

REDBULL FLUGTAG: UNA APPLICAZIONE "VOLANTE" PER IL CARTONE ONDULATO.

M. E. Biancolini, C. Brutti, S. Porziani

*Università di Roma "Tor Vergata", Dipartimento di Ingegneria Meccanica,
via del Politecnico, 1 – 00133 Roma, e-mail:biancolini@ing.uniroma2.it*

Sommario

In questo lavoro vengono presentate le attività svolte per la progettazione e realizzazione di un velivolo in cartone ondulato, in grado di partecipare alla manifestazione organizzata dalla Redbull denominata "Redbull Flugtag – Un Giorno Con Le Ali". Partendo dai requisiti fondamentali della gara è stato innanzitutto studiato il problema del volo da un punto di vista analitico, per poi realizzare un modello agli elementi finiti del velivolo in modo da verificarne la resistenza strutturale. Infine, grazie alla collaborazione con la SmurfitKappa di Anzio, è stato realizzato un prototipo in scala 1:3 dell'aereo al fine di valutarne l'effettiva fattibilità e le tecniche costruttive da impiegare con un materiale comune come il cartone ondulato, ma che è stato relegato finora alla funzione di imballaggio per merci e materiali più pregiati.

Abstract

In this paper activities developed in design and realization of a corrugated board aircraft capable to join the "Redbull Flugtag – A Day With Wings" are presented. Starting from competition requirements, the flight problem has been analyzed analytically, then a finite element model of the aircraft has been realized in order to verify its structural strength. Finally, thanks to SmurfitKappa Anzio plant collaboration, a scaled prototype has been realized, in order to evaluate its effective feasibility and to verify realization techniques needed with such a common material like corrugated board, mostly used in packaging industries.

Parole chiave: Cartone Ondulato, Dinamica del volo, Progettazione.

1. INTRODUZIONE

La manifestazione "Redbull Flugtag – Un Giorno Con Le Ali" è una manifestazione che viene organizzata dalla Redbull in vari paesi del mondo. Scopo della manifestazione è quello di far gareggiare delle macchine volanti realizzate in maniera artigianale e senza l'ausilio di elementi meccanici in grado di fornire potenza al velivolo. L'unica tipologia di spinta ammessa è quella muscolare dei partecipanti: questi, oltre a realizzare artigianalmente il velivolo devono anche spingerlo su una piattaforma lunga 30 m posta 10 m (6 m per l'evento organizzato a Roma nel 2008) al di sopra del livello di un bacino d'acqua e pilotarlo il più lontano possibile dalla zona di decollo fino a farlo ammarare in acqua. Le uniche limitazioni imposte a questi velivoli riguardano il peso, che non deve eccedere i 140 kg comprensivi del pilota, e l'apertura alare che non deve superare i 10 m (8 m per l'evento organizzato a Roma nel 2008). Per il resto è lasciato libero sfogo all'immaginazione e all'inventiva dei partecipanti.

Prendendo spunto da questa manifestazione e dall'esperienza e attività svolte dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", si è deciso di realizzare un aereo in cartone ondulato. Da un punto di vista micromeccanico, il cartone ondulato è un materiale composito, realizzato unendo 3 o più fogli di carta. La carta a sua volta può essere considerata come un materiale ortotropo bidimensionale; in questa maniera il comportamento dell'intero pannello in cartone ondulato può essere trattato utilizzando la Teoria Classica delle Piastre Lamine (Classical Laminated Plates Theory, CLPT). Il problema della progettazione di strutture in cartone ondulato è stato ampiamente sviluppato dagli autori [5].

2. STUDIO DEL VOLO

Il velivolo è destinato a compiere una missione molto particolare: un volo planato a partire da una quota modesta (normalmente 10 m) con una velocità iniziale molto bassa visto che viene spinto a mano (stimata pari a 7 m/s in questo studio).

Per garantire portanza ad una velocità così bassa si è scelto il profilo alare di Figura 1 adottando una doppia ala come riassunto nella Tabella 1.

Lo studio del volo planato è stato svolto mediante una analisi bidimensionale nel piano complesso. Visto che il solo evento di Roma ha imposto requisiti diversi sul volo, per il limitato spazio a disposizione, si presenta in questa sede lo studio del volo per il caso standard.

In questo caso si hanno i seguenti parametri per le superfici alari:

$$\text{corda} := 1\text{-m} \quad \text{apertura} := 10\text{-m}$$

$$A_f := \text{apertura} \cdot \text{corda} = 10\text{m}^2$$

$$A_r := \text{corda} \cdot 0.5\text{-m} = 0.5\text{m}^2$$

$$\text{All} := \frac{\text{apertura}^2}{A_f} = 10 \quad \text{allungamento alare}$$

$$K_{\text{tot}} := \frac{1}{\pi \cdot \text{All} \cdot e^f} = 0.042 \quad \text{coefficiente complessivo della polare parabolica}$$

$$E_{\text{max}} := \frac{1}{2\sqrt{K_{\text{tot}} \cdot C_{D0}}} = 7.675 \quad \text{efficienza massima}$$

$$\gamma_{\text{min}} := \text{atan}\left(\frac{1}{E_{\text{max}}}\right) = 7.423\text{deg} \quad \text{pendenza minima}$$

$$X_{\text{max}} := 10\text{-m} \cdot E_{\text{max}} = 76.75\text{m} \quad \text{gittata teorica}$$

$$V_{E_{\text{max}}} := \sqrt{\frac{2 \cdot \text{Massa} \cdot g}{\rho \cdot \frac{A_f^2}{\sqrt{K_{\text{tot}}}} \cdot C_{D0}}} = 7.297 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{velocità di massima efficienza}$$

Si ricorda che la massima gittata durante questo tipo di evento è stata raggiunta in Austria nel 2000 coprendo ben 59.4m.

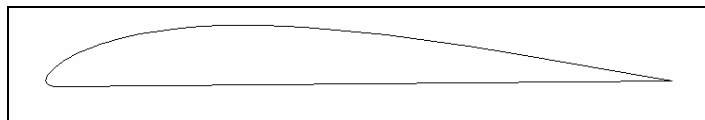


Figura 1: Profilo alare scelto.

Tabella 1: caratteristiche del profilo alare.

Tipologia aereo	Biplano
Profilo	“Aquila”
Corda massima	1 m
Camber massimo	4.05% al 34.7% della corda
Spessore massimo	9.38% al 31.3% della corda
C_p massimo	1.4
Angolo di incidenza	1.5°
Apertura alare anteriore	8 m
Apertura alare posteriore	3 m

Lo studio del volo è stato svolto ipotizzando delle polari quadratiche con portanza lineare fino allo stallo:

$$C_L(\alpha) := \text{if} \left(\left| \alpha - \alpha_0 \right| \leq \alpha_{\max}, C_{L\max} \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{\max}}, 0 \right)$$

$$C_D(\alpha) := C_{D0} + K_{\text{tot}} \cdot C_L(\alpha)^2$$

Il calcolo delle forze istantanee agenti in corrispondenza di ogni ala richiede la conoscenza della velocità locale dipendente dal moto del baricentro del velivolo e dalla velocità di beccheggio (i tre punti di montaggio delle ali sono espressi rispetto al baricentro del velivolo nel piano complesso):

$$v_r(v_g, \theta, \omega) := v_g + \omega \cdot P_{cr} \cdot e^{i \cdot (90 \cdot \text{deg} + \theta)}$$

$$v_{f1}(v_g, \theta, \omega) := v_g + \omega \cdot P_{cf1} \cdot e^{i \cdot (90 \cdot \text{deg} + \theta)}$$

$$v_{f2}(v_g, \theta, \omega) := v_g + \omega \cdot P_{cf2} \cdot e^{i \cdot (90 \cdot \text{deg} + \theta)}$$

Conoscendo le velocità si possono calcolare le forze applicate:

$$P_r(v, \alpha) := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_L(\alpha) \cdot A_r$$

$$P_f(v, \alpha) := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_L(\alpha) \cdot A_f$$

$$R_r(v, \alpha) := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_D(\alpha) \cdot A_r$$

$$R_f(v, \alpha) := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_D(\alpha) \cdot A_f$$

Esprimendo tali forze nel riferimento assoluto, e aggiungendo l'effetto della forza peso, è possibile risolvere il moto mediante un algoritmo di integrazione al passo.

Le condizioni iniziali per le variabili del moto sono le seguenti:

$$v_0 := (7. + 0i) \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$x_0 := (0 + 10i) \cdot \text{m}$$

$$\theta_0 := 6 \cdot \text{deg}$$

$$\omega_0 := \frac{0}{\text{s}}$$

L'angolo positivo corrisponde ad una partenza con velivolo cabrato. E' interessante osservare che in base ai risultati delle simulazioni risulta vantaggioso partire cabrati per la massima gittata massima 66.2m. Tuttavia se non si raggiunge una velocità sufficiente la partenza cabrata può provocare uno stallo catastrofico. Partendo picchiati il volo risulta assai più sicuro. Utilizzando anche in questo caso un angolo di 6 gradi si coprono 63.9 m, ma il volo è più stabile perché in caso di mancanza di velocità la prima parte di volo a bassa portanza consente di raggiungere la velocità necessaria al corretto funzionamento delle ali.

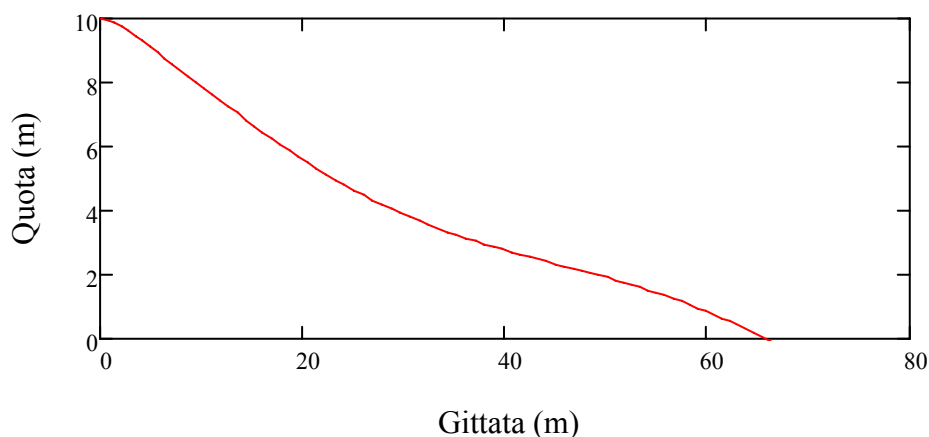


Figura 2: Traiettoria simulata con partenza cabrata 6 °.

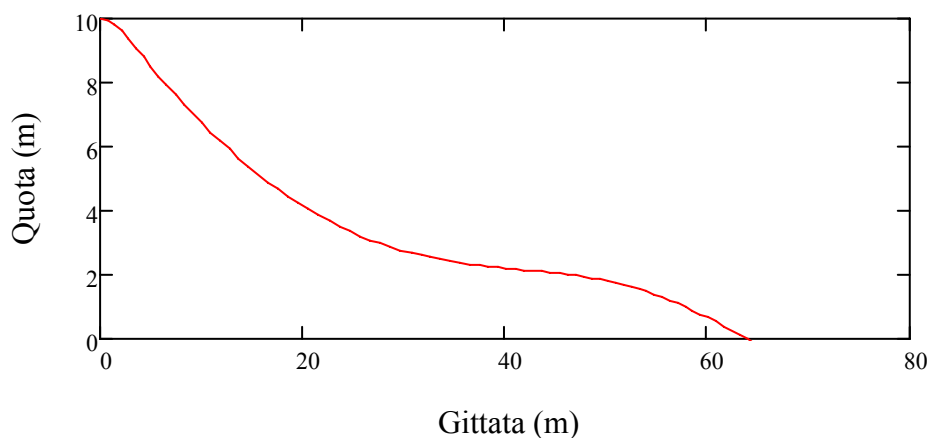


Figura 3: Traiettoria simulata con partenza picchiata 6 °.

3. STUDIO DELLA RESISTENZA

Al fine di valutare se il velivolo sia in grado di resistere alle sollecitazioni cui è sottoposto una volta realizzato sono state effettuate delle analisi preliminari della struttura utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM). Come anticipato il cartone ondulato è costituito da tre o più fogli di carta tenuti insieme da del collante a base di amido. Il processo produttivo della carta e del cartone stesso fanno sì che nel prodotto finito si possa individuare un comportamento ortotropo: le fibre della cellulosa vengono ad allinearsi secondo una direzione preferenziale allineata con il senso di avanzamento della carta e del cartone nella macchina ondulatrice.

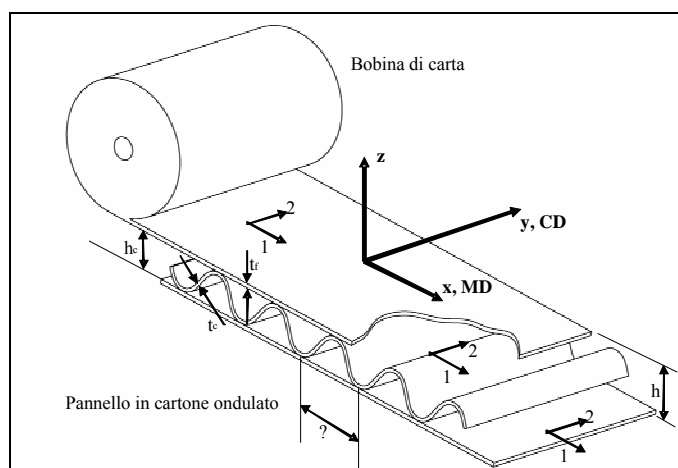


Figura 4: Sistema di riferimento ortotropo.

Sfruttando questo comportamento ortotropo del cartone ondulato, è possibile risalire alla definizione di un materiale equivalente utilizzando la CLPT, Teoria classica delle piastre laminate, come riportato dagli autori in [5]. Partendo dalla definizione del profilo alare e dalla disposizione relativa tra le tre superfici alari, è stato realizzato un modello CAD del velivolo:

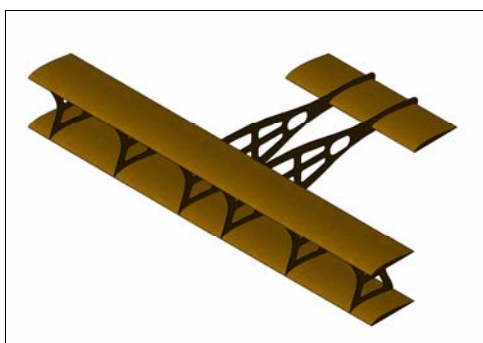


Figura 5: Modello CAD del velivolo.

Il modello cad è stato poi importato in un pre-processor FEM commerciale (FEMAP) nel quale è stato possibile realizzare la mesh della struttura e impostare materiali, tipo di elementi, carichi e vincoli.



Figura 6: Mesh con elementi di tipo piastra.

Per la realizzazione del modello si è scelto di utilizzare un cartone a doppia onda, ottenuto unendo insieme 3 fogli di carta non ondulata e due fogli ondulati, la composizione scelta è stata la KSSSK 59695 BC e si è scelto di modellare non la geometria in pieno dettaglio dell'ondulazione, ma di considerare dei materiali equivalenti agli strati ondulati.

Le caratteristiche delle carte e dei materiali equivalenti viene riportata di seguito:

Tabella 2: Caratteristiche meccaniche delle carte.

Carta	K5	S9	S6
Spessore [mm]	0,22	0,22	0,18
Densità [kg/m ³]	643,2749	638,5321	634,034
E_1 [N/mm ²]	2800,8	3395,771	3980,27
E_2 [N/mm ²]	1309,3	1763,636	1876,192
G_{12} [N/mm ²]	840,16	1014,041	930,541
ν_{12}	0,19	0,211156	0,201164

Per quanto riguarda la carta S9, i dati inseriti nel modello agli elementi finiti non sono quelli riportati in Tabella 2, dato che si è scelto di applicare l'algoritmo di condensazione riportato in [5]. Dopo aver effettuato tale condensazione in un materiale avente caratteristiche membranali e flessionali equivalenti a quelle dello strato ondulato, i dati riguardanti i due strati ondulati sono i seguenti:

Tabella 3: caratteristiche meccaniche dei materiali equivalenti agli strati ondulati

Carta	S9 onda B	S9 onda C
Spessore [mm]	2,4	3,3
Densità [kg/m ³]	77,05	93,83
E_1 [N/mm ²]	1,52	0,67
E_2 [N/mm ²]	174,02	142,81
G_{12} [N/mm ²]	50,93	36,74
ν_{12}	0,01	0,01

Le caratteristiche di resistenza utilizzate per le carte in esame sono le seguenti:

Tabella 4: Caratteristiche di resistenza dei materiali impiegati.

Carta	K5	S6	S9 onda B	S9 onda C
σ_{LU} [N/mm ²]	6,820	5,86	0,65	0,5
σ_{LU}' [N/mm ²]	10,330	7,71	0,924	0,711
σ_{TU} [N/mm ²]	3,39	3,39	0,434	0,356
σ_{TU}' [N/mm ²]	7,16	6,02	0,88	0,723
τ_{LT} [N/mm ²]	8,6	6,81	0,902	0,717

Ultimata la realizzazione del modello si è proceduto ad effettuare una calibrazione delle forze agenti sulla struttura. Data la configurazione delle ali e la portanza che ne deriva, il velivolo in fase di volo risulta soggetto a due sistemi di forze esterne in generale non equilibrati: la risultante della portanza agente sulle ali e la risultante della forza peso dovuta al campo gravitazionale. Al fine di bilanciare questi due sistemi si è deciso di agire sulla posizione del pilota e del suo baricentro. Sono state effettuate due analisi statiche distinte, nelle quali il modello si viene a trovare separatamente sotto l'azione dei due sistemi. Dai risultati di queste analisi è stato possibile ricavare la posizione del baricentro delle forze, sia per la risultante delle forze di superficie (portanza) che per la risultante delle forze di volume (forza peso). L'equazione di equilibrio dei momenti agenti sulla struttura risulta quindi essere, considerando un pilota del peso di 80 kg,

$$F_v \cdot b_{Fe} + F_s \cdot b_s + m_p \cdot g \cdot b_p = 0$$

È stato quindi possibile ricavare la posizione del pilota che equilibra sia le forze agenti che i momenti che queste generano:

$$b_p = \frac{b_v \cdot F_v + b_s \cdot F_s}{M_p \cdot g}$$

Nelle equazioni precedenti b indica il braccio della forza rispetto al baricentro del velivolo, F la forza; i pedici s e f si riferiscono alle forze di superficie e di volume, mentre il pedice p si riferisce al pilota; g è l'accelerazione di gravità.

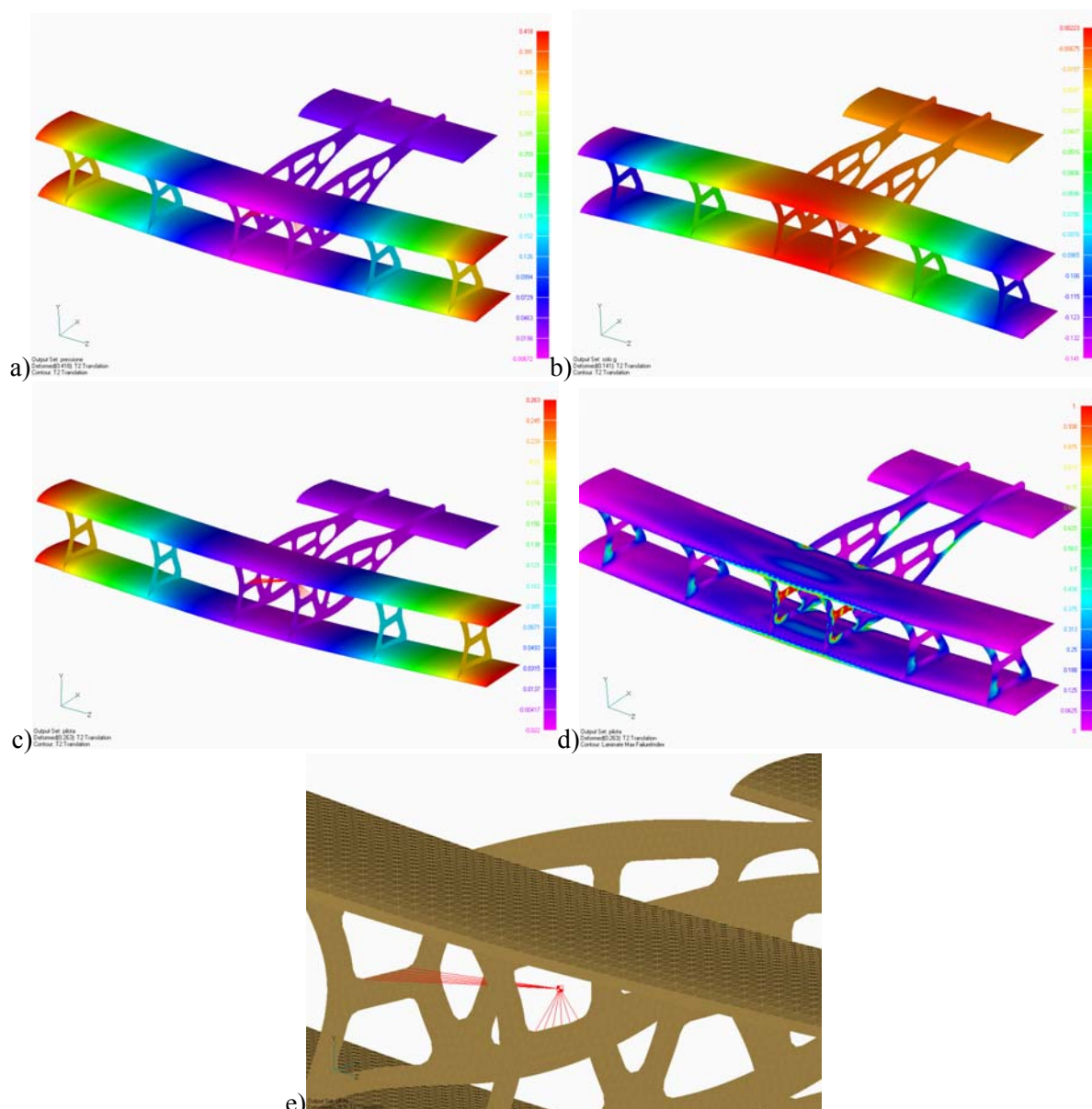


Figura 7: a) deformata sotto l'azione delle forze di superficie, b) deformata sotto l'azione delle forze di volume, c) deformata sotto l'azione delle forze di superficie e di volume e considerando il peso del pilota, d) andamento del failure index secondo la teoria di Tsai-Wu, e) particolare del baricentro del pilota e zona di attacco alla struttura.

Dai risultati delle analisi riportati in Figura 6 si può notare come il failure index raggiunga valori unitari, ossia si è in condizione di crisi del materiale, soltanto nelle zone di attacco del pilota. Questo è sicuramente dovuto alla particolare modellazione del pilota stesso e del fatto che il suo peso viene applicato alla struttura attraverso un numero ristretto di nodi mediante un elemento di tipo “interpolate”. Tale risultato è stato comunque ritenuto soddisfacente per una analisi preliminare per la realizzazione di un prototipo, e ha fornito comunque indicazioni sulle zone cui porre maggiore attenzione nelle fasi successive.

4. STUDIO DELLA FATTIBILITÀ

La fase successiva di questo progetto è stata la realizzazione di un modello in scala del velivolo per valutare le procedure da seguire nella lavorazione del cartone ondulato e i materiali da utilizzare. Grazie alla collaborazione con lo stabilimento di Anzio della SmurfitKappa, è stato possibile

realizzare, mediante l'utilizzo di una taglierina a controllo numerico, le varie componenti in cartone necessarie alla realizzazione dell'aereo.

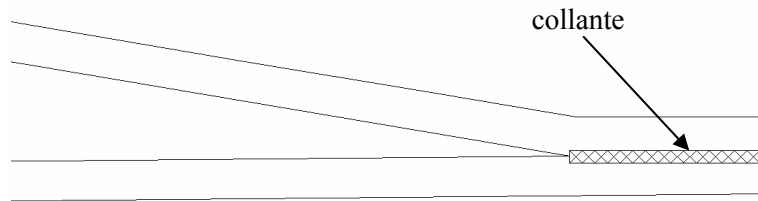


Figura 8: Particolare della realizzazione dell'ala.

Le parti che necessitano di maggiore attenzione in fase di realizzazione sono senza dubbio le ali. Data la lunghezza delle stesse e i limiti dovuti alla luce massima della taglierina a controllo numerico, è stato necessario realizzarle in due parti. Ciò ha comportato lo studio di un sistema di giunzione adatto a ricostruire l'ala nella sua interezza. Per far mantenere al cartone la forma dell'ala si è scelto di posizionare all'interno dell'ala stessa alcune centine dal profilo identico a quello alare. Le stesse centine, incollate insieme in un numero pari a 12, sono state utilizzate per unire insieme le due parti delle ali, incollandole alle superfici interne delle due semi ali. Il cartone utilizzato per realizzare la superficie dell'ala oltre ad essere incollato lungo i bordi delle centine è stato chiuso secondo lo schema riportato in Figura 8, unendo le superfici a contatto. La colla utilizzata per fissare sia le superfici delle ali che le pareti verticali a queste è stata fornita dalla SmurfitKappa ed è una tipologia di colla impiegata per la realizzazione di prototipi di imballaggi.

La realizzazione del prototipo ha seguito le seguenti fasi:

- Incollaggio delle superfici esterne delle ali alle centine
- Incollaggio delle semiali mediante le centine di fissaggio
- Incollaggio delle pareti verticali ad una delle ali anteriori
- Inserimento e fissaggio dell'ala posteriore alle pareti lunghe
- Incollaggio dell'altra ala anteriore al resto della struttura assemblata



Figura 9: Fasi realizzative del prototipo.



Figura 10: Prototipo completato esposto alla “3° Giornata di Studio: GLI STRUMENTI DEL RACE ENGINEERING: L’AERODINAMICA” presso l’Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.J. D’Costa & F.M. Bartlett, “Full-scale testing of corrugated fibreboard shelter subjected to static-equivalent wind loads”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 1671-1688, 2003.
- [2] A. El Damatty, A. Mikhail, A. Awad, “Finite element modeling and analysis of a cardboard shelter”, *Thin-Walled Structures*, 38, 145-165, 2000.
- [3] A. Gilchrist, J. Suhling, T. Urbanik, “Nonlinear finite element modeling of a corrugated board”, *American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division*, 231, 101-106, 1999.
- [4] U. Nyman, P.J. Gustafsson, “Material and structural failure criterion of corrugated board facings”, *Composite Structures*, 50, 79-83, 2000.
- [5] C. Brutti, M.E. Biancolini, S. Porziani, “Corrugated Board Containers Design Methods”, XXXVI Convegno Nazionale AIAS.