

Materiali compositi nel settore eolico: la situazione attuale e future sfide.

problematiche strutturali dei materiali e produzione di pale con lunghezze superiori a 25 mt.

Mini e micro eolico : diminuzione dei costi di produzione attraverso nuovi materiali, nuovi cicli produttivi e nuove geometrie.

Ing. Aldo Cattano

Consulente tecnico settore progettazione, prototipazione e costruzione mini turbine eoliche



Storiografia:

le prime pale per turbine eoliche ad asse orizzontale a essere fabbricate in modo industriale sono arrivate verso il 1980. All'inizio si utilizzava resina poliesteri e mat di vetroresina (materiali e ciclo di produzione derivato dalla nautica da diporto).



Poi la lunghezza della pala è aumentata in modo vistoso e così le forze in gioco. Si è passati quindi ad usare resina epossidica e tessuti di vetro. Il ciclo di lavoro era il sistema di impregnazione manuale della resina sui tessuti secchi. Questo sistema però comportava che il manufatto non avesse lo stesso peso in ogni punto dato che ci potevano essere parti con sovra impregnazione e parti sotto impregnate.

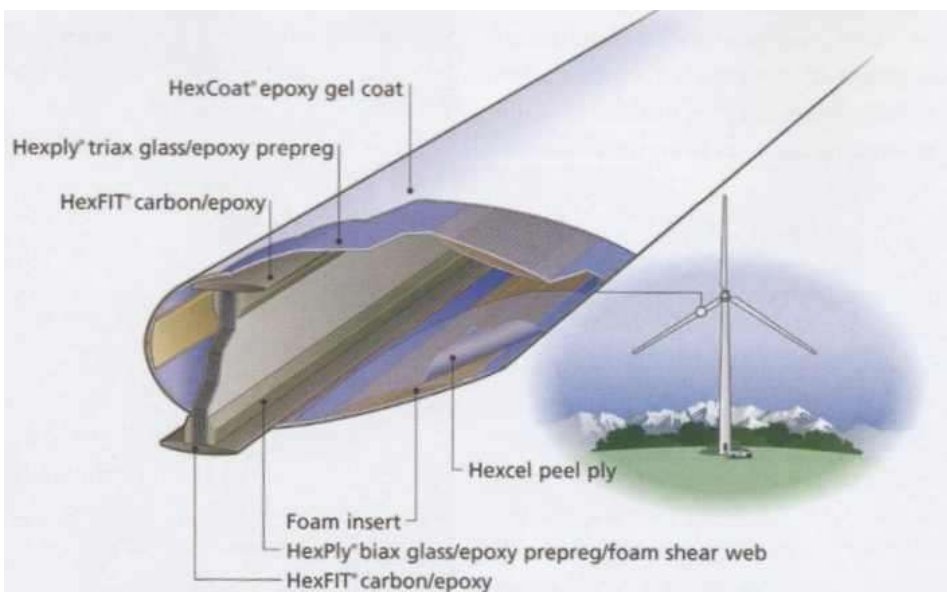


Con la produzione in massa si è cercato sempre di più di standardizzare il ciclo di produzione per aumentarne la qualità. Si è passati dalle prime pale da lunghezza sui venti metri a pale da 30-50 metri, fino ad arrivare alle attuali 62.5 mt. Anche se ho già sentito parlare di pale da 70-80 mt.



Cicli di Produzione e materiali allo stato dell'arte attuale delle pale nel settore delle turbine da MW.

Oggi giorno le maggiori aziende produttrici del settore utilizzano il sistema VARTM (vacuum assisted resin transfer molding) con variazioni sul tema (infusione, SCRIM, RIM, etc.) e qualche ditta utilizza i preimpregnati (il più rappresentativo tra di essi è la società Gamesa spagnola).

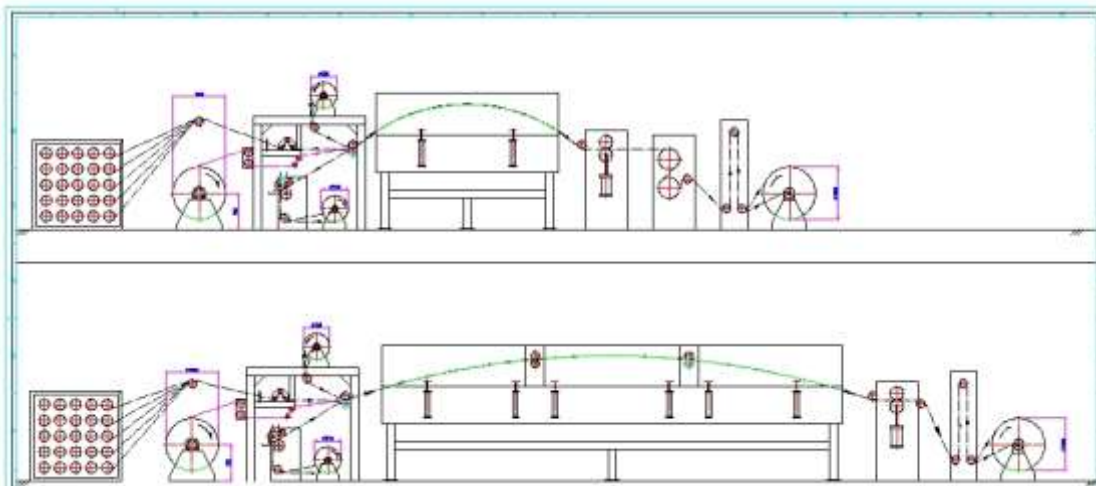


Industrializzazione

Inizialmente per velocizzare il ciclo di produzione si utilizzavano dei rotoli di tessuto di vetro che venivano fatti passare per un bagno di resina e quindi posizionati immediatamente sullo stampo, ma questo sistema aveva comunque il problema che la resina doveva già essere catalizzata e ad un certo punto il ciclo doveva finire con grosso spreco di resina.



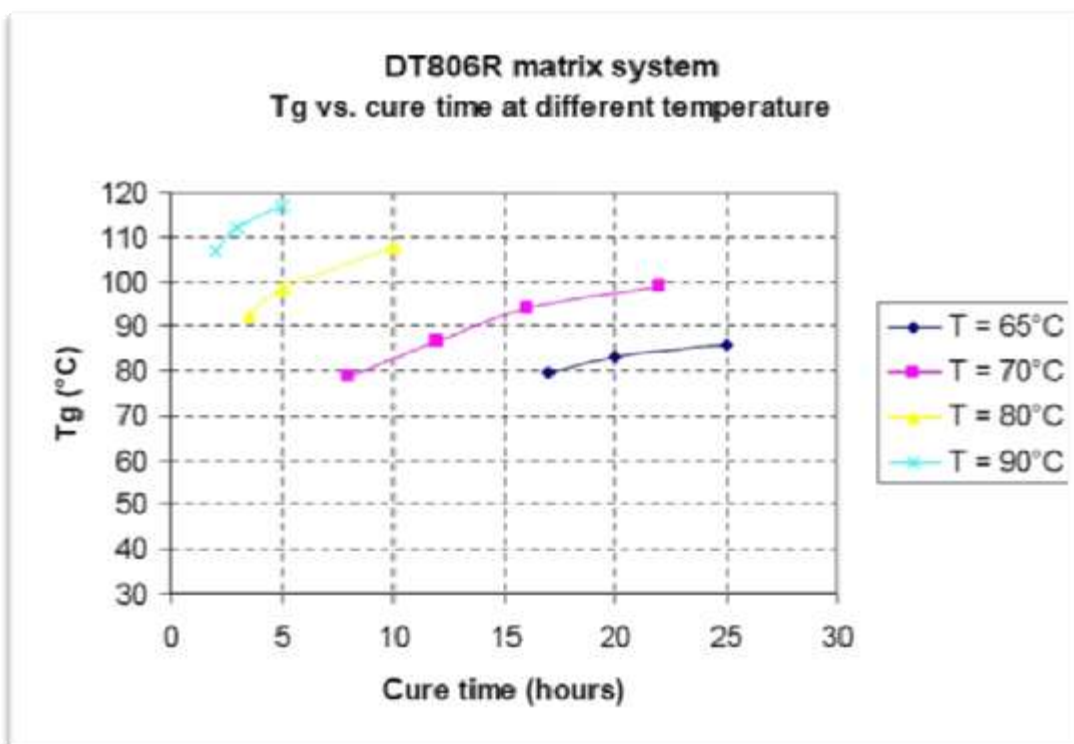
Pre-impregnati

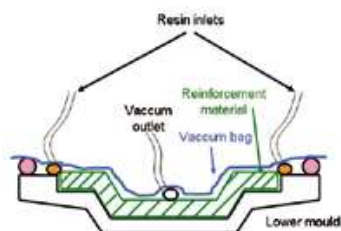


Si è passati ad utilizzare materiali pre-impregnati ma questi ultimi dovevano essere mantenuti in celle frigorifere a -18 gradi e quando venivano portati a temperatura ambiente, dovevano essere utilizzati in pochi giorni e in ambiente a temperatura e umidità controllata.

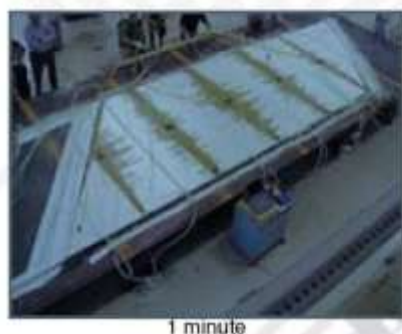


L'innovazione ha portato il tempo di permanenza a temperatura ambiente senza decadimento del materiale (resina) è stato portato da qualche giorno a 2-3 settimane e si è diminuita la problematica dell'umidità dell'aria. Un'altra problematica era che i pre-impregnati dovevano essere catalizzati con ciclo termico in autoclave a temperature di 120 gradi per cui anche gli stampi dovevano sopportare quelle temperature per cui il costo degli stessi era molto alto. Negli ultimi anni pre-impregnati a cura a 70-80 gradi hanno fatto ingresso sul mercato per cui non è più necessario utilizzare stampi molto costosi e qualche volta (per pochi pezzi) possono essere utilizzati stampi in legno particolare , nello stesso tempo sono arrivati pre-impregnati che non necessitano dell'autoclave per la loro compattazione ma solo di un forno e di un sistema sottovuoto per cui il costo dei macchinari accessori è sceso molto. Il costo dei pre-impregnati poi è diminuito di almeno 5 volte negli anni perché la quantità utilizzata dal mercato è considerevolmente aumentata, passando da un settore di nicchia ad essere utilizzato nell'edilizia e nella costruzione di ponti e strade.

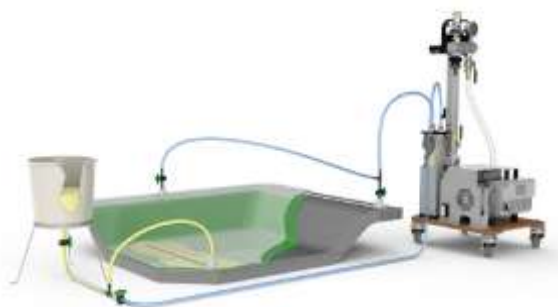


VARTM


Altro importante passo è stato quello dell'impregnazione sullo stampo dei tessuti in un unico processo: VARTM. Ossia i materiali (tessuti e schiume) vengono posizionati secchi a mano sullo stampo. Viene chiuso il pacco dei tessuti e rinforzi con un sacco da vuoto e poi viene pompata la resina da una parte e risucchiata l'aria dall'altra. All'inizio il ciclo aveva vari problemi dovuti alla alta viscosità della resina , alla bassa "bagnabilità" dei tessuti, alla bassa porosità dei tessuti e al corto ciclo di lavoro delle resine prima che solidificassero (gel time).



Sono state messe a punto resine con viscosità simili all'acqua per cui la velocità di infiltrazione all'interno dei tessuti si è innalzata. I tessuti sono stati modificati in modo da essere più porosi e di essere bagnati facilmente e in profondità dalla resina (grazie ad una simile tensione superficiale tra resina e tessuto). In questo modo sono necessarie basse pressioni di pompaggio della resina e bassa pressione di aspirazione. Infatti all'inizio c'era il rischio che la resina andasse in ebollizione e quindi rimanessero delle bolle di gas all'interno della resina (un grosso problema di bassa coesione tra gli strati di vetro). In ultimo i cicli di lavoro della resina sono stati allungati moltissimo rendendo possibile di impregnare in una sola volta scafi di yacht di 40 metri di lunghezza e pale di 60 mt. Altro fattore importante nel passaggio da impregnazione manuale a impregnazione sotto vuoto automatica è stato il miglioramento delle condizioni ambientali del lavoro, perché l'operatore non viene più a contatto con i vapori delle resine (peraltro nocive durante la reazione di catalizzazione).Questo sistema ha portato il grado di uniformità dei materiali e dei pesi all'incirca al +/-1 %. E' ininfluenza per uno yacht, ma ancora sensibile per una turbina eolica in cui 3 pale devono girare ad alte velocità e un minimo di differenza in peso o in posizione del baricentro comporta una vibrazione ciclica al mozzo e quindi un degrado dei cinematismi in minor tempo.



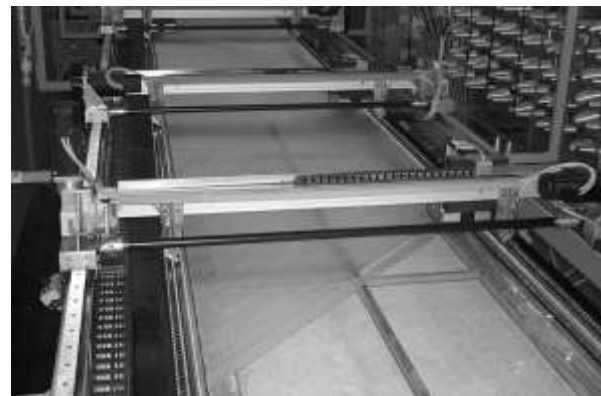
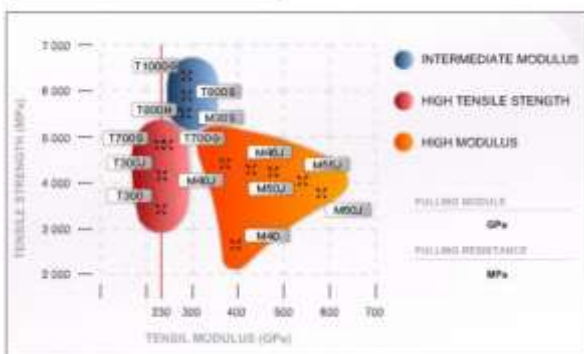
Resine

Le resine utilizzate nel settore sono principalmente epossidiche anche se c'è qualche utilizzo di vinilestere e poliesteri, dato che le epossidiche sono molto costose rispetto a tutte le altre resine termoindurenti. Le resine epossidiche sono mischiate da parecchio tempo a polveri in percentuale minima che fungono da elasticizzanti, plasticizzanti, aumento della resistenza nel tempo agli UV, ma ultimamente sono state addizionate in percentuale minima a nano particelle (grafene), cosa che ne ha aumentato molto la resistenza propria e ciò ha permesso di togliere ancora peso dalla pala. La resina deve tenere le fibre assieme e trasportare il carico da una fibra all'altra. Ortogonalmente alla fibra però c'è solo la resina che resiste agli sforzi. Per aumentare la resistenza ortogonalmente alla direzione principale delle fibre si deve mettere anche uno strato ortogonale di fibre, ma se la resina diventa più resistente, questo strato può essere più sottile. Le nano particelle (specie i nano tubi di carbonio) promettono aumenti importanti nella resistenza della resina sia come sforzi a trazione che come durata a fatica, speriamo che il costo di questi nano materiali sia presto accessibile per un maggiore utilizzo nel settore. La nuova sfida è la resina poliuretanica, con caratteristiche simili alla vinilestere, ma resistenza a fatica altissima. La Bayer ha appena investito in un nuovo centro ricerche in Danimarca per resine poliuretaniche in pultrusione x la Vestas.

Tessuti e rinforzi

Più la pala è lunga e più deve essere leggera per cui i materiali utilizzati devono avere proprietà sempre più al top ma i costi devono rimanere contenuti perché è un prodotto di massa. Il carbonio è un ottimo candidato, il suo costo è diminuito considerevolmente negli anni però per la maggior parte delle applicazioni è ancora troppo oneroso.

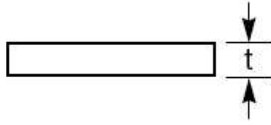
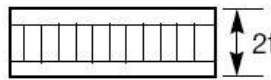
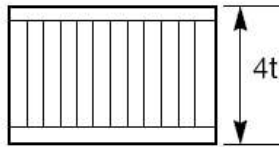
CARBON FIBRE: Product range



Attualmente si cerca di utilizzare il carbonio nelle zone più sollecitate come alla radice della pala e nelle solette del longherone, qui molte volte in forma pultrusa. Il vetro ha fatto i suoi passi e si è passati dal vetro E al vetro S con caratteristiche a metà strada tra il vetro E e il carbonio. All'interno dello stesso materiale (ad esempio tessuto di vetro) si è passati dall'utilizzo di tessuti plain e twill (tessuti in cui trama ed ordito continuano a cambiare direzione passando sopra e sotto l'un l'altro) ai tessuti multi assiali e a i tri-assiali (anche quadri-assiali). In questo caso il filato rimane sempre rettilineo e vari strati di unidirezionali posizionati nelle direzioni richieste (di norma -45/0/+45) sono tenuti assieme da un 5% di materiale che cuce assieme i vari strati. In Italia abbiamo società leader internazionali del settore. All'interno del multi assiale ci possono poi essere vari strati di materiali diversi per cui sono possibili molte più variazioni. In questo modo non è più necessario posizionare molti strati in direzioni diverse ma servono pochi strati con le caratteristiche prescelte preventivamente a progetto, quindi meno tempo di lavoro e più preparazione di semilavorati. In più il fatto di avere un filamento unidirezionale teso avvicina molto le caratteristiche tecniche tra pre-impregnati e tessuti secchi impregnati in loco.

Sandwich

E veniamo al sandwich: nelle pale eoliche è uno standard utilizzare strutture in sandwich in modo da sfruttare al meglio i materiali e alleggerire di molto il manufatto, rispetto ad una struttura non sandwich.

	Solid Metal Sheet	Sandwich Construction	Thicker Sandwich
			
Relative Stiffness	100	700 7 times more rigid	3700 37 times more rigid!
Relative Strength	100	350 3.5 times as strong	925 9.25 times as strong!
Relative Weight	100	103 3% increase in weight	106 6% increase in weight

A striking example of how honeycomb stiffens a structure without materially increasing its weight.

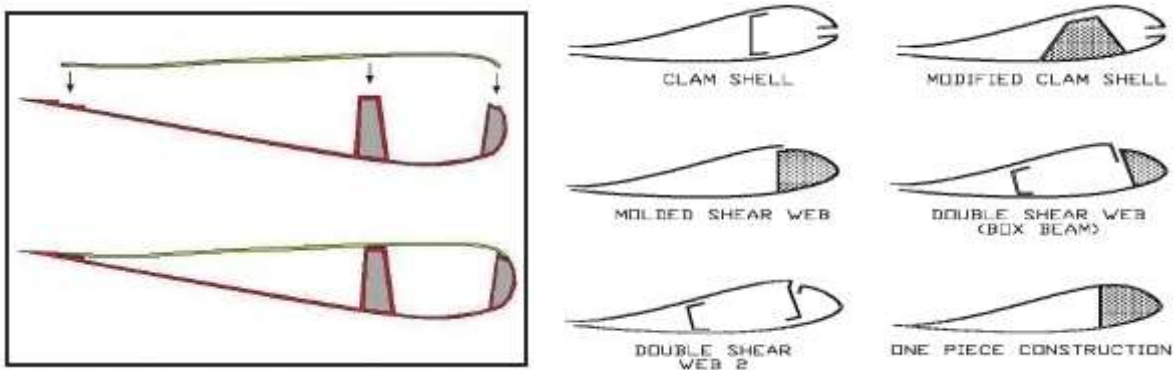
All'inizio non si riusciva a utilizzare il VARTM con la struttura in sandwich perché né l'aria né la resina fluivano bene nella parte tra schiuma e stampo, mentre adesso le schiume sono forate e quadrettate in modo da permettere un buon passaggio della resina ed un'unione delle due pelli tramite la resina che passa in mezzo a questi fori. La schiuma del sandwich ora può essere termoformata per seguire perfettamente la curvatura della pala e resiste senza produrre gas anche a temperature di 100 gradi, così da poter essere utilizzate anche con i pre-impregnati (un tempo queste schiume, principalmente rohacell, esistevano ma erano molto costose).



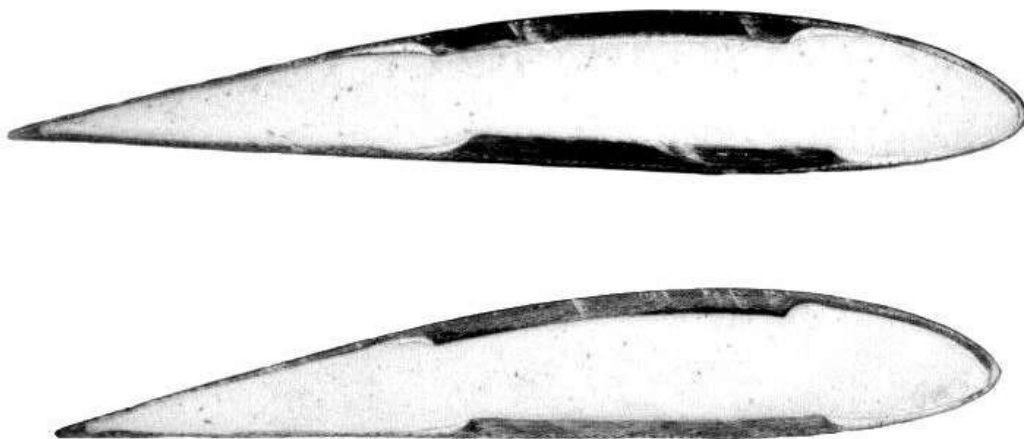
Tipologia di costruzione della pala

LE pale sono costruite in 3 parti principalmente e successivamente assemblate assieme tramite incollaggio: i due gusci (dorso e ventre) e il longherone (o più longheroni) che unisce i due gusci . quindi prima si producono le tre parti e poi si incollano assieme. Ultimamente si sono viste nuove tipologie:

la Siemens ha un sistema in cui tutte le tre parti vengono formate in una sola fase utilizzando il processo simile al VARTM. Altre ditte annegano il longherone con un guscio per cui l'incollaggio avviene solo tra due parti.

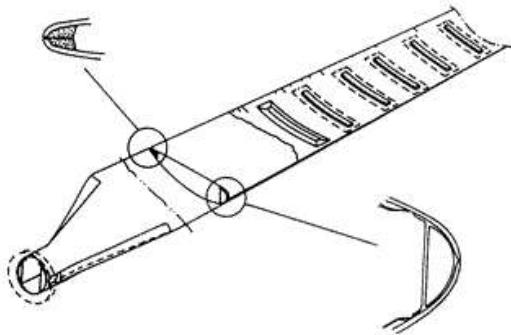


C'è poi la possibilità di utilizzare due gusci incollati assieme e al cui interno viene immessa una schiuma, per cui non è più necessario il longherone (anche se questo sistema è di solito più pesante).

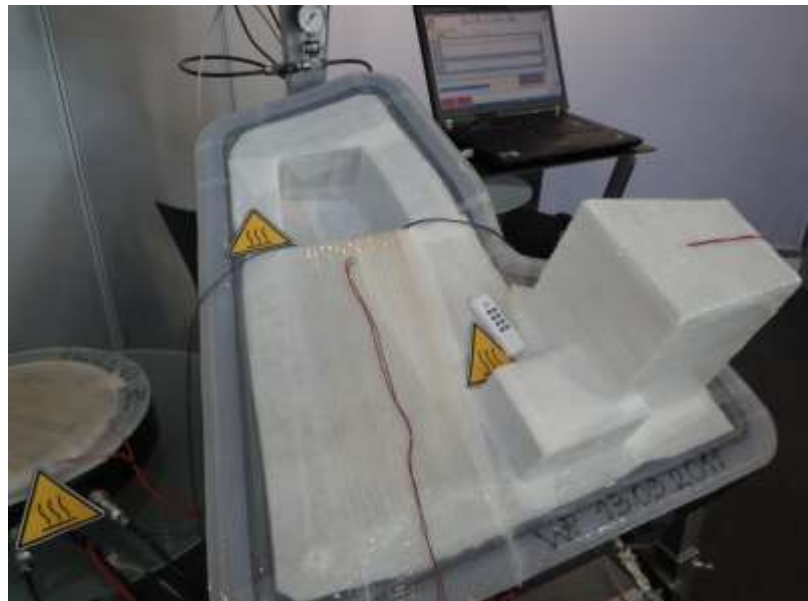


Incollaggi

Le colle hanno fatto balzi da leone dal punto di vista della tenacia, resistenza a peeling. Nella parte anteriore normalmente i due gusci sono agganciati tramite una patella o dente e quindi lo spessore del collante può essere basso, mentre nella parte del bordo di uscita c'è una grande superficie di appoggio perché i due gusci hanno un piccolo angolo di inclinazione tra loro prima di unirsi lungo una linea, per cui c'è un ampio volume da riempire per ottenere un'area sufficiente. Le colle in questo caso sono diventate leggerissime, flessibili e resilienti. Si utilizzano collanti specifici per ogni zona.



Stampi



Anche gli stampi (necessari per la produzione della pala) hanno avuto il loro percorso di innovazione. Prima la resina degli stampi doveva essere curata a temperature più alte del ciclo di lavoro standard, mentre adesso sono state sviluppate delle resine per stampi che resistono a temperature di 20 gradi superiori alla temperatura di cura a cui sono arrivati durante la loro formatura. Gli stampi molte volte sono formati utilizzando il ciclo di produzione VARTM minimizzando i tempi di lavoro. Ci sono stampi con resistenze elettriche (o ad olio) interne in modo da mantenere il più possibile uniforme la temperatura di cura da una parte e dall'altra del sandwich della pala. Le resine per stampi sono sempre più rigide e resistenti, ma con la possibilità di essere rilavorate, nel caso di distacco di piccole parti dovute ad usura.

Si è cominciato a utilizzare forni a infrarossi e a parlare di forni a microonde per minimizzare il costo dell'energia nel caso del microonde per poter maneggiare gli stampi immediatamente dopo la fine del ciclo

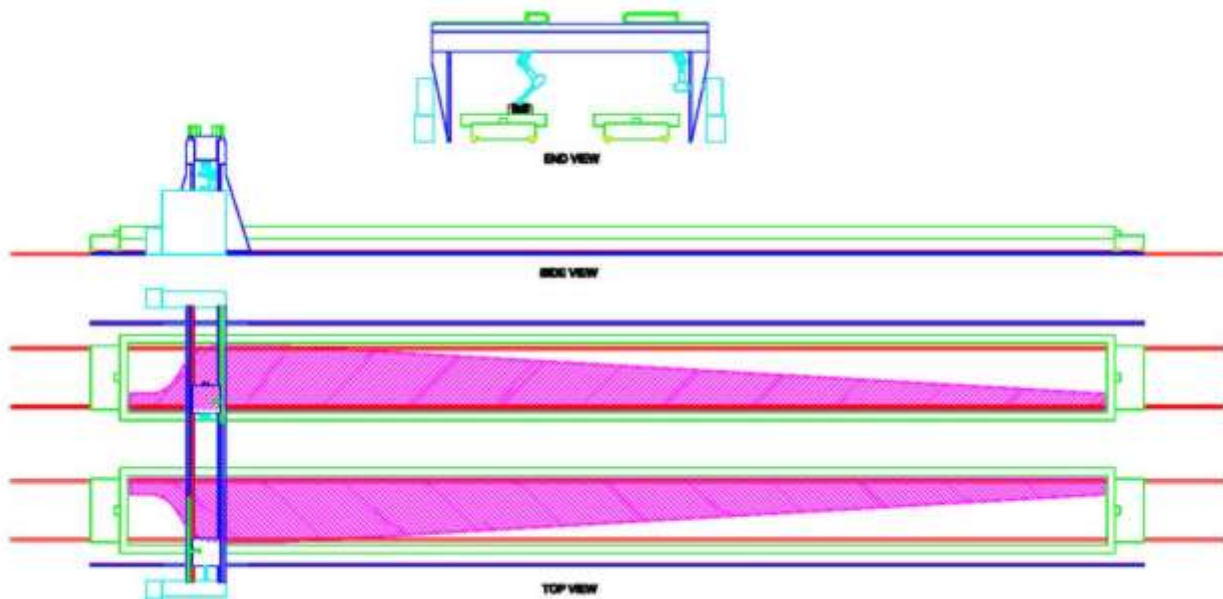
di cura perché solo la parte in cura si riscalda (come il cibo nel piatto nel forno a microonde di casa), ma questo è ancora futuro.

Automazione

Ora che la produzione aumenta sia come quantità che come dimensioni di anno in anno, le pale non sono più a misura di lavoro per l'uomo e la qualità è sempre più stringente, è doveroso cercare di automatizzare al massimo il ciclo di produzione e renderlo esente da errori. Esistono macchine di taglio automatico dei tessuti (sia per tessuti impregnati che secchi).



Macchine a laser che illuminano il punto preciso di posizionamento del singolo strato. Macchine robotizzate che posizionano il tessuto pre-impregnato in nastro direttamente sullo stampo. L'automazione ha un ruolo chiave nel futuro di questo settore.



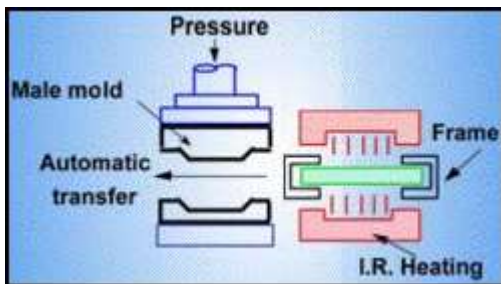
Il mini eolico

Abbiamo visto lo stato dell'arte delle pale nel settore principalmente del megawatt, anche se tutta la tecnica qui descritta viene anche utilizzata nel mini eolico. Anche nel micro e mini però le cose stanno evolvendo. Intanto il mercato del mini e micro eolico è in forte crescita, però necessita ancora di quella standardizzazione e qualità che ormai sono una norma nel grande eolico.

Nel megawatt si utilizza soprattutto resina termo indurente ma nel microeolico si sta facendo strada l'utilizzo di termoplastico rinforzato.

Termoplastico

Il termoplastico è riciclabile e alla fine della vita utile, la pala può essere fusa e la plastica riutilizzata. Il termoplastico può essere termosaldato, si possono fare parti molto complesse e unirle una all'altra in una seconda fase senza che si veda una discontinuità strutturale. Si può fare a meno di utilizzare il guscio in sandwich e ottenere una struttura simile alle ali degli aerei con centine e ordinate (costolature) per avere strutture più leggere. Il materiale termoplastico viene addizionato fino a 70 % di fibra corta di vetro e al 40% di fibra lunga di vetro , mentre arriva al 30% di fibra lunga di carbonio. Esiste poi il tessuto in carbonio o vetro con termoplastico al suo interno .Questo tessuto è fatto da fibre di vetro e fibre di plastica , che in temperatura si fondono e compattano con la fibra di vetro (ad esempio il twintex). Il pezzo viene stampato a temperature molto più alte rispetto al ciclo con resina termoindurente ma il ciclo è molto più veloce per cui la producibilità è alta e i costi più bassi, l'importante è arrivare a numeri dell'ordine delle decine di migliaia di pezzi. Il costo dello stampo infatti è considerevolmente maggiore perché è costruito in acciaio o lega di alluminio.



Il termoplastico è più leggero e più resistente della resina termoindurente a parità di volume, ma ha alcuni problemi di fragilità .Il problema del termoplastico è il basso aggrappaggio meccanico tra fibra e plastica per cui resiste poco ai cicli di fatica. Per far fronte a questo inconveniente si stanno sviluppando resine termoplastiche liquide additivate a emulsionanti che permettono una maggior compattazione tra la resina e la fibra durante la fase di fusione.

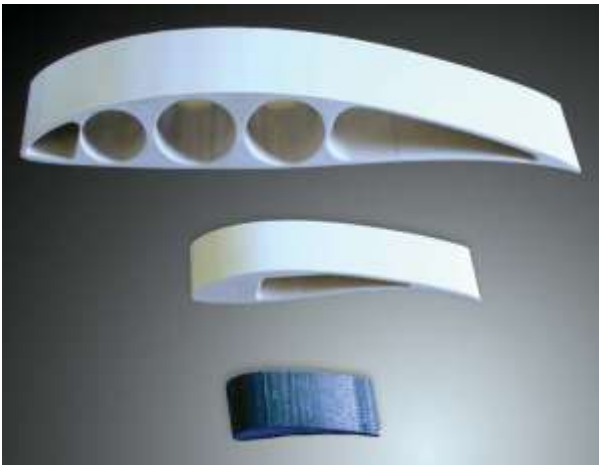
Resina termoindurente nel micro e mini eolico

Ciclo RTM

Nel settore delle micro-pale e mini pale in resina termoindurente si fa strada il ciclo a RTM, che prevede lo stampo e il controstampo, la resina è iniettata a forti pressioni,ma il ciclo è veloce e la riproducibilità è alta. In questo caso sia stampo che contro stampo devono essere rigidi e resistenti alle forti pressioni quindi il costo è inferiore allo stampo per i termoplastici , ma superiori allo stampo per cicli a VARTM.

Pultrusione

Un altro settore in evoluzione è il ciclo di pultrusione. Con questo ciclo di produzione si ottengono profili a sezione costante, ma ciò può essere ben utilizzato nelle turbine ad asse verticale diminuendo il peso, aumentando il modulo elastico e permettendo velocità angolari maggiori e quindi potenze maggiori a parità di superficie esposta al vento. Ultimamente ci sono sviluppi anche nella pultrusione con torsione per cui si possono avere delle pale a corda costante ma con torsione lungo l'asse per cui si potrebbero anche utilizzare nel settore delle mini turbine ad asse orizzontale, con qualche punto di efficienza in meno rispetto a pale rastremate, ma con costi molto contenuti e caratteristiche meccaniche altissime, dato che nel pultruso la percentuale di resina arriva al 20-30% in peso e la fibra è completamente allineata. Nella pultrusione attuale c'è poi uno strato esterno di tessuto che fascia assieme tutte le fibre unidirezionali assieme.

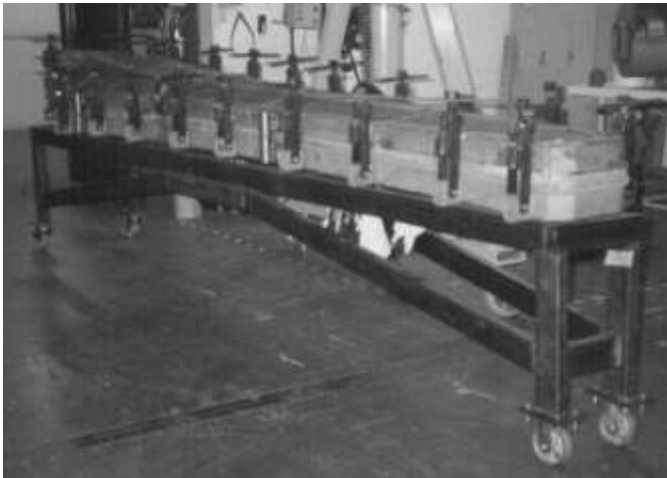


C'è anche il pull-winding, che è un misto tra la pultrusione (fibre perfettamente allineate alla direzione della pultrusione) e filament-winding, processo in cui le fibre vengono arrotolate attorno al pultruso per avere una fasciatura in tensione ed uniforme lungo tutto il manufatto.



Bladder moulding

Ultimo settore in evoluzione è l'uso del bladder moulding nella produzione di pale fino a 5 mt.



In questo caso si utilizzano materiali pre-impregnati, uno stampo in alluminio autoriscaldato con chiusura a tenuta in pressione all'interno di una pressa e un circuito ad alta pressione (20 bar) ad aria. La stratificazione dei tessuti pre-impregnati viene montata attorno ad un palloncino (sacchetto) e poi viene messa dentro uno stampo in alluminio, che viene chiuso e portato in temperatura.



A questo punto il palloncino viene gonfiato in pressione seguendo un preciso diagramma che segue la curva di temperatura fino a completa catalisi della resina. La pala è precisa , altamente riproducibile, il sistema può avere un alto grado di automazione e le caratteristiche di resistenza meccanica sono alte. I costi di investimento delle apparecchiature non sono poi molto più alte del sistema a VARTM a parte lo stampo. Si sono avuti esempi di pale così prodotte di lunghezza fino a 6 mt con buoni risultati.

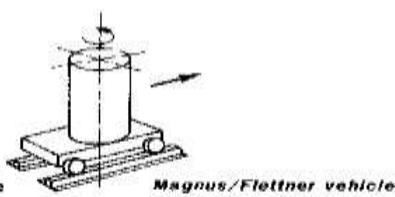
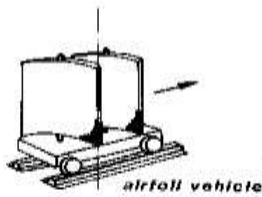
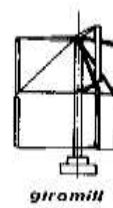
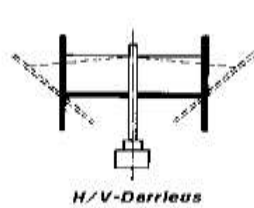
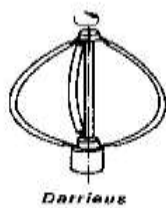
Nuove Geometrie

Nelle turbine di grandi dimensioni si è ormai allo standard del tri-pala , up-wind ad asse orizzontale, l'innovazione è soprattutto nel generatore senza moltiplicatore di giri e nella parte elettronica.

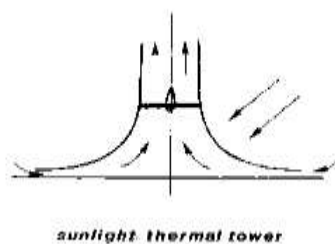
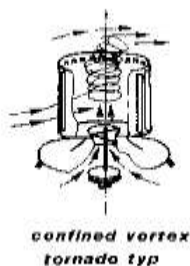
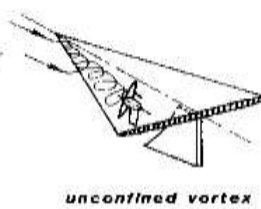
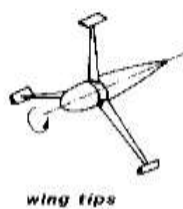
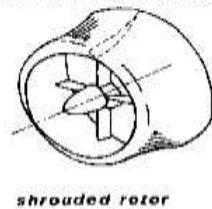
Nel mini eolico invece c'è un continuo fiorire di nuove geometrie e speriamo che questo porti ad innovazioni sostanziali che permettano un aumento della potenza assorbita dal vento, perché l'efficienza del mini eolico è dell'ordine della metà rispetto al grande eolico.



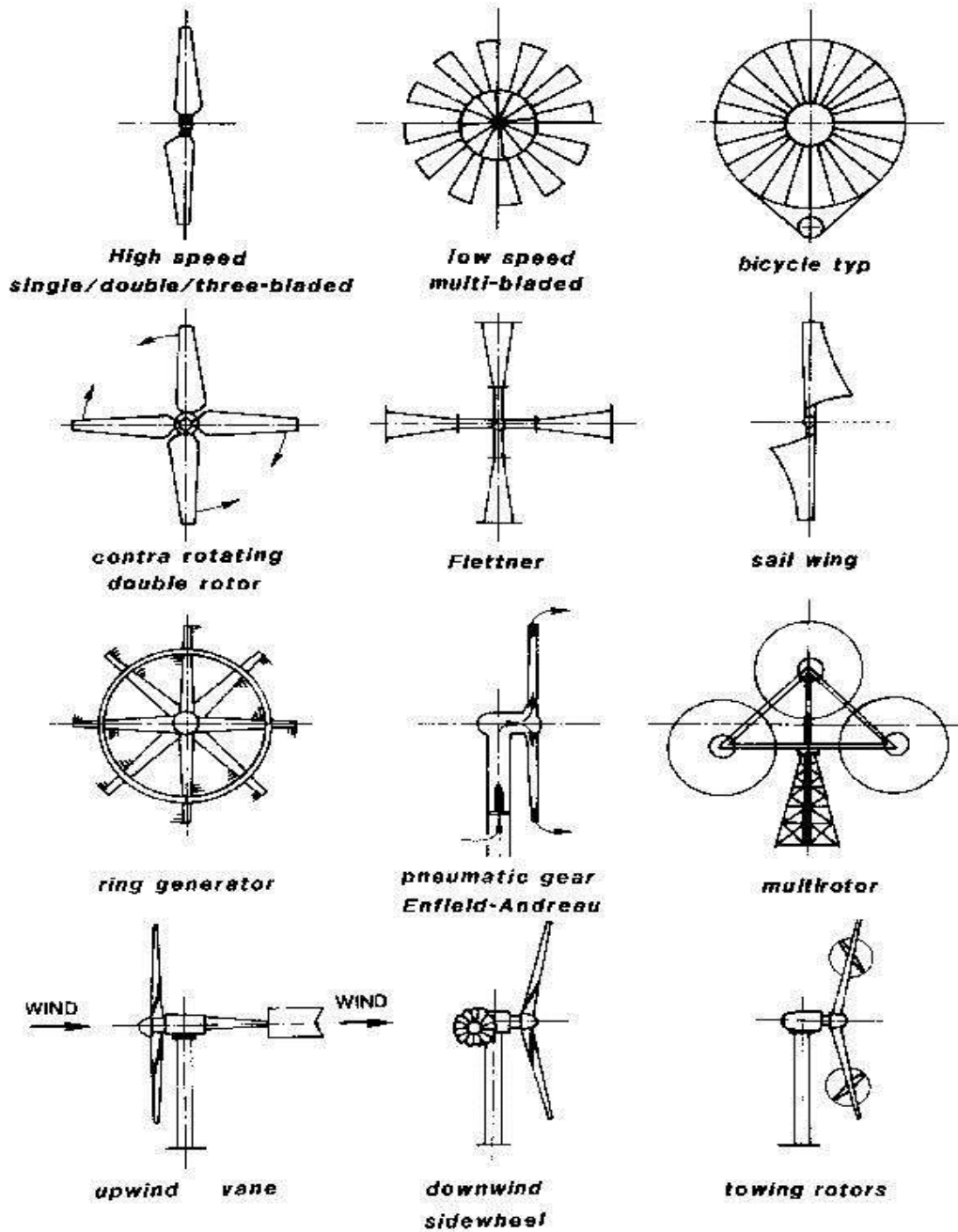
VERTICAL AXIS LIFT FORCES



CONCENTRATING DEVICES



HORIZONTAL AXIS LIFT FORCES



Sono a vostra disposizione per domande e chiarimenti.

Ing. Aldo Cattano
 Consulente tecnico
 Email: aldocatt@yahoo.com
 Web-site: www.libellula8.com
 Via Terranera 10
 22020 Bizzarone (COMO)