo entro 5 minuti,

I livelli di abbattimento che abbiamo sopra elencato sono i più elevati; essi indicano sostanzialmente se l'abbattimento del velivolo avviene immediatamente o se esso avviene con un certo ritardo. Le modalità di caduta del DC9 corrispondono, in termini di questi indicatori, ad un livello compreso tra KK e K.

Ai vari livelli corrispondono diversi meccanismi di danneggiamento; tra le cause in grado di produrre il livello di danneggiamento KK è esplicitamente citata l'azione della detonazione di una testata missilistica, che quindi è da considerare anche possibile causa del livello K.

La valutazione quantitativa della vulnerabilità rispetto all'azione di una detonazione esterna è ottenuta per mezzo del cosiddetto *volume di vulnerabilità*¹³, che è così definito:

La misura della vulnerabilità di un aereo ai carichi prodotti da una detonazione esterna è il volume di vulnerabilità o l'inviluppo entro il quale la detonazione di una prefissata

¹¹ *This document provides basic and fundamental information on military aircraft survivability requirements and assessment methodology.*

¹² MIL-HDBK-336-1, pag. 5-3.

¹³ MIL-HDBK-336-1, pag. 5-57.

carica di una testata produce il prefissato livello di abbattimento e al di fuori della quale la detonazione non produce danno al velivolo¹⁴.

La determinazione di questo *volume* può essere fatta per via analitica o per via sperimentale. Illustreremo in seguito la documentazione a nostra disposizione relativa agli esperimenti utilizzati nel determinare il volume di vulnerabilità, alle difficoltà ed ai limiti di tale determinazione; per effettuare un approccio analitico erano disponibili già negli anni '80 alcuni programmi di calcolo¹⁵.

L'importanza che ha la detonazione nella valutazione della vulnerabilità di un velivolo è dimostrata dal fatto che un intero paragrafo nel testo contenente le norme militari è dedicato a tale effetto¹⁶; i livelli di maggiore interesse sono, per questa modalità di danneggiamento, il K e l'A¹⁷.

Non rientra naturalmente negli scopi di questa relazione analizzare i contenuti di questa disciplina, ma è utile, proprio per il caso che qui si esamina, dare la definizione di *vulnerabilità*; come vedremo essa contiene alcuni concetti per noi rilevanti. Si afferma¹⁸:

La vulnerabilità di un velivolo si riferisce alla sua incapacità di resistere ad uno o più colpi da parte del meccanismo di danneggiamento, alla sua vincibilità, alla sua debolezza rispetto a seri danneggiamenti o alla distruzione quando colpito dal fuoco nemico... Più vulnerabile è un velivolo, più probabile è che sia abbattuto quando colpito.

Ciascuno dei singoli componenti in un velivolo ha un livello, o grado, o ammontare di vulnerabilità; e la vulnerabilità di ciascuna componente contribuisce in qualche misura alla vulnerabilità complessiva del velivolo. Alcuni componenti contribuiscono più di altri. Le componenti critiche su di un

¹⁴ *The measure of aircraft vulnerability to external blast loading is the vulnerable volume or envelope about the aircraft within which the detonation of a specific warhead weight will result in the required aircraft kill level and outside of which the detonation will result in no damage in the aircraft.*

¹⁵ MIL-HDBK-336-1, Essi sono elencati da pag. 5-63 a pag. 5-75.

¹⁶ MIL-HDBK-336-1, pag. 5-53.

¹⁷ MIL-HDBK-336-1, pag. 5-55.

¹⁸ Ball R. op. cit., pag. 135.

velivolo sono quelle che, se danneggiate o distrutte, porterebbero all'abbattimento del velivolo¹⁹.

Tra le componenti critiche viene individuato il sistema strutturale, del quale si dice²⁰:

Il sistema strutturale è la parte più robusta del velivolo. Tuttavia, danni strutturali possono essere sufficienti a causare l'abbattimento del velivolo²¹.

Anche per le norme militari le parti strutturali sono parti critiche rispetto alla vulnerabilità all'onda d'urto prodotta dalla detonazione²²:

Le componenti critiche di un velivolo vulnerabili al danneggiamento da una detonazione esterna consistono principalmente in parti della struttura del velivolo (per esempio le ali) e nelle superfici di controllo. Il meccanismo di rottura di queste componenti che può produrre l'abbattimento del velivolo comprende le deformazioni strutturali e gli effetti aerodinamici della raffica²³.

Si noti come in questo testo si preveda che l'onda di detonazione esterna agisca con lo stesso meccanismo della raffica, che è proprio

¹⁹ *Aircraft vulnerability refers to the inability of the aircraft to withstand one or more hits by the damage mechanisms, to his vulnerability, to his liability to serious damage or destruction when hit by the enemy fire...The more vulnerable an aircraft is, the more likely it will be killed when hit.*

Each of the individual components in the aircraft has a level, or degree, or amount of vulnerability; and each component's vulnerability contributes in some measure to the overall vulnerability of the aircraft. Some components contribute more than others. The critical components on an aircraft are those components which, if either damaged or destroyed, would lead to an aircraft kill.

²⁰ **Ball R.** op. cit., pag. 148.

²¹ *The structural system is usually the toughest system on the aircraft. However, structural damage can be sufficient to cause an aircraft kill.*

²² MIL-HDBK-336-1, pag. 5-55.

²³ *Aircraft critical components vulnerable to external blast damage consist principally of portions of the airframe structure (e.g. wings) and control surfaces. Failure mechanism of these components which can result in aircraft kill include structural deformation or failure and aerodynamic gust effects.*

il meccanismo citato dalla Commissione Misiti come quello che produrrebbe un danno non macroscopicamente rivelabile; torneremo su questo argomento poichè crediamo che un effetto di raffica abbia contribuito a danneggiare l'ordinata cui è collegato il motore destro.

Conviene ora descrivere quali sono i meccanismi di danneggiamento; essi sono schematicamente così elencati²⁴:

*I meccanismi convenzionali di danneggiamento sono i penetratori, le schegge, le particelle incendiarie e l'onda di detonazione*²⁵.

A seconda di quale è il meccanismo di danneggiamento principale le testate missilistiche possono essere divise in differenti tipologie²⁶:

*Vi sono quattro tipi principali di testate ad alto potenziale esplosivo utilizzate contro gli aerei. Esse sono la testata a detonazione o a pressione, quella a frammentazione, ad asta continua ed a carica preformata*²⁷.

Come si vede in questo testo è esplicitamente affermata l'esistenza di testate a detonazione²⁸. Le testate a detonazione sono descritte nei seguenti termini²⁹:

Nelle testate a pressione il contenitore che circonda la carica di esplosivo ad alto potenziale è relativamente sottile ed il meccanismo primario di danneggiamento è l'onda di pressione a forma sferica in espansione prodotta dalla detonazione della carica. Per quanto tale tipo di testata sia relativamente economica, ha un ridotto raggio di efficacia a causa del piccolo peso della carica nella testata ed alla rapida riduzione della pressione nell'onda con la distanza dal punto di

²⁴Ball R. op. cit., pag. 84.

²⁵*The conventional damage mechanisms are penetrators, fragments, incendiary particles, and blast.*

²⁶Ball R. op. cit., pag. 77.

²⁷*There are four major types of HE warheads used against aircraft. They are the blast or pressure warhead, the fragmentation warhead, the continuous rod warhead, and the shaped charge warhead.*

²⁸Un missile con testata a detonazione è il missile inglese *Rapier*, che però non interessa al nostro caso, essendo un missile terra-aria.

²⁹Ball R. op. cit., pag 77.

detonazione. In conseguenza, nella maggior parte delle testate per obbiettivi aerei la carica è utilizzata essenzialmente per rompere il contenitore in numerose velocissime schegge, sbarrette o penetratori e questi divengono i meccanismi primari di danneggiamento³⁰.

Non crediamo quindi che sia il caso di discutere dell'esistenza o meno delle testate a sola detonazione³¹; la testata è in sostanza la parte meno sofisticata del missile ed è quindi facilissimo sostituire il contenitore dell'esplosivo a frammentazione con un contenitore in alluminio e questa non pare che fosse una prassi tanto inconsueta. Si ottiene in tal modo quella che si chiama una *testata a detonazione incrementata*³²; in particolare una buona amplificazione degli effetti di detonazione si ottiene con contenitori di alluminio a parete doppia. È informazione nota come il missile AA-6, missile di fabbricazione sovietica, ma fornito a molti paesi, fosse sovente modificato con queste modalità dagli stessi paesi utilizzatori. In ogni caso l'analisi che noi qui sviluppiamo, e soprattutto le considerazioni di carattere quantitativo, sono indipendenti dal tipo di testata; anche per le testate a frammentazione infatti il contributo al danneggiamento dell'onda di detonazione non è trascurabile, soprattutto per un aereo come il DC9.

Le modalità di danneggiamento alla struttura vengono descritte in modo più dettagliato, ma due sono particolarmente rilevanti per noi. Il primo è descritto come³³:

Distacco di struttura: Rottura fisica o perdita completa di grosse porzioni delle strutture di carico del velivolo causate da penetrazioni multiple da schegge, dalla detonazione, dal

³⁰ *In the blast warhead, the case surrounding the HE charge is relatively thin, and the primary damage mechanism is the expanding spherically shaped blast wave produced by the detonation of the HE charge. Although this type of warhead is relatively inexpensive, it has a small radius of effectiveness due to small amount of charge weight in the warhead and to the rapid reduction in the blast pressure with distance from the detonation. Consequently, in most aerial target HE warheads the charge is used primarily to break the case into many high velocity fragments, rods, or penetrators, and these become the primary damage mechanisms.*

³¹ Dobbiamo le informazioni qui contenute al nostro collaboratore R. Sewell.

³² *enhanced blast warheads*

³³ **Ball R.** op. cit., pag. 148.

fuoco o dagli effetti della radiazione può produrre una perdita immediata o ritardata del velivolo³⁴

Come si vede l'onda di detonazione è considerata esplicitamente un meccanismo di abbattimento attraverso la sua azione sulle parti strutturali del velivolo. Ma un secondo meccanismo ci interessa anche più direttamente; ed è così descritto³⁵:

Sovraccarico di pressione: Rottura immediata o successiva sotto i carichi di manovra può essere causata dagli effetti di una detonazione esterna che produca un sovraccarico della struttura portante³⁶.

Questo passo è rilevante perchè afferma che l'onda di detonazione può produrre un aumento del fattore di carico: ed abbiamo visto come il fattore di carico massimo, sia circa 4 per il DC9 e circa 8 per un caccia.

Considereremo con particolare cura gli effetti dell'onda di detonazione prodotta dalla testata: modalità di danneggiamento che, come abbiamo sopra dimostrato, è tenuta ben presente da chi deve valutare la vulnerabilità dei velivoli militari. I meccanismi attraverso i quali l'onda di detonazione produce un danneggiamento sulle strutture del velivolo sono così descritti³⁷:

Carico dinamico. Questo carico è prodotto dalla velocità dell'aria nell'onda d'urto rispetto al velivolo. È un carico d'attrito sull'obbiettivo. Il processo di danneggiamento dovuto al carico dinamico produce deformazioni strutturali, flessioni e strappi delle strutture a mensola (ali) e distacco dinamico di ogni attacco non connesso rigidamente (ad esempio tettucci, pannelli, ed antenne).

³⁴ *Structure removal: Physical severance or complete loss of large portions of the load-carrying aircraft structure caused by multiple penetration and fragments, blast, fire, or radiation effects can result in either an immediate or a delayed aircraft loss.*

³⁵ **Ball R.** op. cit., pag. 148.

³⁶ *Pressure overload: Immediate failure or subsequent failure under maneuver loads can be caused by external blast effects that results in overstressing the load-carrying structure.*

³⁷ **Ball R.** op. cit., pag. 89.

Carico di sovrappressione. Questo processo di danneggiamento è quello che deriva dagli effetti della sovrappressione nell'onda di detonazione che colpisce e si muove sulla superficie dell'obiettivo. Si noti che il profilo delle sovrappressioni mostra che la sovrappressione iniziale è in generale seguita da un periodo di depressione. Tutte le strutture semichiuso o i contenitori nel velivolo (ad esempio la cabina, i serbatoi del combustibile od idraulici) possono subire un improvviso ciclo compressione/decompressione che può avere come conseguenza una rottura strutturale o una perdita di integrità anche se esse non sono localizzati direttamente di fronte all'onda di detonazione³⁸

È necessario commentare a fondo questo brano, che consideriamo cruciale per comprendere le modalità di danneggiamento del DC9 ITA-VIA: come si vede i meccanismi di danneggiamento sono due, collegati ma per certi aspetti indipendenti, entrambi letali. Il primo è legato alla velocità del fronte d'onda e conseguentemente alla velocità dell'aria a valle e dipende in modo critico dalla velocità relativa del velivolo e dell'aria nel fronte d'onda; esso può essere pensato come un elevato aumento della resistenza aerodinamica incontrata dal velivolo. Il secondo è indipendente da tale velocità ed è un aumento della pressione statica applicata alle pareti del velivolo. Come mostreremo in modo rigoroso in seguito, le pressioni dovute al primo effetto possono essere varie volte superiori a quelle dovute al secondo effetto ed essere quindi di gran lunga più importanti nel valutare le conseguenze di una detonazione su di un velivolo in volo. Questo risultato, prevedibile sulla base di elementari

³⁸ *Dynamical Loading* This loading is produced by the velocity of the air in the blast with respect to the aircraft. It's a drag loading on the target. The dynamics loading damage process cause structural deformation, bending and tearing of cantilevered structures (wings) and dynamic removal of any loosely secured attachments (e. g. canopy, panels and antenna)

Overpressure Loading This damage process is the one that results from the effects of the overpressure in the blast striking and moving over the surface of the target. Note that the overpressure profile shows that the initial overpressure is eventually followed by a period of underpressure. Any semiclosed structures or containers in the aircraft (e. g. cockpit, fuel tanks, and hydraulic reservoirs) can experience a sudden compression/decompression cycle that could result in structural failure or loss of integrity even though they were not located directly facing the blast

considerazioni di aerodinamica, è anche ricavabile dalle precise indicazioni sulle modalità di interpretazione degli esperimenti che sono contenute nei testi tecnici qui da noi citati, come vedremo meglio tra breve.

Nella conclusione di questo capitolo daremo una dimostrazione quantitativa che è stato proprio questo il meccanismo che, agendo sulla sezione critica del DC9, ha prodotto il distacco del suo motore destro.

Esso tuttavia non pare essere stato preso in considerazione dalla Commissione Misiti, la quale, nella sua analisi dello scenario che un missile sia stata la causa della caduta del DC9, ha preso in considerazione solo il secondo degli effetti sopra ricordati, precisamente quello statico. Questo errore è anche commesso dal Perito M. Held in una sua relazione, a quanto si desume dalla lunga citazione riportata nella Requisitoria dei Pubblici Ministeri³⁹. Il fatto che non vi sia *il tipico foro causato dall'onda espansiva dell'esplosione di una carica ad alto esplosivo* fa riferimento esclusivamente all'effetto statico della carica⁴⁰, ma non tiene conto del principale meccanismo di danneggiamento di un'onda di detonazione su di un velivolo in moto.

Va detto tra l'altro come non sia necessario produrre fori per ridurre la capacità di volo di un aereo; si ha infatti che⁴¹:

una sovrappressione dinamica di 2 libbre al pollice quadrato⁴² sulla superficie superiore della coda orizzontale può essere sufficiente a produrre uno schiacciamento del rivestimento, causando una perdita di rigidità ed una incapacità di sopportare i carichi di volo⁴³.

Mostreremo quantitativamente che il primo dei due effetti sopra descritti, quello dinamico, è in grado di applicare da solo al motore destro una forza tale da produrre la rottura del suo vincolo con la fusoliera;

³⁹ *Requisitorie del Pubblico Ministero*. Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 192.

⁴⁰ Mostreremo in seguito come in realtà un danno dovuto a questo effetto sia stato probabilmente prodotto sul lato destro della fusoliera e ciò permette di giustificare alcuni dati dell'incidente del DC9.

⁴¹ **Ball R.** op. cit., pag. 158.

⁴² Che corrispondono a 0.014 N/mm^2

⁴³ *a dynamic overpressure of 2 lb/in² over the upper surface of a horizontal tail for 1 ms may be sufficient to cause crushing of the skin, leading to a loss of stiffness and an inability to support the flight loads.*

ma vedremo che anche altri meccanismi hanno prodotto sollecitazioni proprio nella zona della fusoliera cui è vincolato il motore ed hanno quindi concorso, nel caso in esame, ad innescare il processo che ha provocato la perdita del DC9.

Un approccio teorico al problema generale della sopravvivenza dei velivoli è sostanzialmente impraticabile, proprio per il fatto che i meccanismi di interazione sono molto diversi l'uno dall'altro, ma anche gli approcci sperimentali sono difficili, come è ben spiegato in un testo di balistica terminale che, data la sua rilevanza per il tema qui in discussione, citiamo per esteso. A proposito della valutazione della vulnerabilità di un velivolo, o meglio della sua interazione con una testata missilistica, si dice infatti⁴⁴:

La produzione di dati balistici terminali per una configurazione di un velivolo può essere ottenuta in vari modi, inclusi gli studi analitici di tipo a priori, l'analisi dei dati operativi, e degli esperimenti di esplosioni contro velivoli obbiettivo in condizioni controllate. A causa della complessità dei velivoli e dei diversi meccanismi di danneggiamento, relativamente pochi dati di vulnerabilità sono stati ottenuti dagli studi analitici di tipo a priori, per quanto tentativi siano attualmente in corso di effettuazione per ottenere qualche comprensione di natura analitica sul danneggiamento causato alla struttura da una detonazione esterna. Questo lavoro è principalmente interessato alla risposta dinamica e al comportamento dei vari elementi strutturali in condizioni reali e simulate. Ci sono stati dei tentativi di ottenere informazioni sulla vulnerabilità dai dati operativi di precedenti conflitti. Sfortunatamente i velivoli che sarebbero di interesse principale in questi studi non possono essere studiati poichè sono quelli che vengono abbattuti e non ritornano. Tenendo conto che una trattazione generale dell'analisi dei dati operativi è al di fuori degli scopi di questa sezione, ci si limita semplicemente ad affermare che i dati operativi sono soggetti a certe limitazioni intrin-

⁴⁴RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MATERIAL, *Engineering design handbook, Elements of terminal ballistics*; Part two, Collection and analysis of data concerning targets. AMCP 706-161, Headquarters U. S. Army Materiel Command, November 1962, pag. 8-19.

seche, e che la disponibilità di tali dati in quanto validi non esclude la necessità di prove di vulnerabilità. Essenzialmente per le ragioni appena dette, l'uso di esperimenti di esplosione contro velivoli obbiettivo in condizioni controllate rimane il principale mezzo per la produzione di dati di vulnerabilità. Alcune delle restrizioni e delle limitazioni di questo approccio empirico sono state discusse in... ⁴⁵

Consideriamo questo brano interessante da vari punti di vista: da un lato infatti sono esplicitamente illustrate le difficoltà del problema e le limitazioni sia degli studi analitici che degli esperimenti, dall'altro si individua nell'onda di pressione un rilevante meccanismo di danneggiamento.

Nel seguito di questo testo si descrive una imponente campagna di esperimenti aventi come scopo di accertare la vulnerabilità all'onda di pressione dei vari tipi di aerei, in diversi assetti e con diverse cariche: tali esperimenti erano effettuati appendendo un aereo ad una apposita struttura e facendo esplodere una carica all'esterno. L'ampiezza di questa sperimentazione mostra di per sé come questo meccanismo non sia per nulla trascurabile.

⁴⁵ *The generation of terminal ballistic data for an aircraft configuration may be accomplished in several ways, including analytic studies of an a priori nature, analysis of operational data and firing tests made against target aircraft under controlled conditions.*

Due to complexity of aircraft and of the various damage mechanism, relatively little vulnerability data have been forthcoming from analytic studies of an a priori nature, although attempts are currently being made to obtain some analytic understanding of the damage caused to airframe by external blast. This work is mainly concerned with the dynamic response and the behavior of various structural elements under actual and simulated environments.

There have been attempts to obtain vulnerability information from the operational data of past conflict. Unfortunately, the aircraft which would be of primary interest in such studies cannot be studied, because they are the ones which are killed and do not return. Inasmuch as a comprehensive treatment of the analysis of operational data is outside the scope of this section, it is simply asserted that operational data are subject to certain intrinsic limitations, and the availability of such data as is valid does not preclude the need for vulnerability testing.

Essentially for the reasons just given, the use of firing tests against target aircraft under controlled conditions remains as the primary means for the generation of vulnerability data. Some of the restriction and limitations of this empirical approach have been discussed in...

Il risultato di questi esperimenti è stato quello di determinare il volume di vulnerabilità. Nella figura 2⁴⁶ e 3⁴⁷ sono mostrati esempi di volumi di vulnerabilità.

Più che il risultato di questi esperimenti conviene porre però in evidenza alcune osservazioni relativi ad essi che interessano il nostro caso. In generale l'esperimento statico (aereo fermo, appeso ad un traliccio e carica appesa vicino) non pare rappresentare in modo realistico le sollecitazioni effettive sopportate da un aereo in volo. Si osserva infatti⁴⁸:

I risultati di questi test devono essere applicati con cautela poichè le differenze tra la situazione degli esperimenti ed il caso effettivo di un missile che esplode vicino ad un velivolo in volo sono molte. Se sia il missile che l'aereo sono in volo, vi sarà allora un cambiamento nella pressione e nella quantità di moto dell'onda di pressione causata dall'alta velocità relativa tra missile ed aereo al momento della detonazione. Poi, inoltre, le ipotesi sull'equivalenza tra il peso della carica in aria e le modifiche della distanza carica-aereo per l'aereo sospeso alla torre può essere in errore. In conclusione, un aereo sopporta un sistema di carichi completamente diverso e più severo in volo di quando è staticamente sospeso o appoggiato⁴⁹.

⁴⁶ RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MATERIAL, *Engineering design handbook, Elements of terminal ballistics*; Part two, Collection and analysis of data concerning targets. AMCP 706-161, Headquarters U. S. Army Materiel Command, November 1962, pag. 8-21.

⁴⁷ Held M., *Warheads for SAM Systems*, AGARD Lecture series No. 135, pag. 10-17

⁴⁸ RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MATERIAL, *Engineering design handbook, Elements of terminal ballistics*; Part two, Collection and analysis of data concerning targets. AMCP 706-161, Headquarters U. S. Army Materiel Command, November 1962, pag. 8-22.

⁴⁹ *The results of these tests must be applied with caution since the differences between the test firing arrangement and the practical case of a missile exploding near an aircraft in flight are many. If both missile and aircraft are in flight, then there will be a change in blast pressure and impulse caused by the high relative velocity between missile and aircraft at the instant of detonation. Then, too, the assumptions regarding equivalent charge weight in free air and modifications of charge-to-aircraft distances for the aircraft suspended from tower may be in error. Finally, an aircraft would sustain an entirely different and more severe system of loading in flight than it did statically suspended or supported.*

In questo testo, di carattere eminentemente pratico e sperimentale, c'è una precisa indicazione sull'importanza degli effetti dinamici da noi già sopra ricordata, e si pone in rilievo anche come, nel calcolo dell'influenza della distanza sugli effetti di una carica, si debba tenere conto della riduzione di tale distanza dovuta al moto relativo tra onda di detonazione e velivolo; si deve inoltre tenere conto del fatto che un aereo in volo è sottoposto ad una serie di carichi anche in assenza di una esplosione esterna; questa avvertenza è particolarmente enfatizzata dove si dice⁵⁰

Si crede che gli esperimenti indichino una vulnerabilità del velivolo più bassa di quanto non sia in effetti⁵¹.

Va in conclusione osservato come per la maggior parte dei missili all'azione dovuta alle schegge si associa sempre a quella dovuta all'onda di pressione⁵²; questo vale per l'AA-2 Atoll, l'AA-6 Acrid, l'HATCP, il Sidewinder.

7.3 L'ipotesi missile nella relazione d'ufficio

Come abbiamo visto poco sopra l'interazione tra una testata missilistica ed un velivolo appare essere un fenomeno estremamente complesso anche per coloro che possono essere considerati tra i maggiori esperti del settore: tale interazione è invece descritta in modo drasticamente semplificato dalla Commissione Misiti. L'ipotesi che il DC9 sia stato abbattuto da un missile è stata considerata non tecnicamente possibile essenzialmente sulla base di due punti tra loro collegati che schematicamente possono così essere indicati:

1. La non esistenza di fori dovuti a schegge sui rottami del DC9.

⁵⁰RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MATERIAL, *Engineering design handbook, Elements of terminal ballistics*; Part two, Collection and analysis of data concerning targets. AMCP 706-161, Headquarters U. S. Army Materiel Command, November 1962, pag. 8-23.

⁵¹*It is believed that the test results indicate lower vulnerability of the aircraft than the true vulnerability.*

⁵²Gunston B., *Modern Airborne Missiles*; Salamander Books, 1983.

2. L'impossibilità per la sola detonazione di abbattere un velivolo.

Per permettere una più approfondita analisi di queste argomentazioni, conviene citare per esteso il brano dal quale esse sono state ricavate⁵³.

Dalle analisi di possibili scenari esterni effettuate nei precedenti capitoli, ivi compreso lo scenario ipotizzato da Mr. Sewell, emerge che se il velivolo I-TIGI fosse stato abbattuto deliberatamente od accidentalmente da uno o più missili, questo avrebbe potuto accadere per effetto di differenti meccanismi distruttivi a seconda dello scenario di riferimento, ma sempre principalmente riconducibili o all'effetto delle schegge, o all'effetto dell'impatto con il corpo del missile. Questo secondo caso, come in precedenza riportato, potrebbe essersi verificato nell'ambito dello scenario che prevede il mancato armamento del detonatore o nell'ambito dello scenario ipotizzato da Mr. Sewell, nel quale risulta irrilevante il danno provocato dalle schegge.

Non sono ragionevolmente da aspettarsi macroscopici danni sul velivolo derivanti da effetti di onda di pressione generata dalla detonazione della carica esplosiva della testa di guerra in quanto, nel 1980, non erano operative teste di guerra a pressione e, d'altra parte, è generalmente da ritenersi trascurabile questo tipo di danno per le teste a frammentazione che esplodono alla miss distance dal bersaglio.

Queste considerazioni hanno avuto una enorme importanza nell'ambito della strategia di indagine della Commissione Misiti: esse infatti hanno impedito non solo l'effettuazione di prove sperimentali, che peraltro, come abbiamo visto, sono estremamente delicate, ma anche semplicemente l'acquisizione della documentazione da noi sopra citata. Da essa appare chiaro che il danno prodotto dagli effetti delle onde di pressione non è per niente trascurabile ed infatti ad esso viene dedicato ampio spazio nella definizione dei criteri di progettazione dei velivoli militari.

⁵³Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Förshing H., Gunnval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.: *Relazione Tecnica*, 20.7.1994, , pag IX-30.

Questo è tanto più importante per la nostra analisi in quanto i caccia hanno una grande resistenza alle sollecitazioni di natura aereodinamica.

Ma l'affermazione cruciale di questo testo è quella contenuta nelle ultime righe, con le quali quindi è doveroso confrontarsi. La logica seguita è la seguente:

1. Non esistevano testate che non producono schegge,
2. Se non ci sono segni di fori prodotti da schegge un eventuale missile è quindi esploso lontano dal velivolo (*miss distance*),
3. A questa distanza il danno prodotto dall'onda di detonazione è *generalmente da ritenersi trascurabile*.

Per quanto riguarda il punto 1 va detto che si tratta di una affermazione apodittica: non si deve infatti credere che esista una catalogazione ufficiale e normata di tali apparati. Anzi si tratta di un settore nel quale da un lato la documentazione disponibile è ovviamente molto carente e dall'altro le modifiche e le innovazioni sono particolarmente frequenti, soprattutto nelle testate, che rappresentano la parte tecnologicamente meno evoluta dell'intero apparato. Il punto 2 contiene una valutazione quantitativa: noi abbiamo mostrato⁵⁴, ma è ben ricavabile anche dalla letteratura⁵⁵, che esistono ampie zone intorno all'aereo entro le quali le schegge prodotte dall'esplosione di una testata a frammentazione colpiscono in minima percentuale; la forma e la dimensione di queste zone dipenda da molti parametri.

Si noti inoltre come il numero di fori prodotti dalle schegge sull'aereo integro, è sicuramente superiore a quello riscontrabile sul relitto soprattutto se la loro densità non è piccolissima poiché⁵⁶

*Fratture possono verificarsi tra i fori prodotti dai singoli schegge, aumentando l'estensione del danno*⁵⁷

⁵⁴Nell'Appendice B sono dati alcuni esempi ed un programma di calcolo che permette di calcolare, per tutti gli assetti relativi tra velivolo e missile, la percentuale di schegge che colpiscono la fusoliera.

⁵⁵Ball R. op. cit., pag. 188.

⁵⁶Ball R. op. cit., pag. 88.

⁵⁷*Cracks can occur between the holes caused by the individual fragments, compounding the extent of damage*

Si deve infatti pensare che all'atto della definitiva distruzione dell'aereo sul mare le ulteriori fratture si siano prodotte seguendo gli inviti costituito dai fori eventualmente già presenti.

Si deve d'altronde far notare come il bordo di attacco dell'ala destra del relitto, data la deformazione subita, non ha mai potuto, a nostro avviso, essere ben esaminato da questo punto di vista.

In conclusione vogliamo porre in evidenza come ci si debba attendere che il meccanismo di azione di una testata missilistica su di un aereo civile sia molto diverso da quello che interviene su di un caccia; in particolare le forze di natura aerodinamiche, che dipendono dalle dimensioni, avranno un ruolo maggiore di quanto non abbiano su di un caccia. Inoltre la resistenza alle perturbazioni esterne di un aereo civile è inferiore a quelle di un aereo militare; in modo sintetico, ma efficace, utilizzando il fattore di carico, si può esprimere questo concetto dicendo⁵⁸:

...i massimi valori di fattore di carico per il velivolo DC-9 non superano i 4 g (a rottura) mentre per i velivoli militari da combattimento possono superare i 7 g (a rottura)...

il che vuole dire, schematizzando un poco, che il DC9 è in grado di sopportare accelerazioni 4 volte quelle di gravità (g) mentre un caccia militare può arrivare fino ad accelerazioni 7 volte quella di gravità.

7.4 L'abbattimento del DC9

7.4.1 La dinamica della rottura

Convieni, nell'introduzione di questo paragrafo, dedicato alla descrizione delle conseguenze delle azioni di natura aerodinamica sulla struttura di un velivolo in volo, con riferimento ovviamente all'incidente occorso al DC9, riportare integralmente quanto scritto in proposito dalla Commissione Misiti⁵⁹.

⁵⁸Casarosa C., Held M.; *Quesiti a chiarimento posti dall'AG*, 23.11.1994, pag. 5-31.

⁵⁹Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Förshing H., Gunnval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.; *Relazione Tecnica*, 20.7.1994; Paragrafo 3.2, pag. IX-49.

Si è in precedenza riportato che la frammentazione in volo del velivolo può essere avvenuta a causa di sovrasollecitazione derivanti dal superamento del fattore di carico di progetto che possono aver determinato il cedimento delle sezioni critiche del velivolo rispetto a tale tipo di sollecitazione.

L'esame della casistica di incidenti aerei avvenuti per cedimenti strutturali derivanti da superamento dei carichi di progetto, mostra che essi, per la maggior parte dei casi, sono state determinate da anomale situazioni di carico conseguenti ad eccezionali valori di turbolenza atmosferica presente nella zona attraversata dal velivolo incidentato.

In precedenza si è anche osservato che il cedimento delle sezioni critiche per sovraccarico strutturale sarebbe in accordo con la sequenza e con le modalità di distacco in volo dei diversi frammenti recuperati, appartenenti alla parte posteriore della fusoliera.

Il cedimento dell'estremità della semiala sinistra, in questa ipotesi, potrebbe certamente essere una conseguenza dei precedenti cedimenti.

In particolare, il cedimento ed il distacco del tronco di coda con le superfici di stabilizzazione, è generalmente associabile alla nascita di un momento picchiante sul resto del relitto, tale da portare le due semiali ad operare ad un angolo di incidenza, rispetto alla direzione della velocità, opposto a quello normale di volo.

A causa dell'angolo di incidenza invertito, sulle due semiali può avere agito un carico aerodinamico opposto (diretto verso il basso) a quello agente nelle condizioni normali di volo (diretto verso l'alto) che, se di elevato valore, può avere determinato la rottura della semiala con deflessione verso il basso, come rilevabile sul relitto.

Poichè la semiala è generalmente progettata come una trave a sbalzo di uniforme resistenza, la posizione della sezione di rottura lungo l'apertura alare può essere stata del tutto casuale.

Una ipotesi di questa natura sarebbe pertanto congruente con la sequenza e le modalità di separazione in volo dei fram-

menti del velivolo in precedenza discusse e la causa dell'incidente sarebbe stata tale da non avere lasciato alcun segno caratteristico di natura macroscopica sul relitto stesso che, come in precedenza osservato, è la peculiare caratteristica di questo incidente di volo⁶⁰.

Pertanto, a parere del CP⁶¹, l'ipotesi che la causa dell'incidente possa essere attribuita a cedimento strutturale per superamento dei carichi limiti di progetto indotti da particolari valori di turbolenza atmosferica, merita una attenta valutazione.

Come è noto, questa possibile causa dell'incidente fu esclusa dal Commissione Misiti sulla base del fatto che nel punto dell'incidente, quando vi passò il DC9, non vi erano condizioni metereologiche tali da produrre turbolenze.

Questo testo resta interessante, poichè indica un meccanismo di natura aerodinamica, in grado di produrre la sequenza di rotture che in effetti si sono verificate, giustificando anche tra l'altro le modalità di rottura dell'ala sinistra.

È importante notare come la sequenza di rottura abbia inizio nell'ordinata di attacco dei motori: come dimostriamo qui di seguito una testata missilistica esplosa nella parte anteriore destra ha prodotto proprio sul motore un carico dinamico in grado di produrne il distacco.

7.4.2 Modalità di distacco del motore destro

Come abbiamo sopra già ricordato il primo evento che ha determinato il collasso dell'intera struttura è stato il distacco del motore destro, avvenuto con rotazione della sua parte anteriore verso l'esterno. Un evento del genere si verifica se il motore è soggetto ad una spinta diretta dalla parte anteriore verso quella posteriore; opposta quindi a quella dovuta alla propulsione nelle normali condizioni di volo.

Se si osservano gli elementi che uniscono la gondola del motore alla fusoliera si può osservare una sostanziale differenza tra l'attacco

⁶⁰Abbiamo già osservato, nell'introduzione al Capitolo 5, come ciò sia da attribuire al fatto che le forze di natura aerodinamica sono forze distribuite su ampie zone del velivolo.

⁶¹In questa relazione la Commissione Misiti.

anteriore e quello posteriore. Le sollecitazioni che agiscono su questi attacchi, oltre a quelle dovute al peso del motore ed alle forze d'inerzia che agiscono sul motore in fase di manovra, sono essenzialmente quelle dovute, in esercizio, alla spinta del motore e, in caso di avaria, alle forze aerodinamiche che agiscono sul motore stesso. In fase di esercizio la sollecitazione che interessa l'attacco posteriore è essenzialmente uno sforzo di trazione dovuto alla coppia che si genera per effetto della spinta del motore; per l'attacco anteriore si ha invece una forza di compressione oltre che una forza verso l'avanti. In caso di avaria del motore le sollecitazioni sugli attacchi si invertono; l'attacco anteriore risulta allora teso mentre quello posteriore risulta compresso.

Gli elementi strutturali di attacco sono quindi stati dimensionati per sopportare, con opportune margini di sicurezza, una spinta in avanti pari alla spinta del motore (circa 70 kN) oppure una forza di segno opposto, ma di entità sicuramente minore. In accordo con ciò l'attacco posteriore risulta costituito da un elemento piatto con piccolo momento d'inerzia: esso appare quindi molto più adatto a sopportare sforzi di trazione che di compressione per i quali può presentare fenomeni di instabilità. Viene quindi logico pensare che, in caso di una rilevante spinta da avanti verso dietro, si sia verificata questa sequenza di eventi:

1. Una deformazione per instabilità dell'attacco posteriore (ciò spiega tra l'altro lo schiacciamento del pilone e degli elementi in esso contenuti),
2. Un aumento delle sollecitazioni di trazione nell'attacco anteriore, dovuto alla riduzione del braccio di leva, e la sua conseguente rottura,
3. Il distacco del motore a partire dalla parte anteriore fino alla rottura dell'attacco posteriore.

7.4.3 Le forze sul motore

La testata di un missile esplosa nella parte anteriore destra della fusoliera ha prodotto diverse sollecitazioni di natura aerodinamica sul velivolo; quello che è stato da solo in grado di staccare il motore è stato il carico dinamico prodotto dall'onda di detonazione.

L'onda di detonazione

Calcoliamo qui di seguito la forza applicata da un'onda di detonazione al motore con elaborazioni suggerite anche dal Prof. Maurizio Pandolfi, Ordinario di Aerodinamica presso il Politecnico di Torino. Si indichi con W la quantità di esplosivo in TNT equivalente, T la temperatura in kelvin alla quota dell'esplosione, T_0 la temperatura in kelvin al livello del mare, P la pressione in N/mm^2 alla quota dell'esplosione, P_0 la pressione al livello del mare ed R la distanza dal punto dell'esplosione in metri. Si definisce una distanza scalata con la formula⁶²:

$$R_s = \frac{R f_d}{W^{1/3}} \quad (7.1)$$

dove:

$$f_d = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{1/3} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/3} \quad (7.2)$$

Il picco di sovrappressione positiva prodotto da una carica esplosiva vale⁶³:

$$P_m = \frac{808 B_1}{\sqrt{B_2 B_3 B_4}} P \quad (7.3)$$

dove:

$$B_1 = \left[1 + \left(\frac{R_s}{4.5}\right)^2\right] \quad (7.4)$$

$$B_2 = \left[1 + \left(\frac{R_s}{0.048}\right)^2\right] \quad (7.5)$$

$$B_3 = \left[1 + \left(\frac{R_s}{0.32}\right)^2\right] \quad (7.6)$$

$$B_4 = \left[1 + \left(\frac{R_s}{1.35}\right)^2\right] \quad (7.7)$$

da questa si ricava la velocità del fronte d'onda espressa in Mach⁶⁴:

$$M_x = \sqrt{\frac{(k+1)P_m}{2kP} + 1} \quad (7.8)$$

⁶²Kinney G. F., Graham K. J., *Explosive shocks in air*. II Ed., Springer-Verlag, 1985, pag. 108

⁶³Kinney G. F. et al., op. cit., pag. 94.

⁶⁴Kinney G. F. et al., op. cit., pag. 56.

dove $k = c_p/c_v$ è il rapporto tra i calori specifici a pressione costante e a volume costante e può essere assunto eguale a 1.4. Indicando con a la velocità del suono nel punto dell'esplosione si ricava a_1 , velocità del suono nel fronte d'onda:

$$a_1 = \left(\frac{P_m}{P} + 1 \right)^{\frac{k-1}{2k}} a \quad (7.9)$$

Da questa si ricava u_1 , velocità delle particelle nel fronte d'onda:

$$u_1 = \frac{2}{k-1} \left(\frac{a_1}{a} - 1 \right) a \quad (7.10)$$

Il valore di picco delle pressione riflessa che si genera quando l'onda d'urto incontra una parete ferma è quindi dato dalla:

$$P_r = \left[\left(\frac{a_1}{a} + \frac{k-1}{2a} u_1 \right)^{\frac{2k}{k-1}} - 1 \right] P \quad (7.11)$$

Nel caso di una parete che si muove verso il fronta d'onda con la velocità u_2 occorre sommare tale velocità ad u_1 ; si ha quindi:

$$P_r = \left[\left(\frac{a_1}{a} + \frac{k-1}{2a} (u_1 + u_2) \right)^{\frac{2k}{k-1}} - 1 \right] P \quad (7.12)$$

Si noti come, nell'ipotesi che l'esplosione sia avvenuta nella parte anteriore destra della fusoliera, a questa si applica la pressione data dalla 7.11, poichè la distanza di tale parte rispetto alla posizione dell'esplosione non varia, mentre al motore si applica la 7.12 poichè il motore si avvicina al luogo dell'esplosione con la velocità u_2 .

Nel grafico allegato (Figura 4) sono rappresentate per diversi valori della carica esplosiva i valori del picco di pressione riflessa su di una superficie che si muove verso il punto dell'esplosione ad una velocità di 230 m/s (che è la velocità che aveva il DC9 e che corrisponde a $u_2/a = 0.742$) in funzione della distanza dal punto dell'esplosione.

Si noti che la distanza è quella che la superficie ha, dal punto dell'esplosione, nell'istante dell'esplosione stessa; questa distanza è maggiore di quella a cui la superficie incontra il fronte d'onda. A titolo di esempio si consideri una superficie che si trova, nell'istante dell'esplosione di 30 kg di TNT a 17.5 m dal punto dell'esplosione e si muova verso

di essa alla velocità di 230 m/s . Essa incontra il fronte d'onda a 13 m dal punto dell'esplosione, dopo 19.6 ms , tempo in cui percorre 4.5 m . A questa distanza il picco di pressione riflessa risulta, nel caso dell'esempio, circa una volta e mezzo più grande di quello che si avrebbe, sempre su una superficie in movimento, a 17.5 m . Questo effetto, combinandosi con quello che la velocità della superficie ha sulla pressione riflessa (formula 7.12), fa sì che questa risulti molto maggiore di quella che si avrebbe su di una superficie ferma. Il picco di pressione riflessa su di una superficie in movimento, che si trova a 17.5 m dalla carica nell'istante dell'esplosione risulta essere circa 6 volte maggiore di quello che si otterrebbe nel caso di parete ferma alla stessa distanza.

Tenendo conto delle considerazioni del paragrafo precedente è ragionevole pensare che una forza dell'ordine di quattro volte la spinta del motore ne debba provocare il distacco. Se si suppone questa forza distribuita sulla superficie frontale del motore, che vale $1.4 \times 10^6 \text{ mm}^2$, si ottiene la pressione:

$$P_{\sigma} = \frac{70.000 \times 4}{1.4 \times 10^6} = 0.2 \frac{N}{\text{mm}^2} \cong 30 \text{ psi} \quad (7.13)$$

che può essere assunto come valore critico del picco di pressione che provoca il distacco del motore.

Dalla tabella sopra riportata si vede che si superano questi valori di pressione nelle seguenti condizioni:

- carica di 10 kg che esplode ad una distanza inferiore a 12.5 m
- carica di 20 kg che esplode ad una distanza inferiore a 15.5 m
- carica di 30 kg che esplode ad una distanza inferiore a 18.0 m

Le altre forze

Abbiamo notato sopra⁶⁵, riferendoci alla relazione della Commissione Misiti, come gli elementi della zona di attacco dei motori abbiano una caratteristica strutturale particolare: essi risultano essere elementi critici nel caso di elevate sollecitazioni cui sia sottoposto il velivolo.

D'altro canto abbiamo già dimostrato come la pressione applicata al motore destro dall'onda di detonazione sia in grado di applicare al

⁶⁵Alla pagina 62 di questa Relazione

motore una forza tale da rompere i vincoli che lo collegano alla fusoliera. Questa non è stata però l'unica forza applicata alle ordinate di attacco dei motori; altre sollecitazioni, la cui valutazione quantitativa è peraltro molto più complessa hanno agito sulla stessa parte del velivolo.

L'onda di detonazione, che ha investito tutte le strutture del velivolo, ha prodotto tutti gli effetti di una raffica⁶⁶, ma, a causa della sua durata temporale limitata, non sarebbe stata presumibilmente in grado di produrre da sola un incremento del fattore di carico tale da causare un cedimento delle strutture dell'aereo. Essa ha però contribuito a sollecitare una parte strutturale del velivolo già sottoposta al violento carico applicato direttamente al motore destro da noi precedentemente calcolato.

Ma altre due sollecitazioni hanno indubbiamente agito sugli attacchi dei motori. L'onda di detonazione, agendo sulla struttura dell'aereo, ha sicuramente indotto una improvvisa variazione del suo assetto di volo; è noto come tali variazioni producono sollecitazioni sugli attacchi a causa dell'effetto giroscopico⁶⁷. L'onda di detonazione, che ha investito il motore, data la sua elevata temperatura e la sua elevata velocità, ha presumibilmente spento il motore destro; ciò ha prodotto una spinta asimmetrica dei motori con una ulteriore sollecitazione sulle ordinate di attacco⁶⁸.

7.5 Altre conseguenze della detonazione

Una esplosione avutasi nella parte anteriore destra della fusoliera non ha, a nostro avviso, potuto produrre alla fusoliera stessa danni strutturali tali da essere causa diretta della caduta del DC9: abbiamo visto come la causa prima sia da attribuirsi al fatto che essa ha prodotto il distacco del motore destro. Come è stato dimostrato sopra ciò è dovuto al fatto che la velocità relativa tra lato della fusoliera ed onda di detonazione è nulla. È sicuro però che può avere prodotto alcuni danni del tipo mostrato nelle Figure 5⁶⁹; può cioè avere staccato alcuni pannelli della fusoliera

⁶⁶Si veda, a questo proposito quanto detto a pagina 72 di questa relazione.

⁶⁷Chun-Yung Niu M., *Airframe structural design*, Connilit Press; pag. 69.

⁶⁸Chun-Yung Niu M.: op. cit. pag. 65.

⁶⁹Sewell R., Kinney G. F., *Response of structures to blast: a new criterion*, Annals of the New York Academy of Sciences; 152, 532 (1968).

senza danneggiare in modo ampio e decisivo la trame dei correnti e delle ordinate. La fusoliera potrebbe quindi avere conservato la compattezza strutturale fino all'impatto con il mare, pur avendo subito alcuni danni al rivestimento esterno ed anche all'interno. Un tale tipo di danneggiamento è descritto in letteratura; si nota infatti che⁷⁰:

gli effetti della detonazione possono estendersi nell'interno del velivolo e possono danneggiare i fili dell'impianto elettrico, le linee idrauliche, le pareti dei contenitori del combustibile, ed altri componenti interni localizzati nelle vicinanze del rivestimento del velivolo⁷¹.

È noto d'altro canto come, sin dalle prime indagini, la tipologia di alcuni danneggiamenti potesse fare pensare che la causa iniziale dovesse essere collocata nella parte anteriore destra della fusoliera. La giustificazione di essi non è stata data, nè lo poteva, dalla Commissione Misiti; nella loro Requisitoria i Pubblici Ministeri si sono resi conto che ciò costituisce una ulteriore negazione dello scenario di una bomba esplosa nella toilette. Ci pare però che su uno di questi punti, quello del danneggiamento dell'impianto di emergenza per l'ossigeno, i Pubblici Ministeri siano stati indotti in errore dalla metodologia adottata dalla Commissione Misiti. Non si capisce infatti su quale base essi possano sostenere che⁷²

pure in presenza di un danno che apparentemente dovrebbe portare a individuare nella zona anteriore dell'aereo l'evento da cui ebbe origine la distruzione dell'aereo, deve concludersi per l'esistenza di una spiegazione alternativa. Esso, quindi, non può essere considerato significativo ai fini della determinazione delle cause del sinistro, se non nei limiti di indicare un evento repentino che abbia immediatamente interessato la parte superiore della fusoliera, in un tratto ove passino i condotti di alimentazione dell'impianto.

⁷⁰Ball R. op. cit., pag. 158.

⁷¹*the effects of the blast can extend into the interior of the aircraft and can damage electrical wiring, hydraulic lines, fuel tank walls, and other internal components located close to the aircraft skin.*

⁷²*Requisitorie del Pubblico Ministero, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 75*

In realtà la necessità di cercare *una spiegazione alternativa* sarebbe imposta solo dall'accettazione dello scenario di esplosione nella toilette; tale danneggiamento è invece perfettamente giustificato dall'esplosione di una testata missilistica nella parte anteriore destra del DC9; esso è peraltro ben descritto, nelle sue tipologie essenziali nel testo sopra citato.

In questo scenario anche altri fatti, ai quali non è stata data spiegazione convincente dalla Commissione Misiti, possono trovare una naturale giustificazione. Il danneggiamento della fusoliera, immediatamente precedente al distacco del motore, è stato presumibilmente la causa del fatto che il solo motore destro abbia⁷³

evidenziato danni significativi dovuti all'ingestione di parti estranee di non notevole entità.

Va notato come questo dato, a nostro avviso di indubbio rilievo, e che rappresenta di fatto l'unico elemento di diversità tra i due motori, si ricava direttamente dalla relazione sullo stato dei motori⁷⁴, ma esso sia stato invece totalmente ommesso nella PRU⁷⁵. Anche lo spegnimento del motore può essere giustificato dall'onda calda prodotta dalla detonazione.

Il ritrovamento dei frammenti AZ32 e AZ204⁷⁶ in una zona distante da quella della restante fusoliera può essere finalmente giustificato; tali frammenti possono essersi staccati in quota e non avere seguito il resto della fusoliera, che avrebbe tuttavia conservato una sua connessione globale. È da notare inoltre che nella ricostruzione del relitto, molte parti del fianco anteriore destro della fusoliera risultano mancanti; nulla vieta di pensare che esse si siano staccate al momento dell'esplosione e siano finite in mare lontane dalla zona C, nella quale sono stati ritrovati i frammenti della parte anteriore della fusoliera. Si potrebbe inoltre osservare come, per i piccoli frammenti di non sicura collocazione ritrovati in zona

⁷³ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 52

⁷⁴ Guberti A., Maffiodo L., *Relazione indagine Motori JT8-D S/N 656949 653488*, pag. 25.

⁷⁵ (Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Förshing H., Gunnval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.; *Relazione Tecnica*, 20.7.1994, pag. IV-56.)

⁷⁶ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 53.

F, probabilmente non è stata presa in esame una possibile sistemazione nella zona anteriore destra della fusoliera, perchè si è sempre partiti dal presupposto che essi dovessero necessariamente appartenere alla zona di coda.

D'altro canto la zona di fusoliera da cui provengono questi frammenti presenta appunto notevoli deformazioni dall'esterno verso l'interno⁷⁷, anche se non è ovviamente possibile distinguere l'azione dell'onda di detonazione esterna da quella dell'acqua al momento dell'impatto. Curiosamente di questa azione non pare essersi accorto il Perito M. HELD il quale, in un testo citato dai Pubblici Ministeri⁷⁸, esclude:

lesioni da un carico esterno di un'onda di pressione.

pur essendo pacifico che tale azione si è verificata.

Questo parziale danneggiamento del lato destro della fusoliera da ragione, una volta per tutte, del rinvenimento delle due schegge aventi inequivocabili segni di esplosione, che risultano essere penetrati all'interno della cabina. La possibilità che la fusoliera si sia parzialmente aperta, permette quindi di giustificare i segni di contatto con schegge arroventate di cui sono testimoni alcuni oggetti contenuti nella parte anteriore della cabina⁷⁹.

7.6 Conclusione

Una testata missilistica, esplosa in una zona anteriore destra della fusoliera del DC9, ha prodotto un limitato danneggiamento sul lato destro della fusoliera, ed il distacco del motore destro.

Come abbiamo mostrato in precedenza, non possono esistere dubbi sul fatto che la caduta del DC9 sia avvenuta in presenza di altri velivoli e che sia quindi necessario partire da ciò per poter individuare la causa diretta di tale incidente. Questo fatto e la totale assenza di segni

⁷⁷ Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Förshing H., Gunnval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.; *Relazione Tecnica*, 20.7.1994, pag IV-69.

⁷⁸ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 193.

⁷⁹ *Requisitorie del Pubblico Ministero*, Procedimento Penale N. 266/90 APM - N. 527/84 GI (cd. Strage di Ustica), 30.7.1998, pag. 102.

di esplosione interna permettono precisamente di affermare che la scelta della causa dell'incidente va fatta tra la quasi collisione ed il missile.

Come abbiamo visto, l'ipotesi che la quasi collisione sia l'esclusiva causa dell'incidente è difficilmente sostenibile, in quanto le forze applicabili da un aereo che avesse sorvolato il DC9 non erano in grado di rompere la sua ala sinistra; questo a non volere tenere conto dei segni di esplosione e delle modalità di rottura dell'impianto elettrico.

Appendice A

I fori delle schegge

Come è noto, il fatto di non avere trovato i fori delle schegge sui relitti appartenenti alla toilette è stato giustificato¹ con il ridotto numero di rottami di questa parte recuperati; si è detto che mancherebbero da questa parte circa l'80-90 %. Non è dato sapere come è stato calcolato questo dato; ma esso appare essere relativo esclusivamente alle pareti della toilette in senso stretto e non pare tenere conto che altre parti del velivolo circondano la toilette o ad essa sono affacciate, come il motore destro che, come hanno mostrato gli esperimenti effettuati a Ghedi, sono fortemente interessata dalle proiezioni di schegge prodotte da una bomba nella toilette. Mostriamo ora con un conto approssimato come la probabilità di non trovare i segni delle schegge sia, anche in mancanza di pezzi, e per un numero di schegge ragionevole, molto bassa.

Supponiamo che sulle superficie A ci siano n fori di schegge; supponiamo inoltre che a causa di eventi successivi sia disponibile solo una parte di A avente superficie A' , minore di A . Ci si chiede quale è la probabilità p che sulle parte A' non ci sia alcun segno di schegge. Tale probabilità è data dalla:

$$p = (1 - r)^n \quad (\text{A.1})$$

dove è

¹Casarosa C., Castellani A., Cooper D. C., Förshing H., Gunnval G., Held M., Misiti A., Picardi G., Santini P., Taylor A. F.; *Relazione Tecnica*, 20.7.1994

Casarosa C., Held M.; *Osservazioni sui rilievi effettuati dai consulenti di parte civile*, 1.6.1995

$$r = \frac{A'}{A} \quad (\text{A.2})$$

Alcuni risultati ottenuti applicando questa formula sono indicati nella tabella A.1; come si veda da tale tabella se sull'intera superficie fossero presenti 20 fori dovuti alle schegge e quindi $n = 20$ e fosse stato stato recuperato solo il 20% delle pareti della toilette e quindi $r = 0,2$ si avrebbe che la probabilità di non osservare alcun foro sui pezzi recuperati sarebbe circa dell'1,2%.

Tabella A.1. Probabilità di non trovare un foro

n	1	2	5	10	20	50
r	1	1	1	1	1	1
0,05	0,95	0,9	0,77	0,6	0,36	0,077
0,1	0,9	0,81	0,59	0,35	0,12	0,0052
0,2	0,8	0,64	0,33	0,11	0,012	$1,4 \cdot 10^{-5}$
0,3	0,7	0,49	0,17	0,028	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$
0,4	0,6	0,36	0,078	0,006	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-12}$
0,5	0,5	0,25	0,031	$9,4 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-7}$	$8,9 \cdot 10^{-16}$

Questo discorso è chiaramente applicabile anche alle schegge prodotte da una esplosione esterna; la differenza fondamentale sta nel fatto che, come mostrato nell'Appendice B, in tal caso esistono molte posizioni nelle quali poche delle schegge prodotte dall'esplosione delle testata raggiungono il velivolo.

Appendice B

Le schegge del missile

Il programma *Missile*, di cui si accludono le istruzioni d'uso ed i relativi dischetti d'istallazione, effettua una simulazione che permette di quantificare la percentuale di schegge che colpiscono la fusoliera dell'aereo; ed inoltre indica se il missile colpisce direttamente la fusoliera.

Sono state eseguite numerose simulazioni con diverse traiettorie del missile interessanti la zona anteriore destra della fusoliera. Da queste simulazioni si può notare che la proiezione di schegge risulta poco efficace (nessuna scheggia colpisce la fusoliera), se la traiettoria del missile forma con l'aereo un angolo compreso tra 90° e 110° , esplodendo alla distanza di alcuni metri dalla fusoliera. Ciò si può vedere da molti dei disegni acclusi (ad esempio quelli che vanno da Figura 6.1 a 6.7).

Al contrario per angoli prossimi alla traiettoria parallela al moto del DC9 il numero di schegge che colpisce l'aereo è sempre rilevante (Si vedano ad esempio le Figure da 6.8 a 6.10).

Ipotizzando un attacco missilistico condotto da un vettore che percorra la traiettoria che passa per i punti radar -17 e -12, si giungerebbe ad una traiettoria del missile perfettamente compatibile con quelle che, nelle simulazioni comportano il minimo effetto delle schegge.

L'ipotesi di una esplosione della testata missilistica nelle posizioni previste nelle simulazioni sopra ricordate (quelle da 1 a 7), inoltre è perfettamente compatibile con i meccanismi di danneggiamento descritti nei capitoli precedenti, sia per quanto riguarda l'effetto della pressione sul motore destro, sia per quanto riguarda il danneggiamento della pelle sul lato anteriore destro della fusoliera che, in questa zona può essere stata interessata da proiezioni di frammenti della struttura del missile.

B.1 Programma MISSILE

B.1.1 Scopo del programma

Il programma verifica, variando la traiettoria del missile, quale percentuale di schegge colpisce la fusoliera dell'aereo; controlla anche se il missile colpisce direttamente. La fusoliera è schematizzata mediante un cilindro di raggio $R = 180 \text{ cm}$ terminante nella parte anteriore con un semiellissoide; la lunghezza complessiva è $L = 1800 \text{ cm}$. Sulla fusoliera è fissato un sistema di riferimento con l'asse z disposto lungo il suo asse e gli assi x e y sul piano ad esso perpendicolare. I parametri relativi alla traiettoria del missile e delle schegge sono modificabili da parte dell'utente per verificare situazioni diverse.

B.1.2 Installazione e requisiti necessari

Il programma è previsto per ambiente Windows 95 o successivi. Per l'installazione introdurre il primo dischetto, lanciare il programma SETUP e seguirne le istruzioni.

B.1.3 Modalità d'uso

Eeguire il programma MISSILE.

Appare una finestra contenente nella parte superiore quattro disegni (vista da x , vista da z , vista da y , assonometria) che rappresentano schematicamente la fusoliera dell'aereo, la traiettoria del missile e le schegge.

Nella parte inferiore sono presentati tutti i parametri modificabili dall'utente, i risultati ed i pulsanti di servizio.

B.1.4 Parametri modificabili dall'utente

- Posizione del missile

- Distanza della traiettoria da z in m : distanza tra la traiettoria del missile e l'asse della fusoliera: se questa distanza è minore di R il missile colpisce.

- Posizione lungo z in m : distanza lungo z della traiettoria del missile dal muso dell'aereo: per valori negativi il missile passa davanti all'aereo.
- Posizione esplosione rispetto al punto di minima distanza in m indica il punto in cui avviene l'esplosione della testa di guerra, avendo assunto come punto 0 il punto di minima distanza dall'asse della fusoliera: valori negativi indicano una esplosione che avviene prima del punto di minima distanza.

- **Traiettoria missile**

- Inclinazione sull'orizzontale (tra -90° e 90°) angolo che la traiettoria del missile forma con il piano xz : se 90° traiettoria parallela a y dal basso verso l'alto.
- Angolo con la rotta (tra 0° e 180°) Angolo che la traiettoria del missile forma con l'asse z : se 0° missile parallelo alla fusoliera diretto da dietro verso avanti.

- **Angoli schegge**

- Minimo valore inferiore dell'angolo di apertura del cono delle schegge
- Massimo valore superiore dell'angolo di apertura del cono delle schegge

- **Punto di vista**

Coordinate del punto che indica la direzione da cui è vista la scena per la rappresentazione assonometrica.

B.1.5 Pulsanti di servizio

Ricalcola appare solo se viene modificato qualche parametro. Permette di rifare i calcoli e i disegni

Relazione Invia alla stampante una relazione contenente tutti i parametri e i disegni.

B.1.6 Descrizione disegni

La fusoliera è rappresentata, in verde, mediante un reticolo che ne delimita il volume.

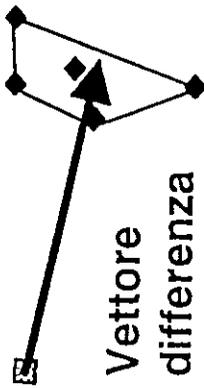
La traiettoria del missile è rappresentata mediante una linea azzurra spessa, su di essa, mediante un cerchietto rosso, è rappresentato il punto in cui avviene l'esplosione.

La proiezione delle schegge che colpiscono è rappresentata mediante linee rosse con origine nel punto dell'esplosione quella delle schegge che non colpiscono mediante linee viola a distanza dal punto dell'esplosione.

Quando viene modificato qualche parametro i disegni vengono sbarrati fino a quando non vengono aggiornati rifacendo il calcolo (pulsante ricalcola).

Poligono
Lockerbie

Rilevamento
Ustica



Regione di
integrazione

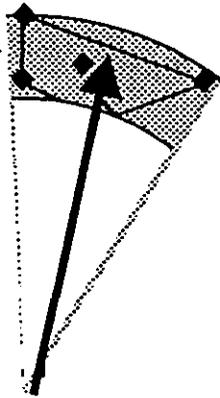
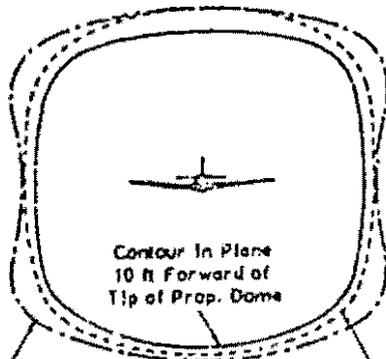
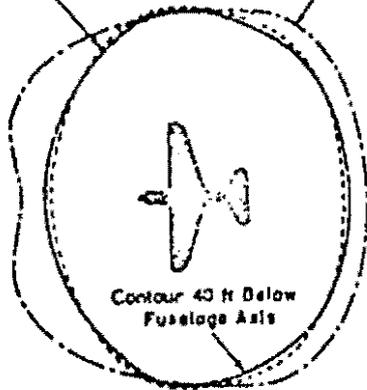


Figura 1a

Figura 1b

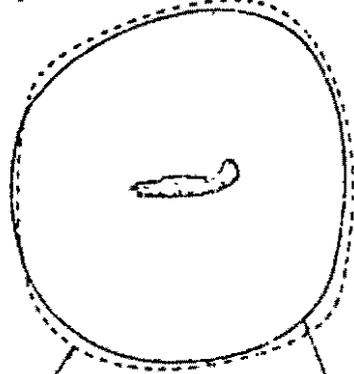
Contour 40 ft Above
Fuselage Axis

Contour in Plane
of Fuselage Axis



Contour in Plane
of Wings

Contour in Plane
10 ft Aft of Tail

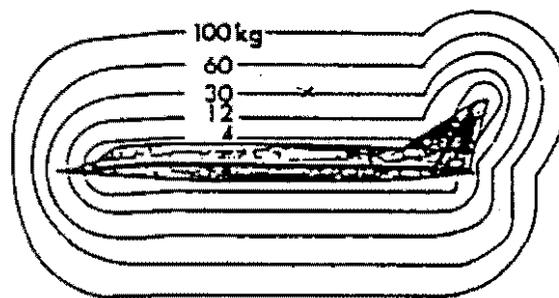


Contour in Plane
of Wing Tips

Figure 8-8 (C). Estimated Sea Level Contours Around
A-25 Aircraft for 100-A Structural Damage From
450-Pound, Spherical, Pentolite Charge (U)

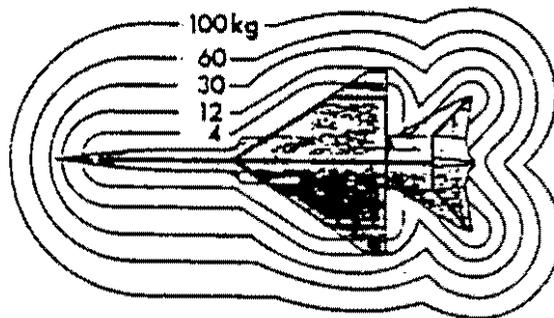
Figure 2

Effectiveness in Respect
to Aerial Targets



0 3 6 9 12 m

$$R = K \sqrt{W}$$



0 3 6 9 12 m

Fig. 15

Figura 3

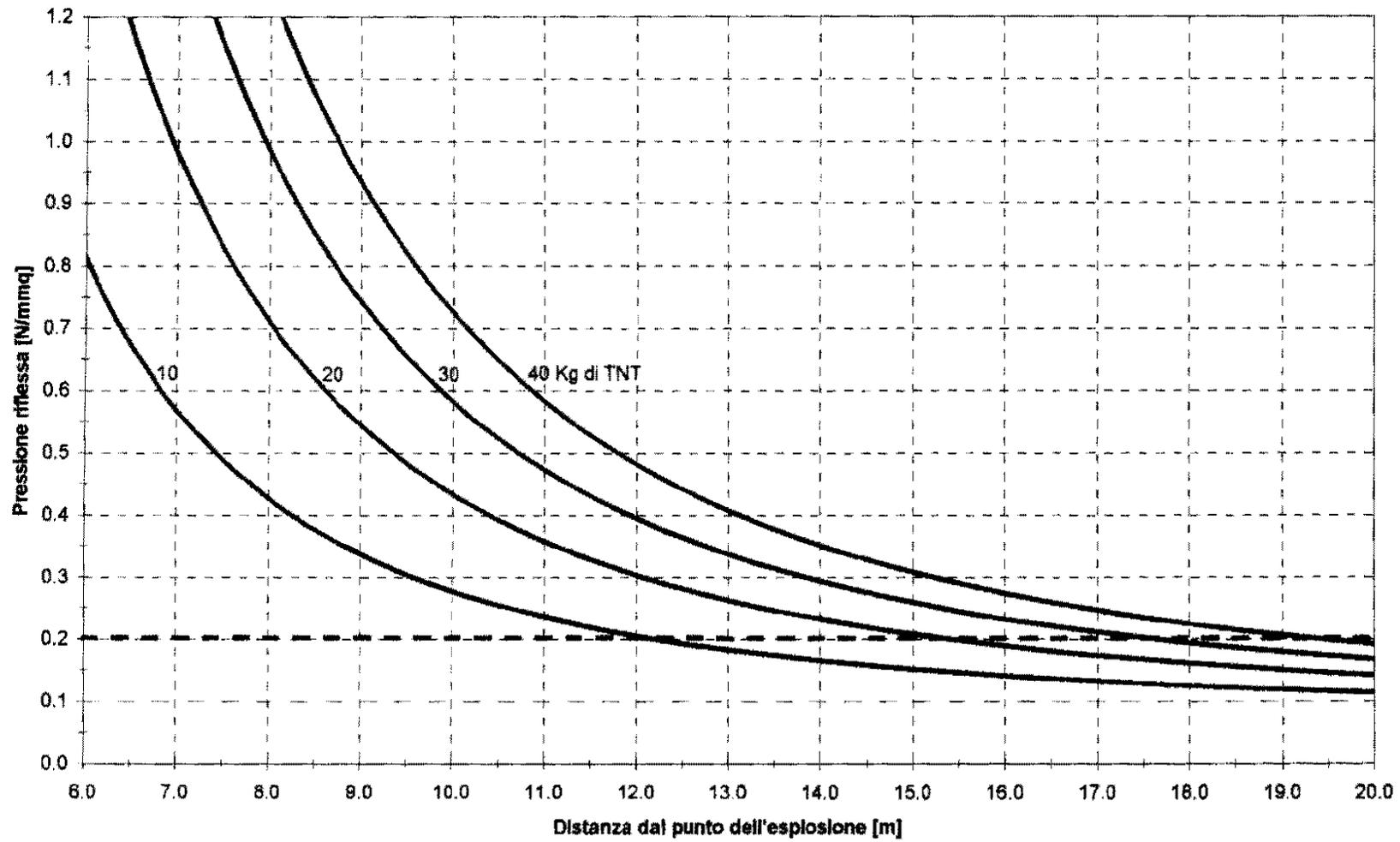


Figura 4

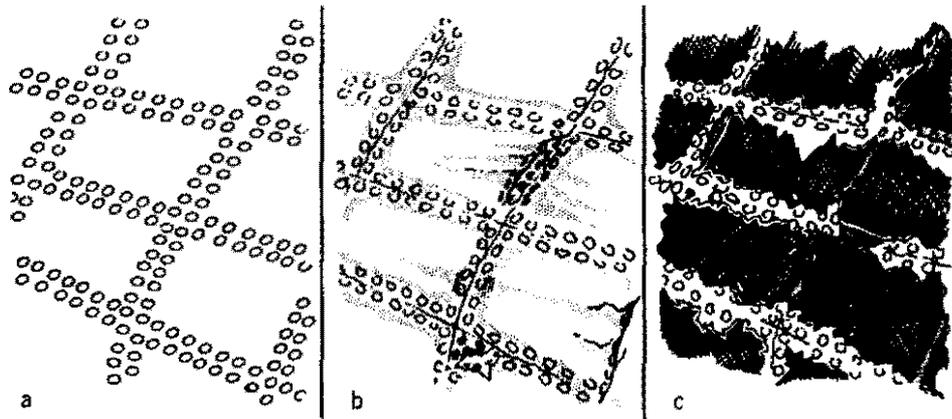


FIGURE 3. Rupture of structural skin panel. Computed critical impulse, 43 psi-ms; computed critical time, 1.2 ms.

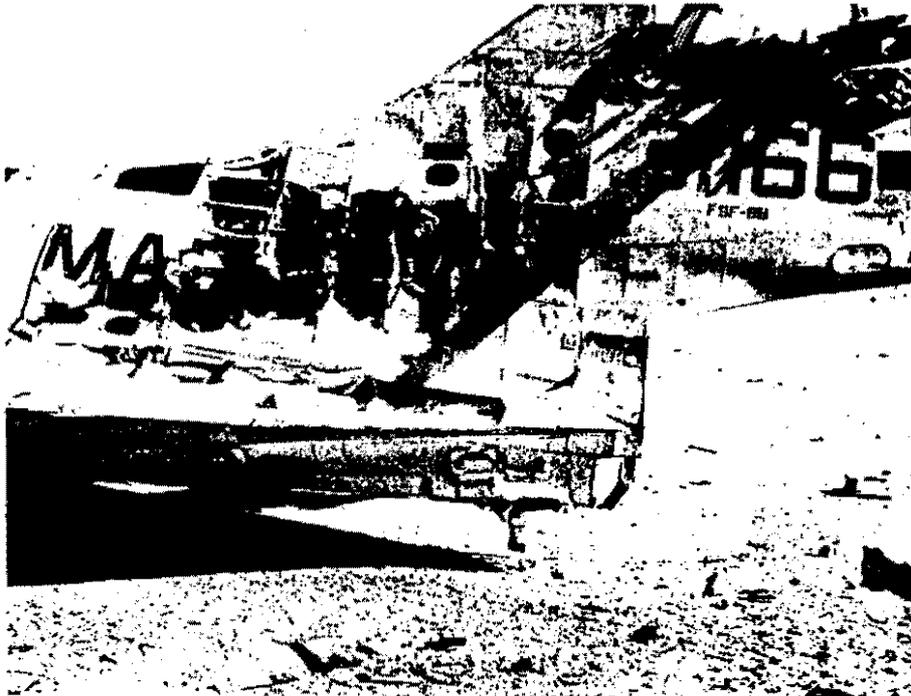


FIGURE 4. Typical aircraft skin failures.

Figura 5

SCHEGGE DEL MISSILE CHE COLPISCONO LA FUSOLIERA

Posizione missile:

Distanza della traiettoria da z: 300 cm

Posizione lungo z: 800 cm

Posizione esplosione rispetto
al punto di minima distanza: -500 cm

Traiettoria missile:

Inclinazione sull'orizzontale: 30°

Angolo con la rotta dell'aereo: 100°

Angoli schegge:

Minimo: 70° , Massimo: 90°

IL MISSILE NON COLPISCE

SCHEGGE CHE COLPISCONO: 0%

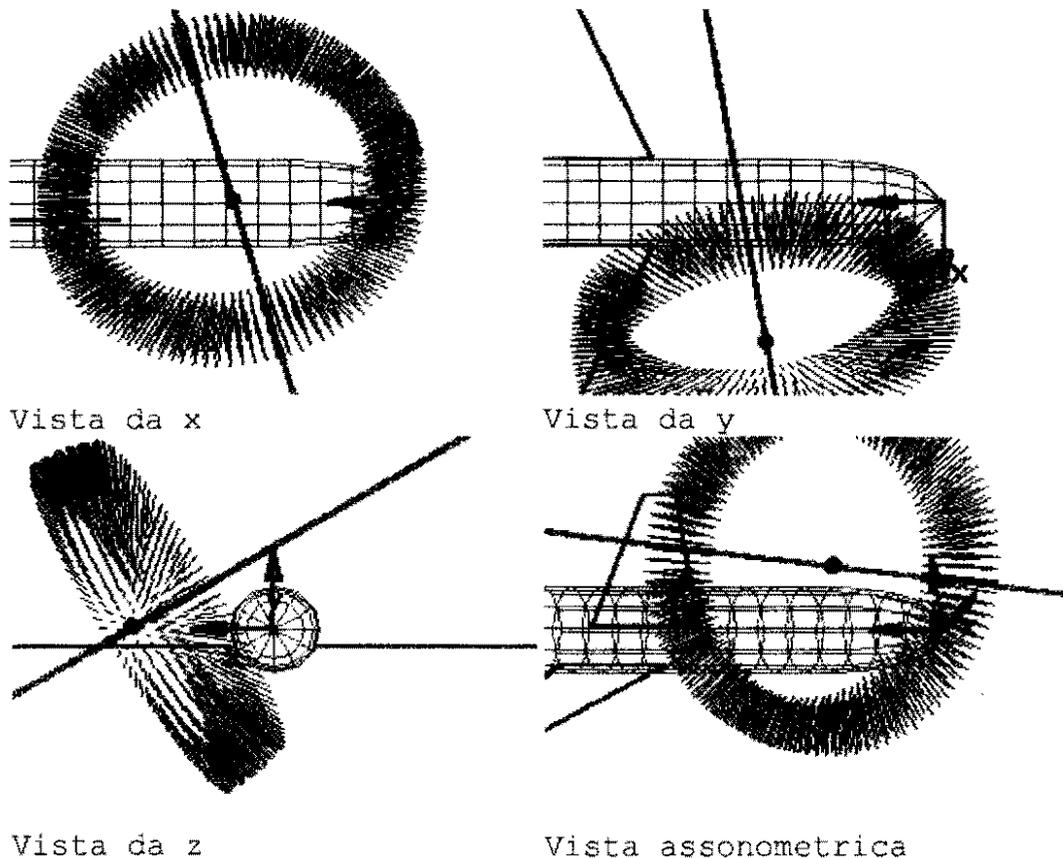


Figura 6.1

SCHEGGE DEL MISSILE CHE COLPISCONO LA FUSOLIERA

Posizione missile:

Distanza della traiettoria da z: 300 cm

Posizione lungo z: 800 cm

Posizione esplosione rispetto

al punto di minima distanza: -600 cm

Traiettoria missile:

Inclinazione sull'orizzontale: 20°

Angolo con la rotta dell'aereo: 100°

Angoli schegge:

Minimo: 78° , Massimo: 88°

IL MISSILE NON COLPISCE

SCHEGGE CHE COLPISCONO: 0%

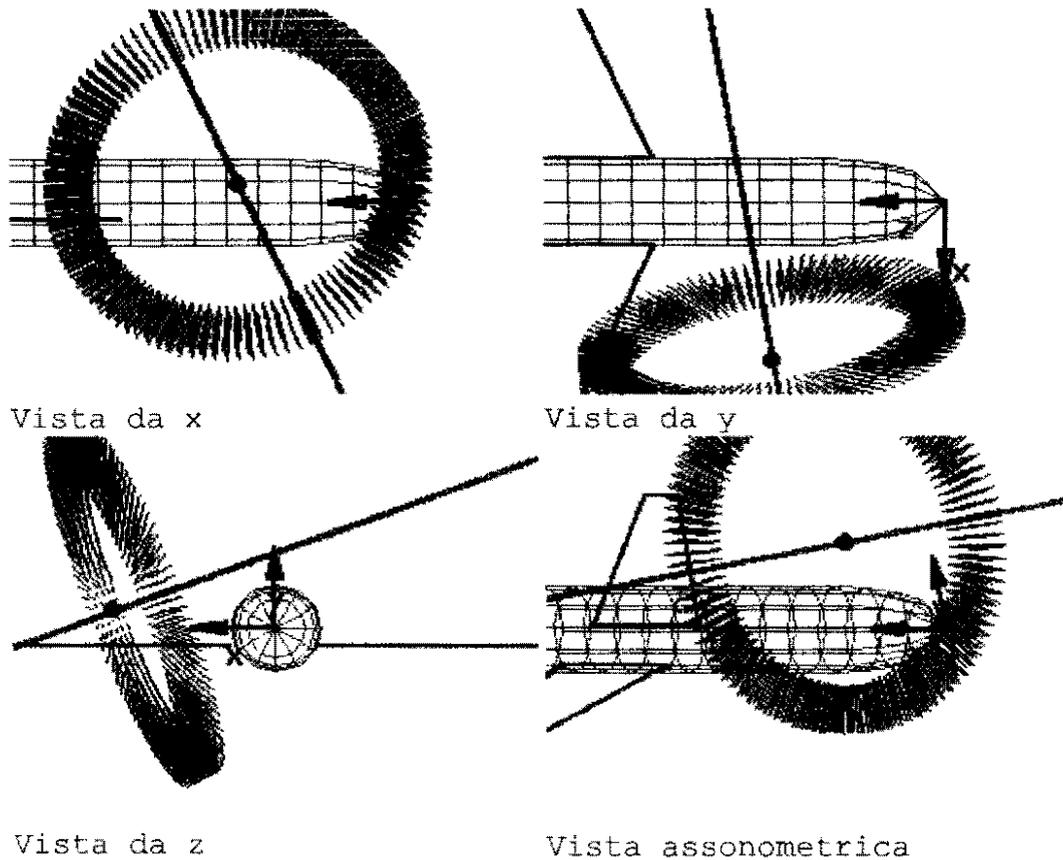


Figura 6.2

SCHEGGE DEL MISSILE CHE COLPISCONO LA FUSOLIERA

Posizione missile:

Distanza della traiettoria da z: 300 cm

Posizione lungo z: 800 cm

Posizione esplosione rispetto

al punto di minima distanza: -600 cm

Traiettoria missile:

Inclinazione sull'orizzontale: 30°

Angolo con la rotta dell'aereo: 100°

Angoli schegge:

Minimo: 78° , Massimo: 88°

IL MISSILE NON COLPISCE

SCHEGGE CHE COLPISCONO: 0%

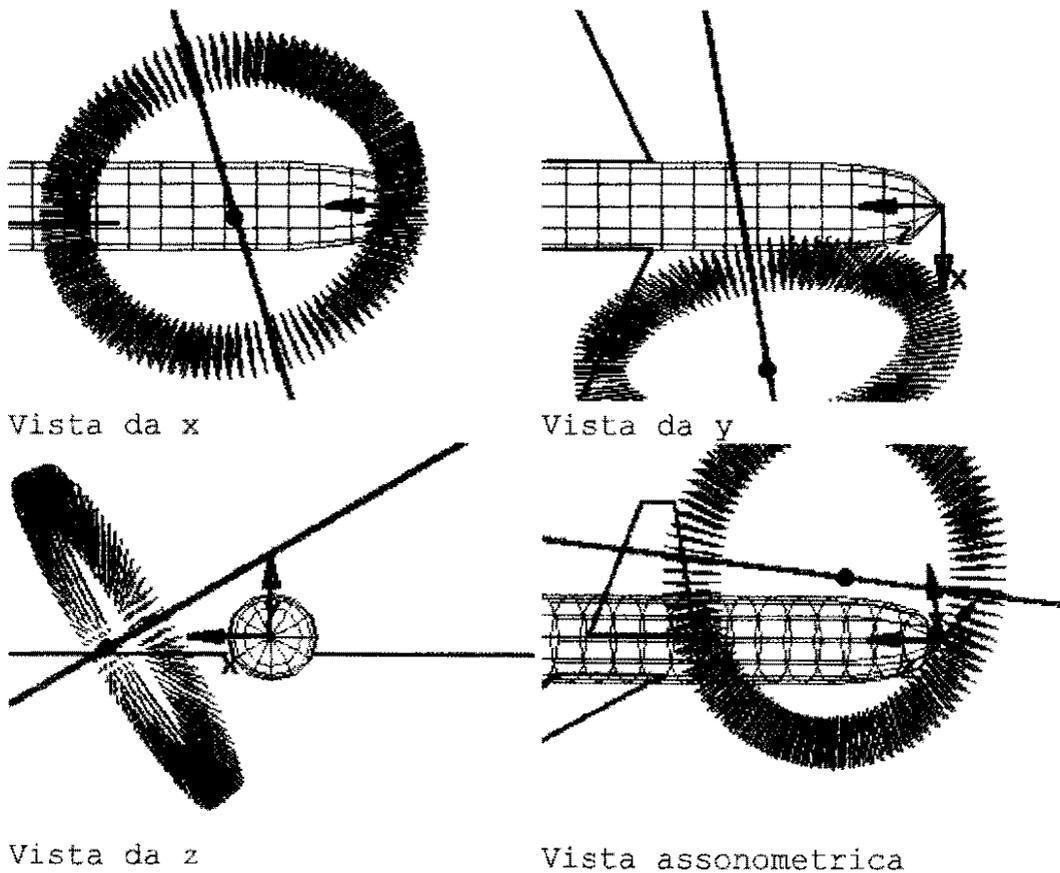


Figura 6.3

SCHEGGE DEL MISSILE CHE COLPISCONO LA FUSOLIERA

Posizione missile:

Distanza della traiettoria da z: 300 cm

Posizione lungo z: 800 cm

Posizione esplosione rispetto

al punto di minima distanza: -600 cm

Traiettoria missile:

Inclinazione sull'orizzontale: 30°

Angolo con la rotta dell'aereo: 90°

Angoli schegge:

Minimo: 78° , Massimo: 88°

IL MISSILE NON COLPISCE

SCHEGGE CHE COLPISCONO: 0%

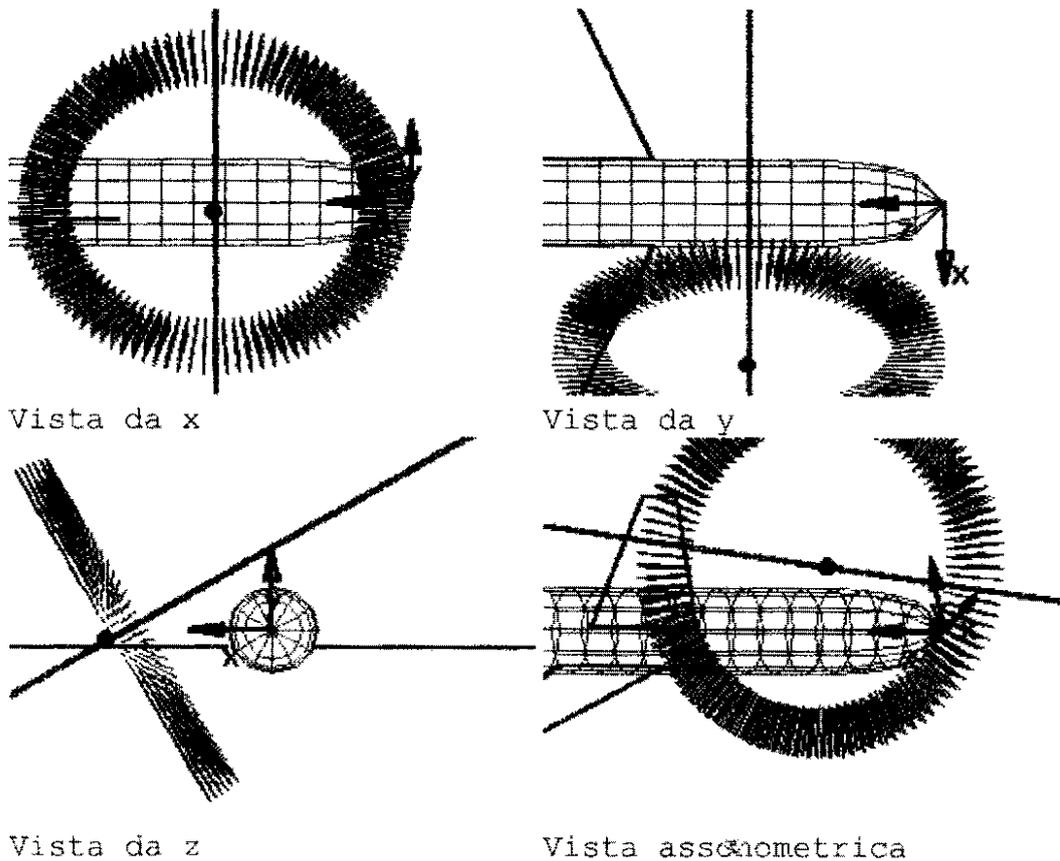


Figura 6.4

SCHEGGE DEL MISSILE CHE COLPISCONO LA FUSOLIERA

Posizione missile:

Distanza della traiettoria da z: 300 cm

Posizione lungo z: 800 cm

Posizione esplosione rispetto
al punto di minima distanza: -600 cm

Traiettoria missile:

Inclinazione sull'orizzontale: 30°

Angolo con la rotta dell'aereo: 110°

Angoli schegge:

Minimo: 78° , Massimo: 88°

IL MISSILE NON COLPISCE

SCHEGGE CHE COLPISCONO: 0%

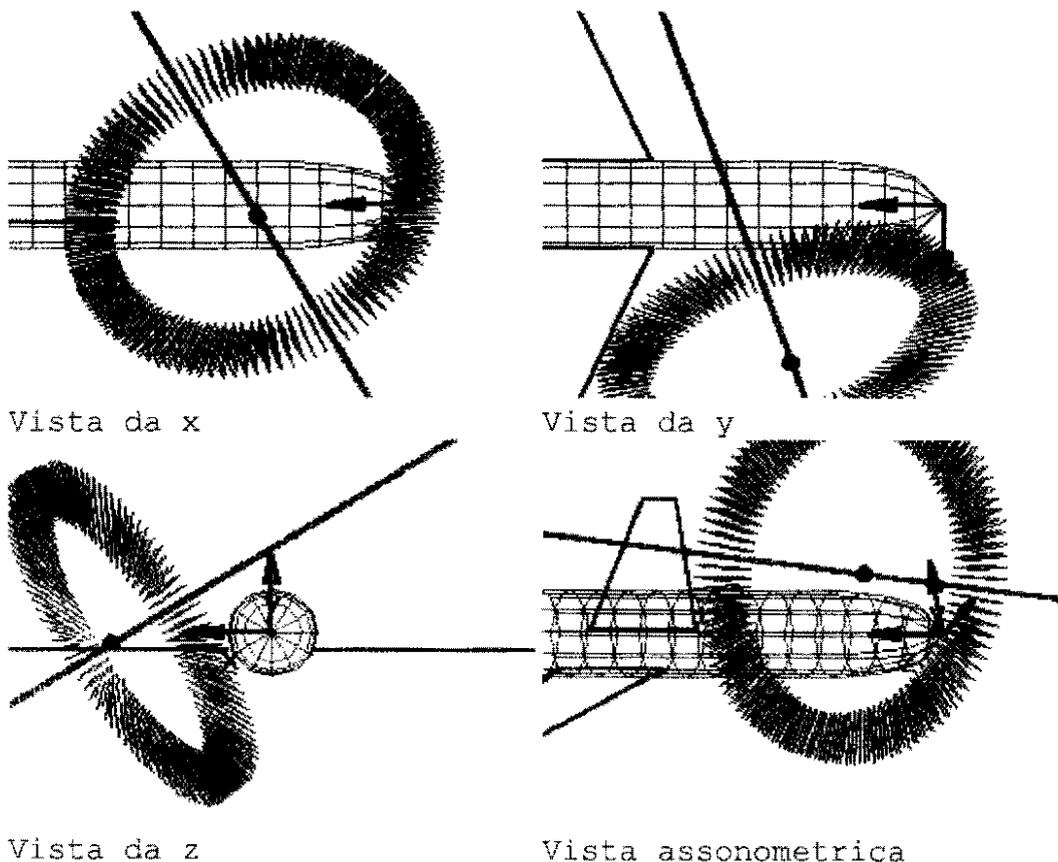


Figura 6.5

SCHEGGE DEL MISSILE CHE COLPISCONO LA FUSOLIERA

Posizione missile:

Distanza della traiettoria da z: 300 cm

Posizione lungo z: 800 cm

Posizione esplosione rispetto

al punto di minima distanza: -600 cm

Traiettoria missile:

Inclinazione sull'orizzontale: 30°

Angolo con la rotta dell'aereo: 110°

Angoli schegge:

Minimo: 70° , Massimo: 90°

IL MISSILE NON COLPISCE

SCHEGGE CHE COLPISCONO: 0%

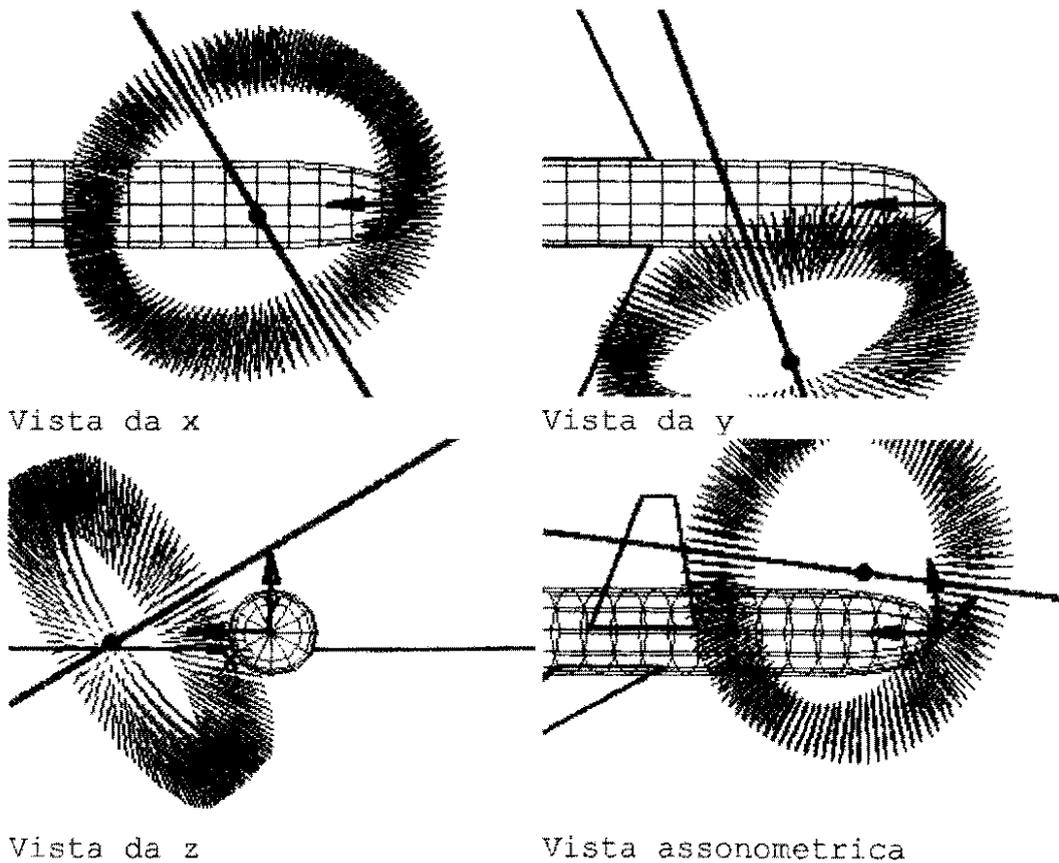


Figura 6.6

SCHEGGE DEL MISSILE CHE COLPISCONO LA FUSOLIERA

Posizione missile:

Distanza della traiettoria da z: 300 cm

Posizione lungo z: 600 cm

Posizione esplosione rispetto

al punto di minima distanza: -500 cm

Traiettoria missile:

Inclinazione sull'orizzontale: 30°

Angolo con la rotta dell'aereo: 100°

Angoli schegge:

Minimo: 78° , Massimo: 88°

IL MISSILE NON COLPISCE

SCHEGGE CHE COLPISCONO: 0%

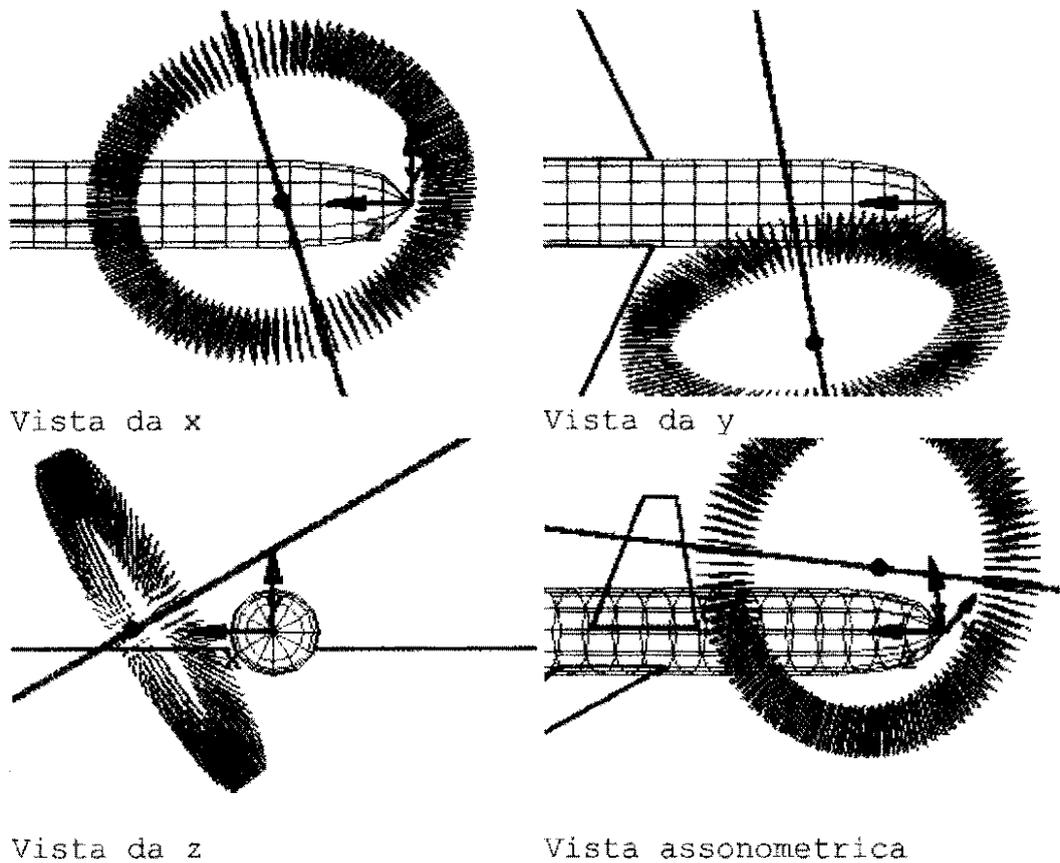


Figura 6.7

SCHEGGE DEL MISSILE CHE COLPISCONO LA FUSOLIERA

Posizione missile:

Distanza della traiettoria da z: 800 cm

Posizione lungo z: 800 cm

Posizione esplosione rispetto

al punto di minima distanza: -100 cm

Traiettoria missile:

Inclinazione sull'orizzontale: 30°

Angolo con la rotta dell'aereo: 15°

Angoli schegge:

Minimo: 78° , Massimo: 88°

IL MISSILE NON COLPISCE

SCHEGGE CHE COLPISCONO: 10%

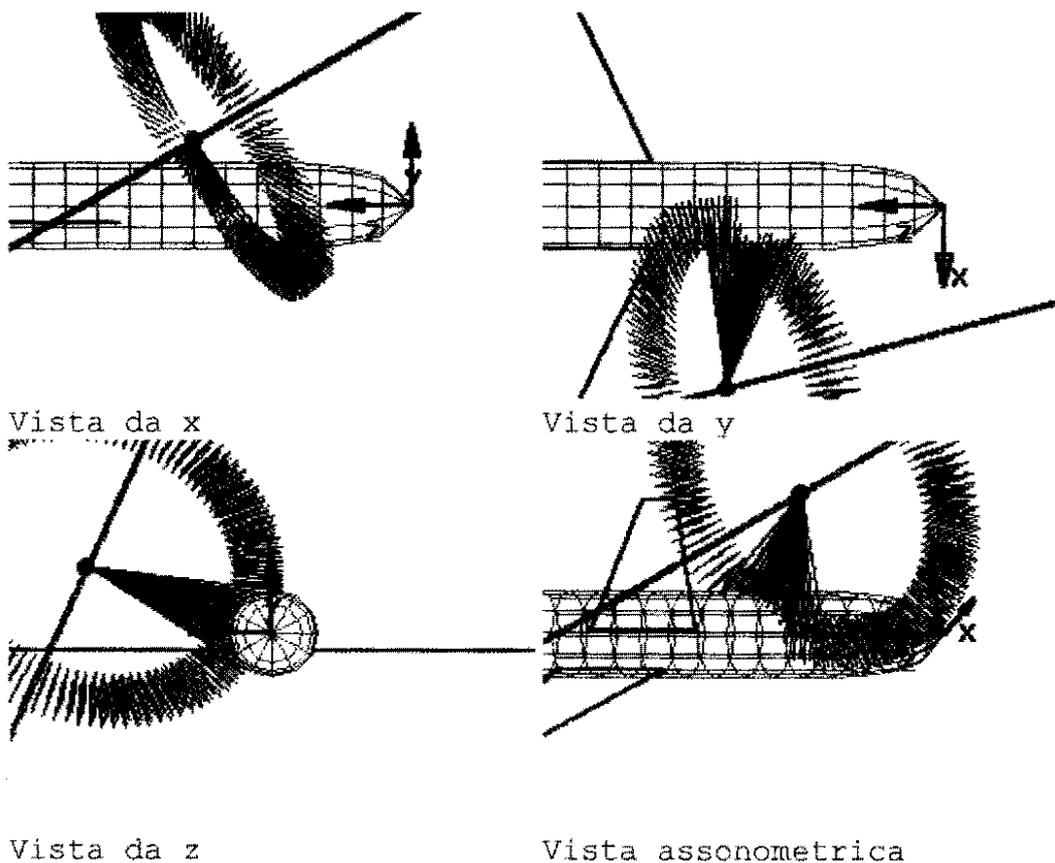


Figura 6.8

SCHEGGE DEL MISSILE CHE COLPISCONO LA FUSOLIERA

Posizione missile:

Distanza della traiettoria da z: 300 cm

Posizione lungo z: 800 cm

Posizione esplosione rispetto

al punto di minima distanza: -100 cm

Traiettoria missile:

Inclinazione sull'orizzontale: 30°

Angolo con la rotta dell'aereo: 15°

Angoli schegge:

Minimo: 78° , Massimo: 88°

IL MISSILE NON COLPISCE

SCHEGGE CHE COLPISCONO: 28%

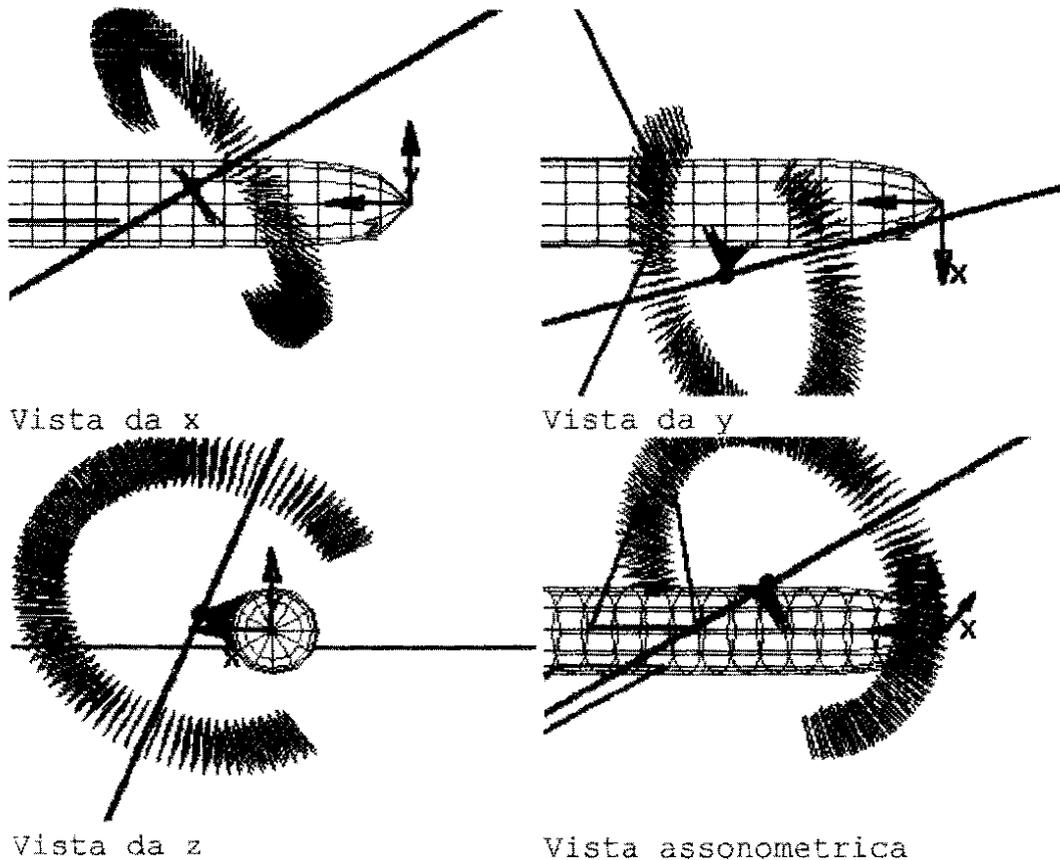


Figura 6.9

SCHEGGE DEL MISSILE CHE COLPISCONO LA FUSOLIERA

Posizione missile:

Distanza della traiettoria da z: 300 cm

Posizione lungo z: 400 cm

Posizione esplosione rispetto

al punto di minima distanza: -600 cm

Traiettoria missile:

Inclinazione sull'orizzontale: 30°

Angolo con la rotta dell'aereo: 15°

Angoli schegge:

Minimo: 78° , Massimo: 88°

IL MISSILE NON COLPISCE

SCHEGGE CHE COLPISCONO: 17%

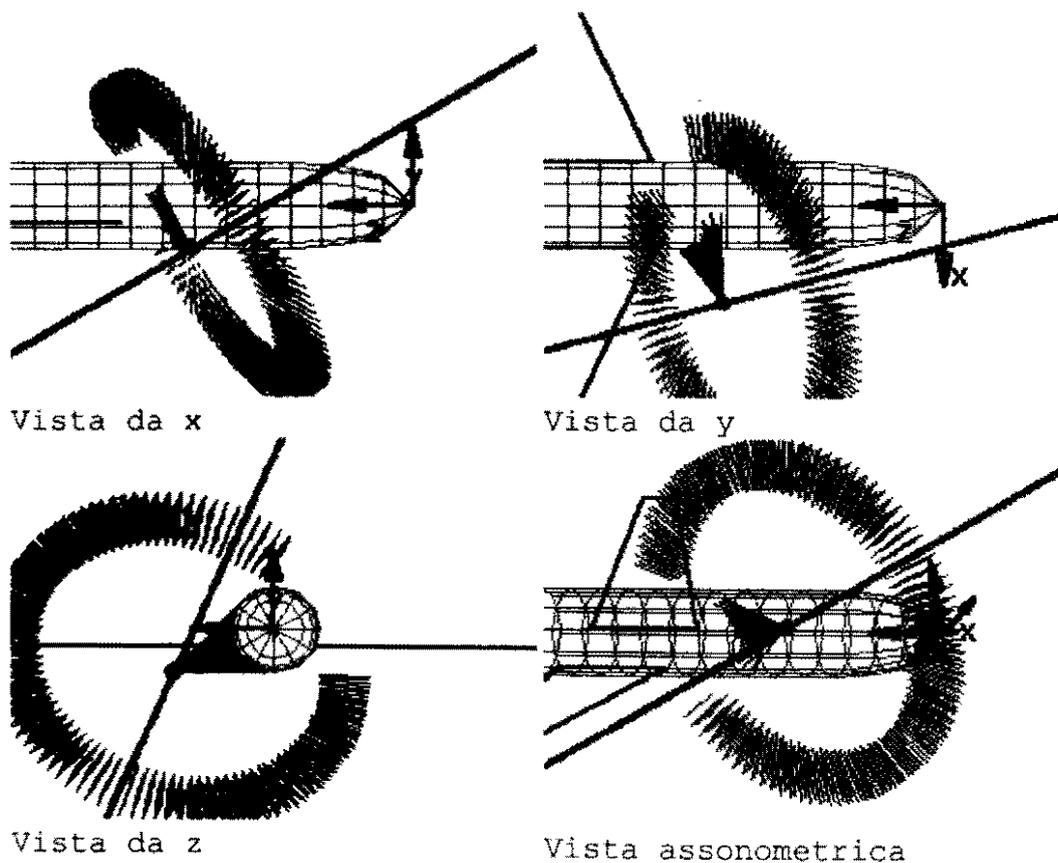


Figura 6.10