

Ricostruzione ed analisi di incidenti aerei. Il caso studio dell'aliante acrobatico *Grob G103C Twin Astir Acro*

Donato Amitrano¹

¹Relatore: prof. ing. Agostino De Marco

Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale (DIAS)
Aircraft Design and Aeroflightdynamics Group (ADAG)



Napoli, 27 gennaio 2009

Genesi ed obiettivi della tesi

- **Genesi della tesi**

- Incidente occorso all'aliante acrobatico *Grob G103C Twin Astir Acro* nei pressi di Ferrara il 25/11/2001
- Perizia di parte affidata dalla *Grob Aerospace* al Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale

- **Obiettivi della tesi**

- Stima dei carichi sugli impennaggi durante la manovra di tonneau lento a destra

Indice

Il caso studio dell'incidente aereo del Grob G103C Twin Astir Acro

Ricostruzione del modello dell'aliante

Ricostruzione della geometria e delle masse

Ricostruzione del modello aerodinamico

Simulazione del volo e stima dei carichi

Preparazione della simulazione e verifica del modello

Ricostruzione della manovra e stima dei carichi

Indice

Il caso studio dell'incidente aereo del Grob G103C Twin Astir Acro

Ricostruzione del modello dell'aliante

Ricostruzione della geometria e delle masse

Ricostruzione del modello aerodinamico

Simulazione del volo e stima dei carichi

Preparazione della simulazione e verifica del modello

Ricostruzione della manovra e stima dei carichi

Caratteristiche del velivolo

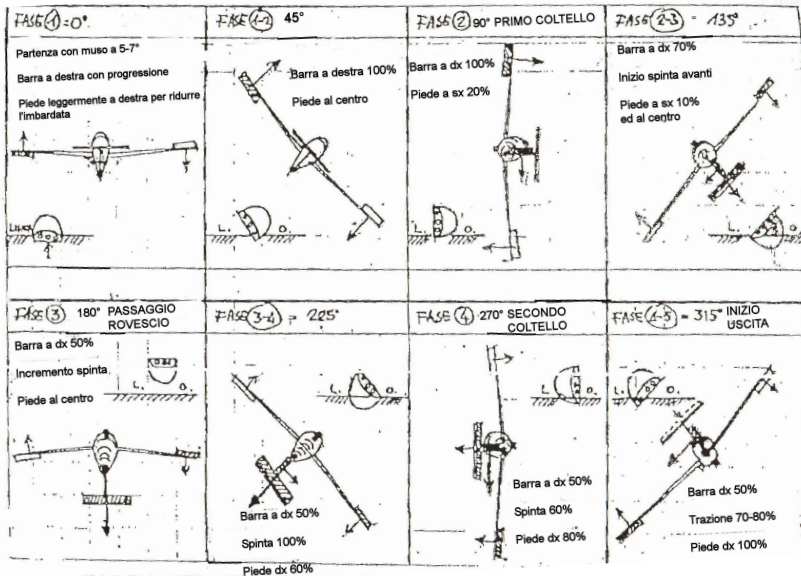
Caratteristiche del Grob G103C

- Peso massimo al decollo: 600 kg
- Allungamento alare (b^2/S): 16,95
- Superficie alare: 18,172 m²
- Apertura alare: 17,55 m



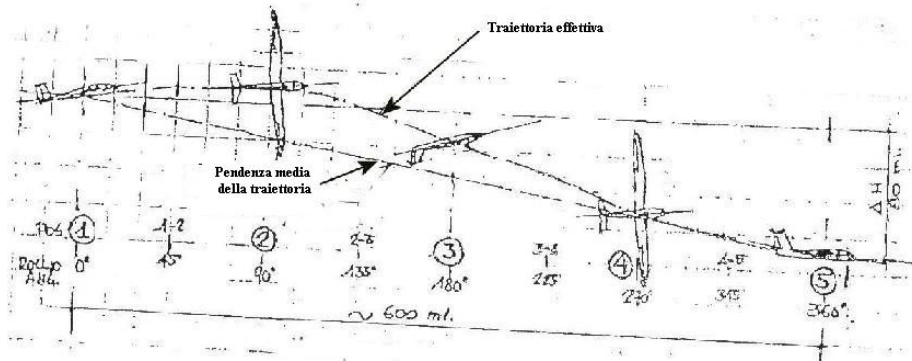
È un velivolo molto diffuso essendo stato prodotto in circa 400 esemplari in dotazione anche alle aeronautiche militari di diverse nazioni europee.

La manovra di tonneau lento



La manovra di tonneau lento

Condizioni di manovra corretta



Indice

Il caso studio dell'incidente aereo del Grob G103C Twin Astir Acro

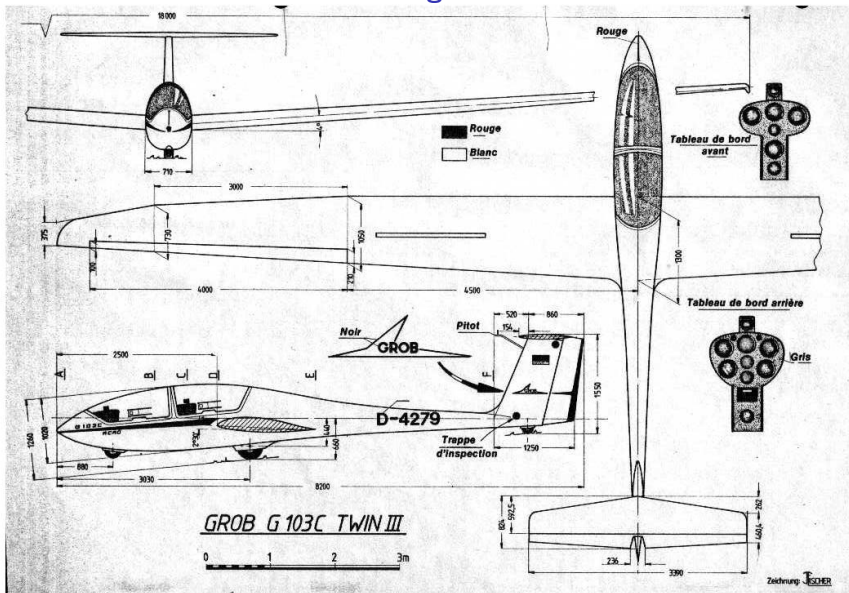
Ricostruzione del modello dell'aliante

- Ricostruzione della geometria e delle masse
- Ricostruzione del modello aerodinamico

Simulazione del volo e stima dei carichi

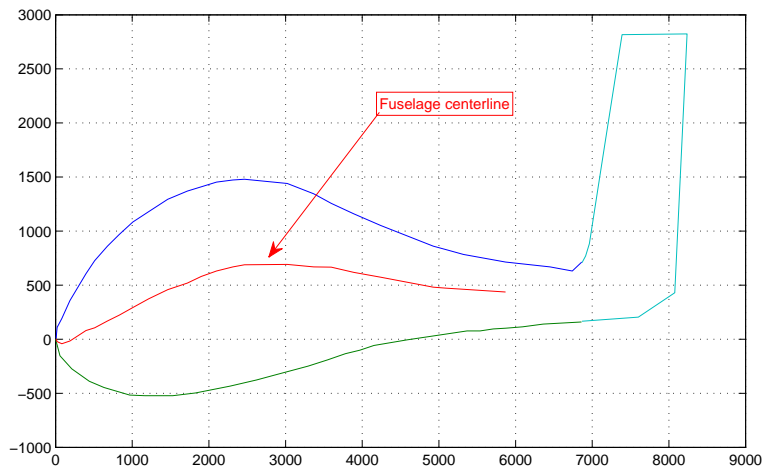
- Preparazione della simulazione e verifica del modello
- Ricostruzione della manovra e stima dei carichi

Il modello geometrico

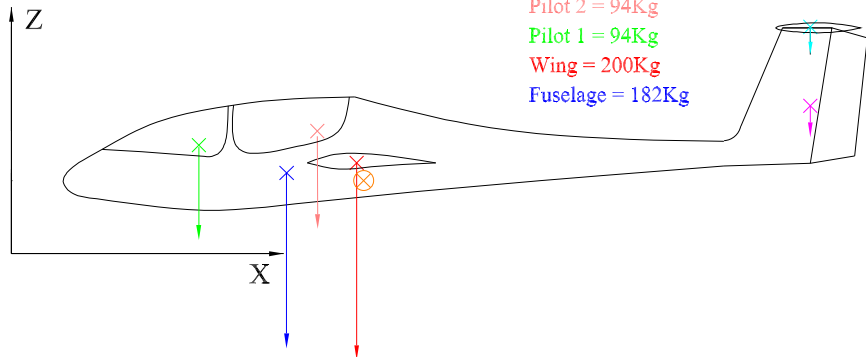


Esempio di digitalizzazione: la linea media della fusoliera

Digitalizzazione del profilo della fusoliera (con il programma *Plot Digitizer*) per ricostruire la linea media dei centri delle sezioni longitudinali



Il modello *AutoCAD*



Vertical tail = 16Kg

Horizontal tail = 14Kg

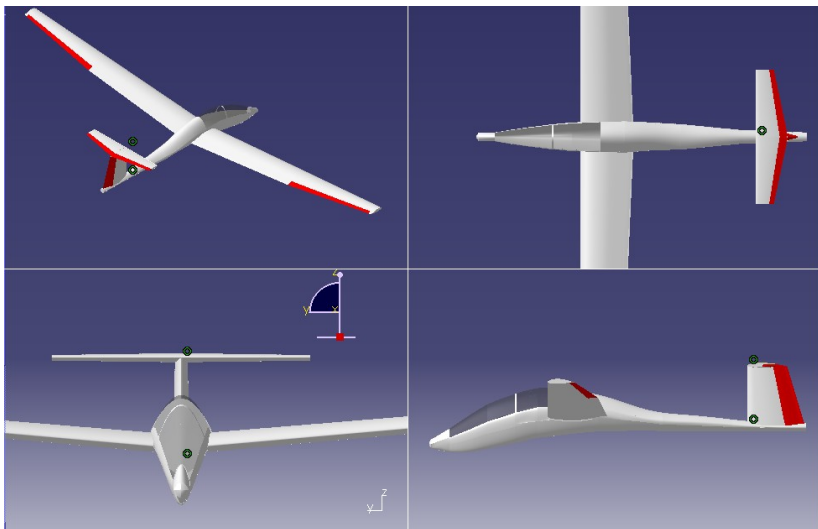
Pilot 2 = 94Kg

Pilot 1 = 94Kg

Wing = 200Kg

Fuselage = 182Kg

Il modello *CATIA*



Verifica delle inerzie

Parametro	Valore (kg m ²)
I_{XX}	3406
I_{YY}	1300
I_{ZZ}	4622
I_{XZ}	-146,193
I_{YZ}	0
I_{XY}	0

**Valori dichiarati da Grob
Aerospace**

Parametro	Valore (kg m ²)
I_{XX}	4055,243
I_{YY}	1319,934
I_{ZZ}	5235,002
I_{XZ}	-93,556
I_{YZ}	0,018
I_{XY}	-0,009

Valori calcolati con CATIA

Il modello aerodinamico

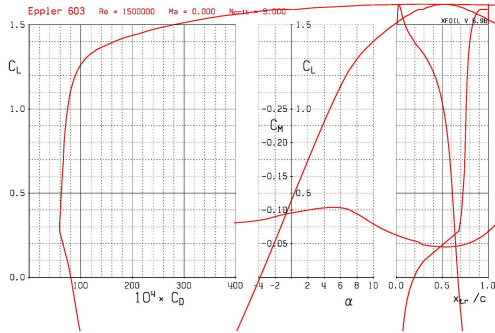
La ricostruzione del modello aerodinamico dell'aliante passa attraverso tre fasi per ognuna delle quali è stato utilizzato un software *ad hoc*

- Analisi dei profili di ala ed impennaggi con *XFoil*
- Analisi 3D di ala isolata ed impennaggi con *XFRL5*
- Analisi del velivolo totale con *Advanced Aircraft Analysis* (Roskam)

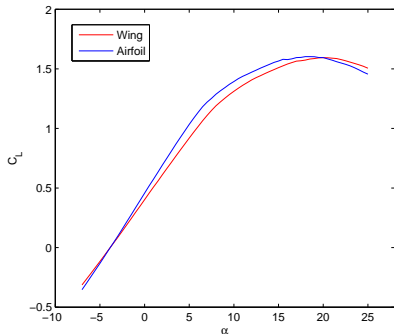
Analisi 2D/3D

I programmi Xfoil ed XFRL5

Xfoil è un programma sviluppato presso la MIT che permette un'analisi aerodinamica 2D completa



XFRL5 è un programma che permette l'analisi 3D delle superfici isolate attraverso una formulazione non lineare della *LLT* (*Lifting Line Theory*)



Calcolo del velivolo totale

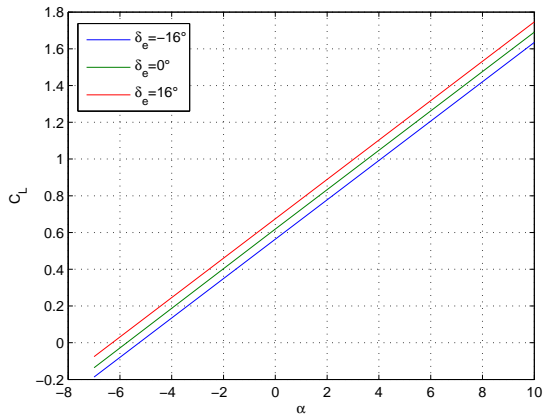
Il programma *Advanced Aircraft Analysis (AAA)*

AAA (DARcorporation)

permette un controllo totale su tutte le caratteristiche del velivolo.

Utilizzando i dati in nostro possesso abbiamo calcolato:

- Le curve caratteristiche dell'aliante (portanza, momento, polare) tenendo conto della presenza della fusoliera
- Le derivate di stabilità e controllo sia nel piano longitudinale che nel piano latero-direzionale
- Grandezze importanti nel calcolo dei carichi quali $d\epsilon/d\alpha$, $d\sigma/d\beta$, $C_{L\alpha_h}$ e $C_{y\beta_v}$



Esempio di curve relative al velivolo completo

Indice

Il caso studio dell'incidente aereo del Grob G103C Twin Astir Acro

Ricostruzione del modello dell'aliante

Ricostruzione della geometria e delle masse

Ricostruzione del modello aerodinamico

Simulazione del volo e stima dei carichi

Preparazione della simulazione e verifica del modello

Ricostruzione della manovra e stima dei carichi

Il simulatore *JSBSim*

JSBSim è un programma scritto in linguaggio *C++*

- Applicazione *standalone/Flight Dynamics Model (FlightGear)*;
- Integrazione delle equazioni del moto (velivolo rigido, quaternioni);
- Input in formato *XML*:
 - File di configurazione principale (caratteristiche del velivolo/direttive di output)
 - File di *inizializzazione* (condizioni iniziali)
 - File di *script*

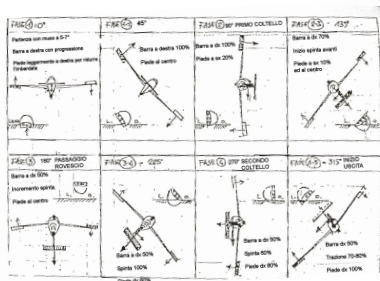
```

<fdm_config>
  <fileheader>
    ... ← informazioni su autore, riferimenti, etc.
  </fileheader>
  <metrics>
    ... ← informazioni sulla geometria
  </metrics>

  <mass_balance>
    ... ← informazioni sui pesi e le inerzie
  </mass_balance>
  <ground_reactions>
    ... ← caratteristiche del comportamento al suolo
    ... ← (carrelli ed altri punti di contatto)
  </ground_reactions>
  <propulsion>
    ... ← dati sul sistema propulsivo
  </propulsion>
  <flight_control>
    ... ← definizioni dei controlli di volo (autopilota)
  </flight_control>
  <aerodynamics>
    ... ← database aerodinamico
  </aerodynamics>
  <input>
    ... ← modalità di input
  </input>
  <output>
    ... ← direttive di log
  </output>
</fdm_config>

```

Ricostruzione della manovra di tonneau lento a destra



La manovra è stata simulata scrivendo uno *script* che ricalcasse la sequenza ideale dei comandi

```

<event name="Phase3">
<description> 90 deg di 360 </description>
<condition>
attitude/phi-rad gt 1.57
</condition>
<set name="fcs/elevator-cmd-norm" value="0" action="FG_RAMP" ←
tc="0.1"/>
<set name="fcs/rudder-cmd-norm" value="-0.6" action="FG_RAMP" ←
" tc="0.7"/>
<set name="fcs/aileron-cmd-norm" value="0.7" action="FG_RAMP" ←
" tc="0.5"/>
<notify>
<property>velocities/vt-fps</property>
<property>attitude/phi-rad</property>
<property>attitude/theta-rad</property>
<property>attitude/psi-rad</property>
<property>aero/alpha-deg</property>
</notify>
</event>

<event name="Phase4">
<description> 135 deg di 360 </description>
<condition>
attitude/phi-rad gt 2.35
</condition>
<set name="fcs/rudder-cmd-norm" value="0" action="FG_RAMP" ←
tc="0.7"/>
<set name="fcs/aileron-cmd-norm" value="0.5" action="FG_RAMP" ←
" tc="2"/>
<set name="fcs/elevator-cmd-norm" value="0.4" action=" ←
FG_RAMP" tc="0.7"/>
<notify>
<property>velocities/vt-fps</property>
<property>attitude/phi-rad</property>
<property>attitude/theta-rad</property>
<property>attitude/psi-rad</property>

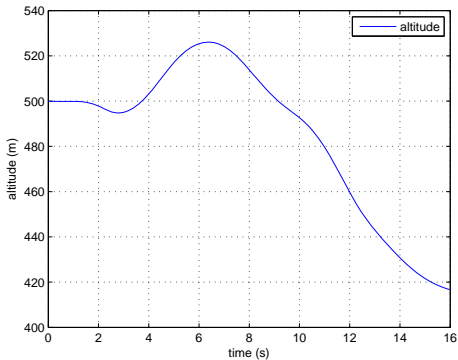
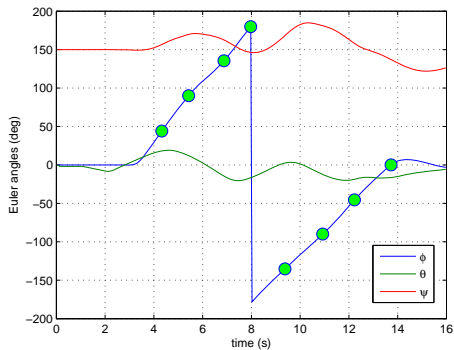
```

○○○

○○○○○
○○○○
●○○○○○

Risultati della simulazione

Angoli di Eulero - Quota



Stima dei carichi laterali

Formulazione analitica

I carichi laterali sono dati dalla somma di 4 contributi

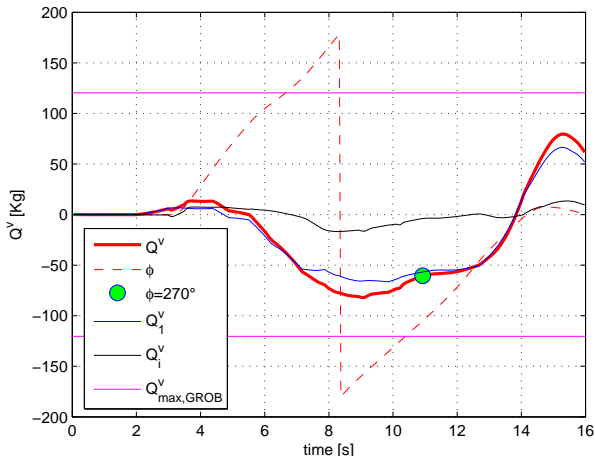
- Angolo di derapata ed *effetto sidewash*
- Deflessione del timone
- Velocità angolare di imbardata
- Forze di inerzia

$$Q^{(v)}(t) = q_{\infty} S_v C_{y\beta_v} \left(\beta(t) \left(1 - \frac{d\sigma}{d\beta} \right) + \tau_r \delta_r(t) + \arctan \frac{h_v r(t)}{V_v(t)} \right) - m_t a_y(t)$$

$$Q_{max}^{(v)} = q_{\infty V_A} S_v C_{y\beta_v} (\tau_r \delta_{r_{max}}) - m_t a_y^*$$

$$a_y^* = k \frac{q_v C_{L\delta_r} \delta_{r_{max}} h_v}{I_{zz}}$$

Stima dei carichi laterali



Il carico di picco è il 68% del carico massimo stimato analiticamente con formule conservative. La prova in volo del 8/7/2003 ha restituito un carico massimo pari al 46% di tale carico

Stima dei carichi normali

Formulazione analitica

I carichi normali sono dati dalla somma di 5 contributi

- Carico di bilanciamento alla velocità di manovra
- Angolo di incidenza ed *effetto downwash*
- Deflessione dell'equilibratore
- Velocità angolare di beccheggio
- Forze di inerzia

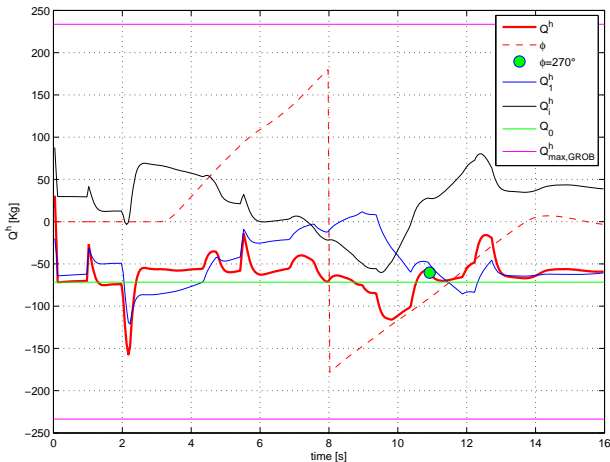
$$Q^{(h)}(t) = Q_{0h} + q_{\infty}(t) S_h C_{l\alpha_h} \left[\alpha_B \left(1 - \frac{d\epsilon}{d\alpha} \right) - \epsilon_0 + \tau_e \delta_e(t) + \arctan \frac{q(t) l_h}{V_h(t)} \right] - m_t a_z$$

$$Q_{max}^{(h)} = Q_{0h} + q_{\infty V_A} S_h C_{l\alpha_h} (\tau_e \delta_{e_{max}}) - m_t a_z^*$$

$$a_z^* = k \frac{q_h C_{L\delta_e} \delta_{e_{max}} l_h}{I_{yy}}$$

Stima dei carichi normali

Diagramma di carico



Il carico di picco è il 67% del carico analitico stimato con formule conservative dalla Grob. La prova in volo del 8/7/2003 ha restituito un carico massimo pari al 62% di tale carico

Riepilogo

Confronto tra i carichi stimati dalla Grob e quelli ottenuti dalla simulazione

Carichi normali		Carichi laterali	
Carico max simulato	156,52 kp	Carico max simulato	81,82 kp
Carico max in volo, prove Grob	144,84 kp	Carico max in volo, prove Grob	55,35 kp
Carico di contingenza stimato, Report DIAS e Grob	233,62 kp	Carico di contingenza stimato, Report DIAS e Grob	120,33 kp
Carico di robustezza, prove statiche Grob	350,43 kp	Carico di robustezza, prove statiche Grob	180,50 kp

I carichi di picco stimati tramite la simulazione sono molto al di sotto dei carichi di robustezza degli elementi strutturali responsabili del cedimento

Considerazioni finali

Possibili spiegazioni all'incidente

- Abbiamo dimostrato che i carichi sugli impennaggi durante la manovra di tonneau lento non sono tali da mettere in crisi la struttura dell'aliante.
- Processualmente, la suddetta conclusione esclude le responsabilità riguardo ad un eventuale difetto di progettazione strutturale. Inoltre, dagli atti processuali vengono fuori altre due possibili ipotesi relativamente alle cause dell'incidente
 - Superamento da parte del pilota dei limiti previsti dal manuale operativo
 - Manutenzione inadeguata in seguito ad un atterraggio duro
- Abbiamo mostrato come una delle applicazioni della modellazione aerodinamica e della simulazione del volo ricade efficacemente nell'Ingegneria Forense