



## La costruzione degli yacht da competizione in compositi avanzati

Sebastiano Rech Morassutti - Fernando Borges de Sena

Trimarine Advanced Marine Projects

### Introduzione

Trimarine, società di Project Management, nasce nel 1995 con l'obiettivo di sviluppare soluzioni ottimizzate per impieghi marini. Specializzata nell'utilizzo dei materiali compositi avanzati si occupa di costruzione, ingegneria di processo, progettazione e allestimento di yacht a elevate prestazioni.

Con una sede in Italia, a Belluno, e una in Inghilterra, all'Isola di Wight, Trimarine fornisce da oltre 13 anni consulenze globali specialistiche a progettisti, cantieri e armatori.

La grande esperienza nella costruzione di strutture in compositi avanzati, nel loro assemblaggio e allestimento le hanno dato la possibilità di realizzare 8 yacht di Classe Coppa America per quattro differenti campagne: Il Moro di Venezia, Mascalzone Latino, +39 Challenge e Desafio ESP-97.

Anche il VOR70 'Telefonica Blue' - che ha corso la Volvo Ocean Race 2008-09 - è stato realizzato con la supervisione della Trimarine.

Trimarine si è spesso occupata della progettazione e costruzione di cantieri, in particolare della preparazione del layout e delle specifiche di attrezzature specialistiche come, ad esempio, i forni di polimerizzazione e i loro sistemi di controllo.

### Vincoli produttivi dei Compositi Avanzati per impieghi marini

Le strutture in composito per impiego marino, in particolare gli Scafi e le Coperte, sono forse tra i più grandi manufatti in composito che vengono realizzati in un pezzo unico. Trimarine è stata coinvolta nella costruzione di scafi di oltre 60m di lunghezza, ma negli

anni scorsi sono stati realizzati scafi di oltre 70 m di lunghezza, quali i cacciamine. Solamente in questi ultimi anni le grandi pale dei generatori eolici e alcuni componenti aeronautici hanno raggiunto dimensioni di questo genere.

Come si può immaginare la dimensioni dei manufatti giocano spesso un ruolo importante nella definizione del tipo di tecnologia e di processo costruttivo utilizzabile per la loro costruzione.



In passato le scelte portavano spesso all'impiego di tecnologie relativamente semplici quali la laminazione "umida" con impregnazione a macchina o manuale e la polimerizzazione sottovuoto a temperatura ambiente seguita da una post-cura a temperatura più elevata.

Lo sviluppo dei sistemi di preimpregnati a bassa temperatura (cura a 70-85°C), iniziato una ventina di anni fa, ha radicalmente cambiato i metodi costruttivi.

L'impiego di questi materiali ha portato a un miglioramento delle proprietà meccaniche delle strutture e a una maggiore uniformità e affidabilità dei risultati, riducendo di molto le variabilità di prodotto legate all'impregnazione manuale.

Molto instabili ai loro albori, i nuovi prepreg marini a bassa temperatura sono migliorati costantemente, trasformandosi in prodotti industriali che offrono oggi un'ampia varietà di stili e la possibilità di scegliere fra svariate temperature di polimerizzazione; anche la finestra temporale di lavorabilità è ora del tutto simile a quella dei materiali per impiego aeronautico.

Un fattore molto importante nella produzione di strutture di così grandi dimensioni sono le condizioni ambientali della zona di lavoro.

Stampi di così grandi dimensioni richiedono unità di produzione molto ampie, dove i problemi di temperatura, umidità e controllo delle contaminazioni sono notevoli.

Ogni manufatto in composito realizzato impiegando resine termoindurenti necessita di un accurato controllo delle reazioni di polimerizzazione, per cui è molto importante non solo che le condizioni dell'ambiente in cui si produce non vadano a incidere negativamente, ma anche che possano essere controllate per creare la migliore situazione possibile.

Quando anche non si faccia uso di preimpregnati e si utilizzino processi d'impregnazione "umidi" o d'infusione, una postcura a temperatura elevata è necessaria per ottenere le migliori caratteristiche meccaniche dei polimeri. Si può impiegare un apposito forno di postcura oppure si può attrezzare una zona opportunamente isolata del cantiere.

Nel caso di costruzioni di elevate dimensioni che vengano realizzate in uno o due esemplari all'anno può essere più economico impiegare un isolamento rimovibile che quasi avvolga il manufatto riducendo così il volume di aria da riscaldare.

Con un sistema del genere è possibile raggiungere temperature di postcura attorno ai 60-70°C.



## **MATERIALI**

### **Prepreg di carbonio - Fibre secche (Infusione e impregnazione a umido)**

Nelle odierne costruzioni marine "High-tech" la scelta dei materiali strutturali è essenzialmente orientata verso l'impiego di preimpregnati a bassa temperatura, a cui si possono associare tecniche di infusione per la produzione di alcune parti speciali. L'uso di fibre secche impregnate manualmente è limitato essenzialmente a giunzioni secondarie e parti non strutturali.

Negli ultimi anni si è vista una diminuzione dell'uso delle fibre di vetro e aramidiche e i più recenti ACC Yachts, VOR70, TP-52, Open 60 sono essenzialmente costruiti in prepreg di carbonio con anime in nido d'ape e in espanso in diverse tipologie e densità.

Inoltre va registrato anche un aumento delle produzioni che impiegano tecniche d'infusione con fibre di carbonio ed espansi.

L'infusione, processo inizialmente sviluppato per sostituire l'impregnazione manuale di grande serie poiché garantisce maggiore sicurezza e pulizia sul lavoro, potrebbe oggi avere nuovi sbocchi produttivi tecnologicamente avanzati, arrivando, in certi specifici casi, a essere competitivo anche nei confronti di sistemi a base di preimpregnati.

### **Preimpregnati epossidici a bassa temperatura (cura a: 70° - 85°C)**

Il mercato offre oggi una grande scelta di prepreg a bassa temperatura utilizzabili per la produzione di manufatti di alte prestazioni e tra i diversi produttori si possono trovare i materiali più adatti a qualunque genere di scelta strutturale.

### **Espansi SAN (Styrene Acrylonitrile) per anima sandwich**

Da una decina d'anni gli espansi SAN sono diventati la scelta ideale di anima termoplastica da usare nelle costruzioni che fanno uso di preimpregnati.

Questo tipo di espanso è in costante evoluzione e attualmente esiste in densità e tipologie in grado di coprire qualsiasi esigenza.

L'espanso SAN può essere termoformato a temperature relativamente basse e offre quindi opportunità di sviluppare tecniche costruttive con le quali ottenere ottimi risultati.

### **Nido d'ape: Alluminio, Nomex<sup>®</sup>, Kevlar<sup>®</sup>**

I nidi d'ape (honeycomb) sono materiali utilizzati da molti anni come anima di strutture a sandwich di tipo avanzato.

Il nido d'ape d'alluminio ha eccellenti proprietà meccaniche, ma è poco resistente alla corrosione. Sono disponibili sul mercato nidi d'ape PAA (Phosphoric Acid Anodised) e rivestiti di epoxy che offrono eccellente resistenza alla corrosione, a scapito però di un costo decisamente più elevato.

Il nido d'ape in carta di Nomex<sup>®</sup> è certamente quello più utilizzato, anche se talvolta viene oggi impiegato nido d'ape aramidico (Kevlar<sup>®</sup>) come nel caso degli ACC Yacht e VOR70. Offre ottimi risultati, ma è difficile da piegare.

### **Fibre di Carbonio**

La maggior parte dei tipi di carbonio utilizzati nelle costruzioni in composito avanzate per impieghi marini rientrano nelle seguenti categorie:

- High Strength (HS): fibre di Modulo inferiore a 265 GPa utilizzate per scafi, coperte e strutture interne;
- Intermediate Modulus (IM): fibre di Modulo compreso tra 265 e 320 GPa per irrigidimenti specifici, quando permesso, e per la costruzione di alberi;
- High Modulus (HM): fibre di Modulo compreso tra 320 e 440 GPa, il cui uso è limitato alla costruzione di alberi e di strutture particolarmente rigide quali le traverse di alcuni catamarani.

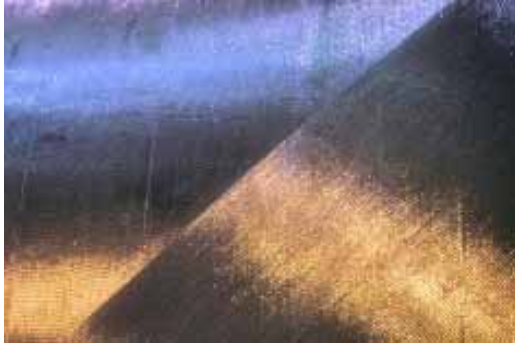
Le fibre commerciali con Modulo di 240GPa o minore sono divenute abba-stanza popolari per la costruzione di strutture meno critiche, soprattutto per ragioni economiche e, recentemente, per la scarsità di produzione di carbonio che ha portato a un aumento dei prezzi delle fibre a Modulo più elevato.

### **Tessuti e Unidirezionali - Grammature**

La maggior parte del carbonio utilizzato nella costruzione di strutture per impiego marino è l'unidirezionale non tessuto, in nastri di larghezze comprese fra 100 e 500 mm, con grammature tra 150 e 400 g/m<sup>2</sup>.

Grammature inferiori sono utilizzate solo per impieghi specifici in quanto più costosi, dato che richiedono filati molto più fini per potere realizzare un prodotto uniforme.

I tessuti vengono generalmente utilizzati in grammature attorno ai 200-300 g/m<sup>2</sup>; tessuti da 600 g/m<sup>2</sup> o più si utilizzano per la produzione di stampi.



Biassiali e multiassiali cuciti sono disponibili e utilizzati in grammature tra 400 e 800-900 g/m<sup>2</sup>; i prodotti più leggeri si usano per laminazioni secondarie di giunzione o per la produzione di elementi dalle geometrie particolarmente complesse, mentre quelli più pesanti si impiegano generalmente per stratificare stampi o zone strutturali di laminato pieno.

### **Distaccanti**

Gli agenti distaccanti e la loro applicazione rappresentano tuttora un'area nella quale si accavallano le opinioni più diverse. In tali casi il miglior consiglio è che se si conosce bene e ci si sente sicuri di un materiale che usa da tempo, la scelta ottimale è di continuare per la stessa strada.

In genere un ciclo semipermanente formulato per l'uso su compositi curati ad alta temperatura rappresenta la soluzione migliore.

La preparazione e il ciclo di sigillatura superficiale sono fattori assolutamente critici; poiché in genere questi prodotti sono basati su tecnologie polimeriche si raccomanda di eseguire un ciclo intermedio di cura tra le mani di sigillatura e quelle di agente distaccante in maniera che si crei correttamente quel film polimerico che garantirà il distacco.

La quantità ideale di mani da applicare va definita in base alle istruzioni del produttore, ma soprattutto dopo una serie di prove pratiche per trovare il giusto compromesso che eviti distacchi prematuri (pre-release) dei laminati nel corso del processo produttivo.

Al momento di scegliere sarà bene optare per un prodotto che non lasci tracce sul manufatto dopo la sua sformatura, o almeno che non crei problemi con i cicli di finitura e verniciatura.

### **Materiali del Vuoto e accessori**

Nella nautica si impiega la gran parte dei materiali accessori normalmente utilizzati nella produzione di compositi aeronautici; la scelta del tipo dipende essenzialmente dalle temperature dei cicli di cura previsti.

Vi sono materiali più economici che possono essere utilizzati nelle lavorazioni a più basse temperature, quali i cicli di compattazione intermedi (debulking) o le laminazioni manuali polimerizzate a temperatura ambiente.

Alcuni di questi materiali più economici possono essere utilizzati anche per processi d'infusione, anche se talvolta i sacchi del vuoto di basso costo sono porosi e obbligano a realizzare un sacco doppio.

Nel processo d'infusione l'integrità del sacco del vuoto è assolutamente critica, ancor di più che nelle laminazioni con preimpregnati o in quelle "umide" sottovuoto; la scelta di un film di alta qualità è quindi importantissima.



## TECNICHE PRODUTTIVE

### Processi di cura in Forno

Gli attuali processi costruttivi che impiegano preimpregnati richiedono una cura sottovuoto in forno a temperature comprese tra 70° e 85°C.

La distribuzione della temperatura è molto critica e una differenza massima  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  dovrebbe essere garantita in tutti i punti di controllo; di preferenza utilizziamo un sistema di controllo computerizzato del ciclo di cura che abbiamo sviluppato negli anni passati e che permette non solo di monitorare il profilo di temperatura del componente, ma anche di regolare di conseguenza riscaldamento e flusso d'aria.

Data la notevole massa di manufatti e stampi non è così semplice riscaldare uniformemente il componente seguendo la curva di temperatura richiesta dal sistema polimerico impiegato e non è certo sufficiente osservare un paio di termocoppie. È molto importante avere una notevole riserva di potenza riscaldante e di circolazione d'aria per assicurare un'ottima distribuzione del calore soprattutto nel corso della rampa di salita iniziale, della stasi e della successiva risalita alla temperatura di cura richiesta dal materiale.

I processi d'infusione più avanzati richiedono una postcura a temperature di almeno 50°C; questo genere di processo è meno complesso di quello utilizzato per la cura dei preimpregnati e può essere effettuato anche con un semplice forno a controllo termostatico.

### Assemblaggi e laminazioni secondarie

Gli assemblaggi e le laminazioni secondarie d'incollaggio (giunzione scafo-coperta, paratie, longitudinali, bagli, ecc.) rappresentano fasi di lavoro ineliminabili del processo costruttivo e spesso vengono eseguite manualmente, talvolta senza nemmeno una consolidazione sottovuoto. Data la natura della maggior parte delle costruzioni più sofisticate si vorrebbe eliminare una lavorazione poco desiderabile come è l'impregnazione manuale. La tendenza è quella di progettare giunzioni in cui le parti possano essere semplicemente incollate tra loro, senza bisogno di stratificazioni secondarie di rinforzo, limitando le stratificazioni aggiuntive solo a quelle aree particolarmente critiche dal punto di vista strutturale. In questi casi sistemi locali mobili di riscaldamento possono essere utilizzati, come ad esempio piccoli forni realizzati in loco o termocoperte.

Da questo punto di vista la produzione in serie ha il netto vantaggio di avere componenti da realizzare in quantità sufficienti da giustificare i maggiori costi di progettazione legati all'aumento del numero degli assemblaggi incollati, evitando così di ricorrere alla laminazione manuale a umido.

### Competenze

La costruzione in compositi avanzati richiede una forza lavoro attenta e capace.

Generalmente si opera con squadre di 20-30 persone che abbiano esperienza di lavorazione con pre-preg; di questi, almeno la metà è generalmente composta da carpentieri navali. Ciò è di fondamentale importanza in quanto nella costruzione di prototipi vi sono molti lavori di adattamento e assemblaggio che richiedono una competenza specifica.

L'introduzione di frese 3D per la realizzazione di stampi, e il taglio a laser o a getto d'acqua per la produzione delle sezioni di modelli e stampi hanno significativamente ridotto la necessità d'impiegare carpentieri e falegnami. Ciononostante la manualità e la capacità del personale che lavora alla costruzione di uno yacht - dalle prime fasi d'impostazione dei modelli, fino alle finiture - non potranno mai essere completamente sostituite.

Nella costruzione in serie di barche l'approccio produttivo ripetitivo offre diverse soluzioni, ed è possibile utilizzare in maggiore quantità personale senza esperienza, che viene addestrato abbastanza velocemente a eseguire un lavoro ripetitivo a patto che esista una procedura di lavoro. Personale di questo genere può, tra l'altro, essere parzialmente sostituito con elementi nuovi senza creare troppi problemi.

Il processo costruttivo in serie prevede inoltre una maggiore suddivisione delle lavorazioni e,

di conseguenza, minore è la necessità che il personale abbia una visione e una conoscenza completa del prodotto.

### Attrezzature di Cantiere

I cantieri specializzati nella costruzione in compositi avanzati per impiego marino hanno bisogno di attrezzature flessibili che siano in grado di adattarsi facilmente alle differenti dimensioni degli scafi da realizzare.

Le attrezzature per il sollevamento e la movimentazione devono essere progettate allo scopo di ridurre i tempi spesi in tali operazioni; particolarmente utili sono i carri ponte attrezzati con sistemi di fasce scorrevoli da utilizzare per la rotazione dei componenti di maggiori dimensioni.



Le zone di laminazione devono essere dotate di impianti di climatizzazione con sistemi d'aria condizionata e riscaldamento in maniera da avere delle condizioni di temperatura stabili e un controllo dell'umidità relativa.

Un sistema di estrazione polveri centralizzato rappresenta un ottimo investimento per minimizzare i tempi spesi nella pulizia della zona di lavoro e per asportare, fin dal primo momento, polveri e particelle formatesi nelle fasi di taglio e carteggiatura.

I sistemi di aria compressa e di vuoto possono essere centralizzati, ma va ricordato che una serie di pompe del vuoto portatili su ruote è sempre necessaria e utile.

Un forno di grandi dimensioni per la cura di scafi e coperte è necessario, ma sono importanti anche uno o più forni di piccole dimensioni per la produzione di parti strutturali.

Anche una pressa riscaldata può essere utile per sveltire la produzione di pannelli piani.

Una tavola del vuoto riscaldata rappresenta un elemento fondamentale per la produzione di pannelli piani, paratie e divisioni interne. Ovviamente le sue dimensioni dipendono dalle esigenze del cantiere, ma tavoli tra 4x6 e 6x12m sono utilissimi. Per quanto riguarda il sistema di riscaldamento è possibile utilizzare differenti soluzioni, dai piani di alluminio o carbonio riscaldati elettricamente, ai tavoli sopra ai quali viene posato un piccolo forno ad aria calda, fino a tavoli posizionati all'interno del forno principale del cantiere. Una cosa è certa, non si tratta mai di attrezzature reperibili tra la normale produzione; occorre costruirle appositamente.

### Tempistiche

La maggior parte dei progetti di costruzione di prototipi da competizione ha un periodo di

costruzione compreso fra i 5 e i 9 mesi a secondo della dimensione, del tipo e della complessità del progetto. Scafi da crociera a elevate prestazioni, di lunghezza attorno ai 20-25m, generalmente si producono in circa 18 mesi, ma oltre la metà di questo tempo è dedicato all'allestimento degli interni e all'installazione dei sistemi.

C'è una differenza enorme tra questo modo di lavorare e l'approccio con cui ci si deve accostare alla produzione nautica di serie, dove il tempo complessivo di costruzione e il numero delle ore sono infinitamente minori.

Volendo trasferire alla produzione di serie metodi e tecnologie utilizzate nelle costruzioni in compositi avanzati, è fondamentale ridefinire l'ingegneria del processo in maniera da adattarla al meglio a un'economia produttiva. Questo lavoro è molto importante per ottimizzare i tempi, anche se va detto che già il solo fatto di passare dal prototipo alla sua copia porta a una riduzione dei tempi di costruzione che può arrivare al 40%.

### Rapporto Tempi - Costi

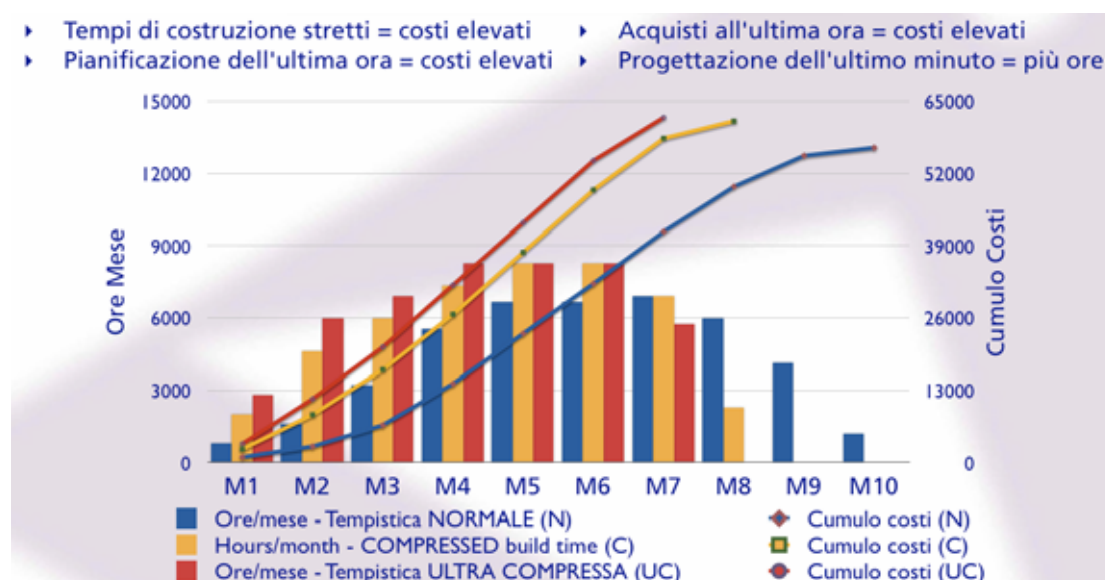
Costruire un prototipo con i più avanzati materiali e tecnologie rappresenta, fin dal primo momento, una corsa contro il tempo.

Una tra le prime cose che viene generalmente fissata nel contratto è la data di consegna, e, nel caso di uno scafo da competizione, si deve ricordare che ben difficilmente la data di partenza di una regata verrà mai spostata perché uno dei partecipanti è in ritardo sui tempi di costruzione.

Per costruire uno scafo da corsa è essenziale, quindi, stare nei tempi.

Ricordare sempre che tempi di costruzione stretti equivalgono a costi più elevati; a ciò si può aggiungere che:

- le pianificazioni dell'ultimo minuto aumentano i costi;
- le ordinazioni fatte all'ultimo minuto aumentano i costi;
- la progettazione dell'ultimo minuto causa perdite di tempo, porta a ripianificare i lavori e inevitabilmente a più ore; in sintesi maggiori costi.



L'ingegno dei costruttori per risparmiare tempo può talvolta portare a soluzioni tecniche valide, ma va ricordato che la maggior parte delle volte tagliare le fasi di un processo che già è ai suoi limiti può causare seri problemi, e anche arrivare al punto di mettere a rischio l'intera campagna.



Queste problematiche non devono esistere nella costruzione in serie di barche, dove le specifiche di processo devono lasciare pochissimo spazio alla fantasia degli operatori e dove i programmi di lavoro devono essere strettamente rispettati sia per motivi economici, che di competitività.

## **PROCESSI COSTRUTTIVI**

### **Sottovuoto-Autoclave**

I componenti maggiormente sollecitati dal punto di vista strutturale quali alberi, boma, tangoni e appendici (assi del timone, derive mobili, foiler) vengono oggi realizzati prevalentemente in autoclave in quanto si ottengono caratteristiche meccaniche più elevate, soprattutto in laminati solidi non a sandwich.

Per la costruzione di scafi e coperta si è sfortunatamente limitati alla pressione del vuoto non solo a causa dei costi e della mancanza di autoclavi di così grandi dimensioni, ma anche perché molti Regolamenti di Classe vietano le lavorazioni a pressioni superiori a quelle del vuoto.

### **Vuoti di Compattazione (Debulking)**

Il processo di lavorazione ottimale con preimpregnati deve prevedere una compattazione a ogni strato, soprattutto lavorando con fibre unidirezionali.

Quando si utilizzano unidirezionali di carbonio di grammature da 200 g/m<sup>2</sup> e oltre, la permeabilità del film è molto bassa - se non totalmente impermeabile - con il risultato di impedire l'uscita dell'aria che rimane intrappolata tra gli strati al momento delle loro posa, quando questi siano più di uno.

Un "de-bulk" a caldo migliora la compattazione degli strati e facilita l'eliminazione dell'aria, ma è una procedura rischiosa in quanto limita il controllo visivo; inoltre spesso questo riscaldamento, pur non raggiungendo temperature particolarmente elevate, può portare, in alcuni sistemi di prepreg a bassa temperatura, alla modificazione delle caratteristiche di fluidità della resina al momento della polimerizzazione o a una riduzione dei tempi di lavorabilità.

L'impiego di rulli con apposite punte permette di creare delle piccole perforazioni negli strati per migliorare l'uscita dell'aria una volta sottovuoto, ma non si tratta di una pratica ideale in quanto c'è il rischio di danneggiare le fibre.

Come detto sopra è importante compattare ogni strato di unidirezionale non tessuto; nel caso dei tessuti e dei multiassiali cuciti, data la loro maggiore porosità, è possibile stendere anche due o tre strati prima di dovere effettuare un ciclo di compattazione.

Questa operazione rappresenta uno dei fattori fondamentali per garantire laminazioni con preimpregnati di qualità elevata; purtroppo comporta alti costi in termini di tempo, ma si tratta di una fase assolutamente critica, soprattutto nelle lavorazioni in cui ci si deve affidare alla sola pressione del vuoto.

Negli ultimi tempi è comparsa sul mercato una serie una o vari? di materiali appositamente studiati per evitare l'intrappolamento di aria tra gli strati; alternando strati di fibre secche a strati di resina in film i produttori hanno sviluppato dei materiali che eliminano, o comunque limitano di molto, le fasi di compattazione. Si tratta di materiali adatti alla produzione di serie, più facili e più economici da utilizzare.

### **Accesso alle superfici di lavoro**

Un buon accesso alla superficie su cui si deve lavorare rappresenta un fattore importante per operare velocemente e con efficienza, soprattutto quando si tratta di scafi e strutture di grandi dimensioni.

Molte sono le soluzioni adottabili, ma va ricordato che i sistemi migliori sono quelli che possono essere rapidamente posizionati, regolati e spostati, in maniera da ridurre al minimo i tempi morti.



Una pratica soluzione è quella di adattare una serie di elevatori manuali - meccanici o idraulici - in modo da montarvi, in maniera articolata, delle piattaforme di alluminio, leggere da spostare e adattabili a ogni forma e dimensione.

Per la sicurezza e per stabilizzare il sistema è importante zavorrare la base degli elevatori, soprattutto quando le piattaforme vengono alzate ad altezze di 2 o più metri.

### Costruzione di modelli e stampi

Per la costruzione dei modelli e degli stampi la tendenza odierna è quella di sostituire i classici metodi manuali di carpenteria lasciando sempre più spazio alle lavorazioni meccaniche con frese a vari assi. Fra la produzione di prototipi di alta tecnologia e quella di scafi di serie la filosofia costruttiva delle attrezzature è molto simile; le differenze sono essenzialmente legate ad alcune specifiche considerazioni quali costi, tempistiche di lavoro e precisione delle geometrie.

La quantità di unità che verranno prodotte in serie giustifica ovviamente la costruzione di stampi femmina robusti e adatti a numero di cicli di stampaggio-sformatura, mentre nelle caso dei prototipi da competizione spesso si opta per la costruzione di un modello maschio (interno) su cui viene realizzato il manufatto.

Talvolta si utilizzano stampi femmina anche per la costruzione di prototipi, soprattutto quando vi sono laminazioni che prevedono l'uso di anime a spessori differenziati e quando sia richiesta una perfetta finitura superficiale. Scelte di questo genere sono spesso utilizzate nella costruzione degli yacht di Coppa America o dei VOR70 (Volvo Ocean race 70'). Ovviamente l'utilizzo di stampi femmina è ancor più vantaggioso se è prevista la realizzazione di due scafi identici.

Per la costruzione di questo genere di attrezzature si utilizzano di preferenza preimpregnati di carbonio, in modo da avere laminati con coefficienti di espansione termica molto simili a quelli del manufatto che vi si andrà a realizzare.

Tre considerazioni importanti vanno fatte quando si progettano stampi:

- la superficie dello stampo deve essere assolutamente non porosa per evitare perdite di vuoto;
- lo stampo deve essere leggero per diminuire la sua massa termica; in genere si usano spessori compresi tra 6 e 10mm;

- lo stampo deve avere una struttura di supporto che gli consenta di “galleggiare” sulla struttura stessa; le giunzioni tra laminato e struttura di supporto devono essere flessibili per evitare deformazioni locali causate dai differenti coefficienti di espansione termica dei materiali.

In commercio vi sono preimpregnati appositamente sviluppati per la costruzione di stampi; materiali che possono essere polimerizzati inizialmente a bassa temperatura (attorno ai 60-65°C) per poi essere sottoposti a successivi cicli di postcura in maniera da raggiungere le necessarie proprietà meccaniche. Stampi in carbonio per lavorazione con prepreg possono essere realizzati anche per laminazione a umido o per infusione, ma i prepreg da stampi offrono una grande praticità d'uso garantiscono impregnazioni uniformi eliminando rischi di porosità.

### Caratteristiche dei Forni

Il sistema di controllo di un forno per lavorazioni in composito deve dare all'operatore una visione completa del processo in tempo reale; inoltre deve avere un sistema automatico che controlli e regoli il riscaldamento in base alla selezione di determinati valori.

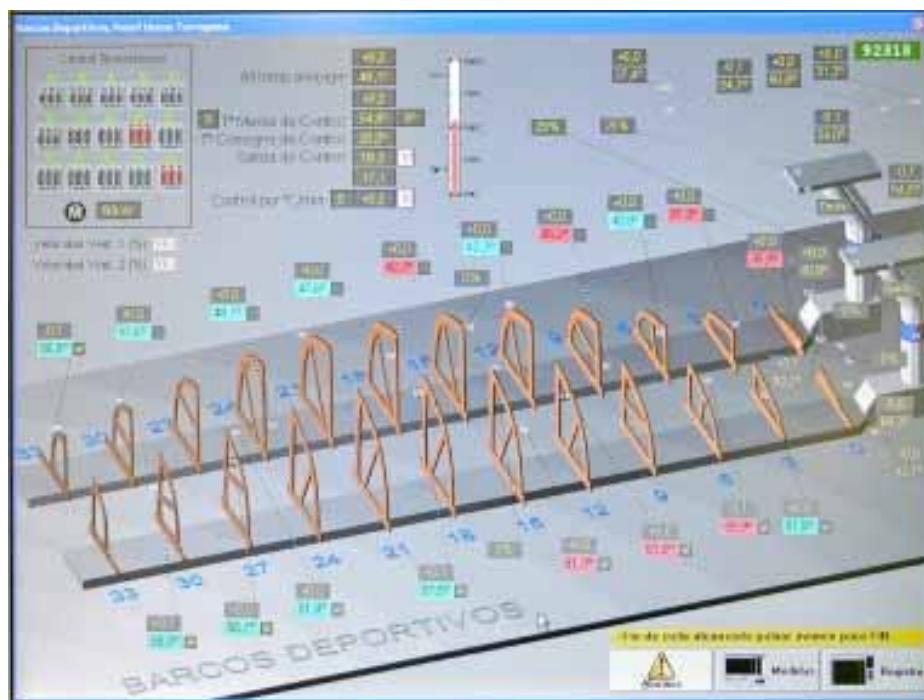
Una sufficiente quantità di termocoppie deve perciò essere usata per tenere sotto controllo ogni zona dello stampo; particolare attenzione deve essere posta nel posizionare le sonde - sotto, sopra e all'interno dell'attrezzatura – in modo tale che l'operatore abbia la possibilità di controllare che il flusso d'aria garantisca la corretta distribuzione delle temperature richieste dal ciclo di cura.

Per avere uniformità di temperatura è molto importante che il flusso d'aria calda all'interno del forno sia turbolento in maniera da evitare che si formino “spot” caldi o freddi. Poiché le geometrie delle strutture che si pongono nel forno sono spesso molto differenti tra loro è fondamentale eseguire delle prove per verificare la corretta distribuzione del calore.



Uno dei fattori che influenza la distribuzione della temperatura durante il processo di polimerizzazione è la notevole massa degli stampi; questi infatti assorbono calore e causano locali variazioni della curva di riscaldamento. Variazioni di questo genere possono rallentare la salita in temperatura del laminato che, nei casi più gravi, può tradursi in una perdita di caratteristiche meccaniche finali dovute al fatto che la resina non raggiunge la corretta fluidità al momento opportuno.

I cicli di cura dei più comuni sistemi di prepreg a bassa temperatura richiedono una curva di salita compresa tra 0.5 e 1°C al minuto, seguita da una stasi a media temperatura e da una successiva salita alla temperatura di polimerizzazione. Con valori di questa entità è ovvio che la potenza riscaldante necessaria è strettamente legata alla massa di stampi e attrezzature. In genere per un forno di 25-30m che abbia un volume interno attorno ai 1300 m<sup>3</sup> si può ipotizzare una potenza di 450-500 Kw; dando per scontato che vi sia un sufficiente flusso d'aria all'interno del forno questa potenza sarà necessaria solamente durante la salita iniziale della temperatura. Per mantenere poi i valori a 85-90°C saranno sufficienti 190-250 Kw.



Uno scarso flusso d'aria rallenta il trasferimento della temperatura al manufatto; il tutto, come detto, può essere poi ulteriormente influenzato dalla massa dello stampo e, in certi casi, è impossibile anche rispettare una rampa di salita di 0.5°C al minuto. Il risultato è che certe zone di laminato raggiungeranno la temperatura di stasi (diciamo 70°C) prima di altre col risultato finale di avere tempi diversi di stasi per zone diverse di laminato; tempi che talvolta possono essere troppo corti. Facile quindi comprendere che se non viene lasciato sufficientemente tempo alla resina fluida di scorrere all'interno del laminato ci saranno significative variazioni nella percentuale di vuoti e nel rapporto fibra/resina tra le varie zone del manufatto.

### Termoformatura dell'anima

Per ottenere una struttura in composito di elevate caratteristiche andrebbe eliminato ogni peso parassita, in pratica ogni elemento che non contribuisce direttamente a migliorare le proprietà finali del prodotto. Un esempio tipico è quello della resina che si accumula all'interno dell'anima di un sandwich, nelle perforazioni, nelle rigature e nelle giunzioni tra i vari pezzi dove è necessario tagliare le lastre per adattarle alle forme dello scafo.

Le lastre quadrettate o l'accoppiata di lastre più sottili sono metodi che permettono di adattarsi alle geometrie curve di uno scafo, ma che portano anche a un notevole aumento della resina impiegata che deve andare a riempire ogni fessura e spazio libero; a ciò si aggiunga anche il fatto che possono rimanere zone di vuoto. Piegare lastre di espanso è peraltro molto difficile, soprattutto in spessori di 25mm o più.

Il sistema ideale è la termoformatura sottovuoto delle lastre che elimina la necessità di un gran numero di tagli. Scaldando i pannelli di espanso alla corretta temperatura è possibile preformarli utilizzando gli stampi di produzione, i modelli o degli appositi stampi di piegatura. Per il riscaldamento delle lastre si possono utilizzare coperte termiche elettriche, piccoli forni

ad aria calda o anche sistemi di lampade a infrarossi posizionate sopra alle attrezzature di formatura. Tipi e metodi dipendono essenzialmente dalle dimensioni e specificità del cantiere.

Questa tecnica è stata usata con successo per infondere, in un'unica fase, scafi di 10-15 m per i quali le lastre di espanso erano state tutte preformate e giuntate tra di loro in modo da formare un guscio completo di espanso; una serie di fori di 1.5 mm posti a 30-50 mm di distanza tra loro garantiva il passaggio dell'aria.

Per una produzione di serie sarebbe relativamente economico organizzarsi per termoformare in anticipo una serie di gusci (o di semigusci) che, al momento opportuno, vengono inseriti con precisione sulla pelle stesa nello stampo; si otterrebbe così il doppio risultato di ridurre le quantità di resina necessarie e di completare in poche ore un'attività che normalmente richiede più giorni di lavoro.

### Taglio e cura delle lastre di PVC

Quando si tagliano i fogli di PVC espanso alle dimensioni desiderate nuove celle di espanso vengono esposte all'aria; queste celle potrebbero contenere tracce dei prodotti chimici utilizzati nel processo di fabbricazione del materiale. E' importante effettuare un ciclo di postcura dei vari pezzi prima di incollarli in maniera da scongiurare eventuali possibili fenomeni di successivo "degassing" o di eventuali inibizioni chimiche delle resine utilizzate. Un ciclo di 24-36 ore a temperature mediamente elevate è generalmente sufficiente.

### Kit di anime pretagliate

Nella produzione di serie è buona norma acquistare o preparare dei kit pretagliati delle anime che si andranno a utilizzare. Questa operazione non è assolutamente vantaggiosa quando si costruisce un prototipo, ma è economicamente validissima per una produzione ripetitiva.

### Anime in nido d'ape e umidità

Un problema specifico da tenere ben presente quando si lavora con anime in nido d'ape di Nomex è l'umidità. La carta di cui è fatto il nido d'ape, soprattutto quella di Nomex<sup>®</sup>, è un materiale igroscopico che assorbe una significativa quantità d'acqua dall'umidità contenuta nell'atmosfera. Questa umidità, nel momento in cui si andrà a riscaldare il materiale in forno (durante le fasi di laminazione) verrà rilasciata sotto forma di vapore. Questo fenomeno può distaccare la pelle in preimpregnato che vi si lamina sopra, pelle che viene spinta verso l'alto dalla pressione del vapore acqueo che si espande. Essiccare il Nomex<sup>®</sup> prima di utilizzarlo è ovviamente la soluzione da adottare, ma sfortunatamente, data la grande superficie di materiale esposto all'aria, l'umidità atmosferica viene riassorbita in meno di 24 ore.

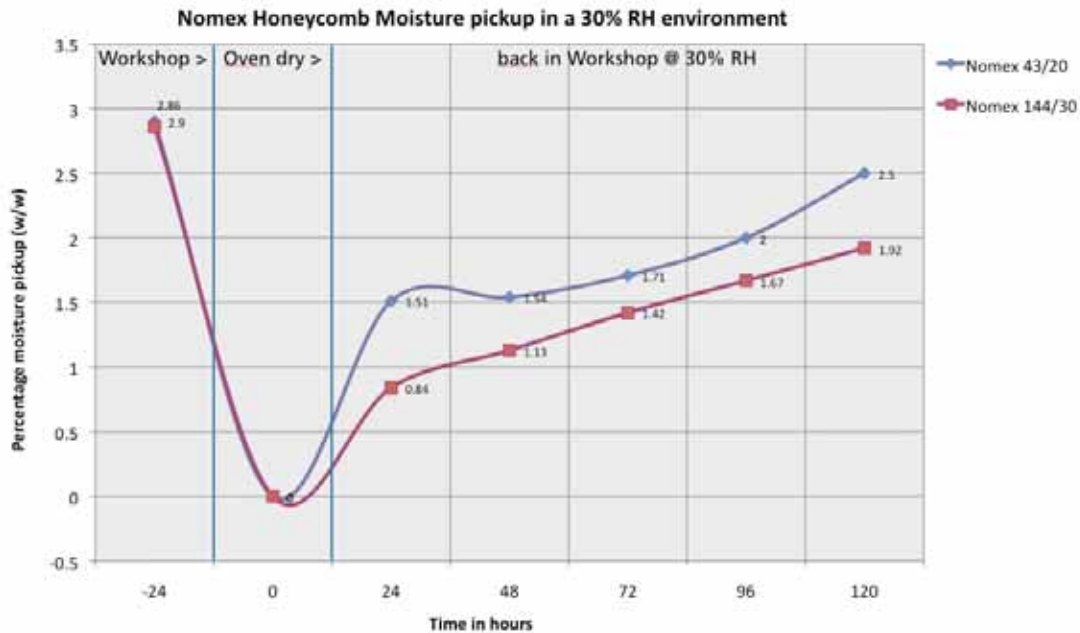
Ciò significa che il nido d'ape di Nomex<sup>®</sup> deve essere tenuto in un magazzino a umidità controllata e che nella zona di lavoro deve essere mantenuta un'atmosfera molto secca, cosa spesso sconfortevole per il personale che vi lavora.

Quando si faccia uso di prepreg sotto forma di tessuto o multiassiale vi sono buone probabilità che l'aria in pressione contenuta nelle cellette sfugga attraverso il laminato, ma quando si lavora con gli unidirezionali, come si usa oggi nella gran parte delle costruzioni più avanzate, la situazione è davvero critica.

I produttori di preimpregnati raccomandano vari metodi per tentare di risolvere questo problema. Le tecniche utilizzate attualmente negli scafi che impiegano anime di spessori attorno ai 30-35 mm vanno dalla microperforazione della pelle superiore prima che questa venga polimerizzata in forno (per fare ciò si impiegano apposite "pistole ad aghi"), all'applicazione di una pelle adesiva sottile che ha lo scopo di creare un film stagno sull'intera superficie del nido d'ape.

Qualunque sia la tecnica che si decide di usare occorre prestare la massima attenzione a ogni singolo dettaglio, perché anche la minima variazione può portare a seri problemi di delaminazione.





Vista l'attuale tendenza a costruire scafi sempre più grandi utilizzando nido d'ape di Nomex® sempre più spesso, le tecniche di lavorazione dovranno essere senza dubbio riviste non appena si comincerà a lavorare con anime di 40-50 mm di spessore. Per evacuare la quantità di vapore acqueo che si crea in un nido d'ape di così grande spessore nel momento in cui viene riscaldato, sarà necessario sviluppare nuovi sistemi di preimpregnati che si mantengano porosi fino al momento in cui la resina inizia a trasformarsi in gel.

Nella produzione di serie queste problematiche in genere non esistono in quanto l'impiego di prepreg unidirezionali e di nido d'ape di Nomex® è davvero molto limitato.

### Pianificazione e organizzazione del lavoro

L'importanza di un planning dettagliato e realistico è fondamentale nelle costruzioni di one-off per organizzare il lavoro e avere sempre chiare le scadenze e i tempi limite.

Nella produzione di serie avere a disposizione un planning corretto, aggiornato e completo è forse ancora di maggiore importanza in quanto è il solo strumento che permette di tenere sotto controllo, nello stesso momento tempi e costi.

### Assemblaggi e attrezzature d'assemblaggio

Nella costruzione di one-off viene spesa una enorme quantità di ore in operazioni di controllo prima e dopo ogni assemblaggio. E' questo un costo intrinseco nella filosofia stessa della costruzione all'unità; più complesso è poi il Regolamento di Classe e più numerosi questi controlli saranno.

Nella costruzione di serie serve invece una maggiore attenzione alla semplificazione di questi sistemi di controllo e molte risorse vanno impiegate per studiare sistemi di posizionamento allineamento e assemblaggio che siano soprattutto facili da utilizzare; meglio avere un sistema di controllo dell'assemblaggio che sacrifica un po' di precisione, ma che è posizionabile anche da personale inesperto o poco attento, piuttosto di averne uno molto preciso, ma di utilizzo complesso e con cui è facile commettere errori.

### Procedure di lavorazione

Le schede di processo sono documenti molto comuni nella produzione di serie; molto meno facile è invece trovare un cantiere che costruisce prototipi che utilizzi schede di produzione, perché in genere si ritiene tempo sprecato il preparare una mole di materiale che non serve più dato che il componente è unico. La scheda di produzione è fondamentale invece anche

nella costruzione di one-off perché serve a fare arrivare in produzione le informazioni in maniera chiara, semplice e pratica, ma soprattutto serve anche per fare tornare all'ufficio tecnico le informazioni relative alla costruzione del componente.

### **Controllo dei pesi**

Nella progettazione di un "one-off" il controllo dei pesi è fondamentale. Molto spesso la configurazione del bulbo e della pinna di deriva non vengono finalizzati fino a che non è stata realizzata una gran parte della struttura, così da permettere ai progettisti di ottimizzare dislocamento, immersione e posizione del Centro di Gravità. Esistono svariati metodi per tenere sotto controllo i pesi durante la costruzione, ma per garantire un buon risultato prima che sia troppo tardi occorre che ogni elemento che si aggiunge alla struttura venga pesato. Oltre a ciò è bene organizzare, a intervalli regolari, una pesata dell'intero manufatto.

Tutto ciò è più facile a dirsi, che a farsi e richiede una disciplina notevole tra il personale del cantiere. La soluzione probabilmente migliore è di avere, nell'Ufficio Tecnico del cantiere, un responsabile che si occupi di suddividere le richieste al personale operativo e che poi raccolga le informazioni in un unico documento di cui è responsabile. In questo modo si riescono a rendere le persone abbastanza partecipi delle problematiche e ad avere informazioni accurate e precise.

### **Controlli non distruttivi**

I controlli non distruttivi delle strutture in composito rappresentano un sistema diagnostico e di verifica importante per scoprire ed eliminare eventuali difetti fin dal primo momento. Attrezzature portatili quali il Panametrics Epoch IV con B-Scan o l'Epoch-III (Pulse-Echo, A-Scan) Ultrasonic Detectors vengono oggi comunemente utilizzate da ditte specializzate.

Vuoti, delaminazioni, cricche, bolle e porosità possono essere identificate con sistemi ultrasonici, ma si ricordi che per garantire risultati e interpretazioni affidabili l'esperienza "sul campo" dell'operatore è fondamentale.

Si tenga presente anche che per esaminare strutture a sandwich occorre verificare il componente da entrambi i lati e che talvolta potrebbero non venire messi in evidenza dallo strumento strati che, pur scollati, restano comunque in contatto tra di loro.

Esistono anche altri sistemi di controllo quali il Laser Shearography, metodo basato sull'interferometria olografica che utilizza il vuoto o il riscaldamento per stimolare la superficie del componente da esaminare. I difetti vengono messi in evidenza analizzando le disomogeneità dei gradienti di deformazione.

Ogni sistema ha ovviamente i suoi vantaggi e svantaggi nell'utilizzo industriale: costi, tempi necessari e capacità dell'operatore sono alcuni di essi.

Ultimamente si stanno sviluppando sistemi di Termografia che potrebbero risolvere parte dei problemi di cui sopra, mettendo un valido strumento di controllo nelle mani di operatori di esperienza anche non grandissima. Il sistema applica calore alla superficie da esaminare utilizzando un flash allo Xenon, per poi monitorare la dissipazione del calore con l'uso di una termocamera. Una rapida dissipazione di calore metterà in evidenza un buon incollaggio, mentre in presenza di un difetto il calore verrà dissipato più lentamente. Il sistema è completato da un software che permette una semplice acquisizione, visualizzazione e comparazione delle immagini. In futuro il processo potrebbe essere completamente automatizzabile per consentire il controllo di tutte le superfici. Il fatto che questo metodo possa lavorare in automatico e senza contatto diretto con le superfici da esaminare lo rende molto attraente per il controllo di una produzione di serie.

### **Altri metodi di controllo utilizzabili durante e dopo la produzione**

Tra i tanti possibili controlli che possono essere eseguiti nel corso della costruzione per verificare la qualità del lavoro fatto e per confrontare le caratteristiche di progetto con la realtà uno dei migliori è l'analisi del contenuto in vuoti del laminato e la sua percentuale

di fibra/resina.

Per fare ciò si preleva un piccolo campione che, tagliato in sezioni sottili, viene esaminato al microscopio ottico con l'ausilio di un software di analisi superficiale che calcola la quantità di vuoti in relazione alla superficie esaminata.

Controlli di questo genere, se completati anche con una verifica della Tg (temperatura di transizione vetrosa) e con un DSC (Differential Scanner Calorimetr), possono dare una buona indicazione della qualità del composito e del suo stato di polimerizzazione.

### **Regole e altre limitazioni**

I Regolamenti di Classe per la costruzione di yacht da competizione sono generalmente abbastanza restrittivi per quanto concerne metodi e materiali di costruzione.

I maggiori controlli di ogni Regolamento di Classe sono essenzialmente dimensionali allo scopo di mantenere le differenze entro limiti accettabili. I materiali e le tecniche di costruzione sono spesso regolamentati con l'intento di limitare i costi e garantire la sicurezza in mare.

Quando alla fine degli anni '80 fu creata l'America's Cup Class, che prevedeva scafi costruiti in composito, fu deciso di controllare tutta la costruzione, dagli spessori e densità di pelli e anime, al Modulo Elastico delle fibre, fino al processo di consolidazione e cura in forno del manufatto.

Per un neofita alcuni di questi controlli non sono facili da comprendere in quanto strettamente legati a specifiche tecnologie e a complesse ragioni che hanno imposto i valori da rispettare. Poiché limitazioni di questo genere diventano importanti nel momento in cui si devono scegliere le tecnologie di produzione, qualora si volesse mettere in produzione di serie una Classe di scafi si valutino attentamente le tolleranze e le imposizioni regolamentari che possono andare a influenzare il processo di produzione in serie.

### **FATTORI CRITICI**

#### **Pressione del vuoto e porosità del laminato**

La scarsa porosità degli strati di preimpregnato non curato, e la pressione causata dall'espansione del vapore acqueo all'interno delle celle di un nido d'ape di Nomex<sup>®</sup> al momento del riscaldamento, rappresentano certamente i due fattori che maggiormente limitano la qualità delle strutture in compositi avanzati stratificate sottovuoto a temperature elevate.

Anche se questi problemi non vanno a influenzare direttamente la produzione in serie di componenti tecnologicamente avanzati, rischiano, prima o poi, di mettere in dubbio il valore di una tecnologia perché la quantità di risultati imprevedibili tenderà ad aumentare.

#### **Cura di grandi strutture a sandwich senza ausilio di Autoclave**

La stratificazione con l'ausilio del sacco del vuoto rappresenta un processo molto comune per il consolidamento dei laminati in composito.

Rivolgendo indietro lo sguardo di 25 anni ci si può facilmente rendere conto che non si tratta più di uno strano tipo di *alchimia*; oggi è una tecnica affermata comunemente utilizzata con successo nella costruzione di imbarcazioni.

Poiché si vanno sempre più diffondendo le strutture a sandwich che usano anime di vario genere, vi sono alcuni elementi inerenti la stabilità di questi materiali che devono essere migliorati, soprattutto quando si realizzano strutture che richiedono un ciclo di riscaldamento per la polimerizzazione.

Il problema del "degassing" dei PVC è solo un esempio per spiegare quanto importante sia la necessità di avere una gamma completa di materiali stabili, collaudati e garantiti dai produttori, nel momento in cui si pensa di trasferire alla produzione di serie alcune delle tecnologie descritte in precedenza.