



# **UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

## **TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI PROCESSI INDUSTRIALI E DEI MATERIALI**

(Laurea triennale DM 270/04 - Indirizzo Processi Industriali)

### **Studio delle cause dell'insorgenza di difetti estetici ed errori dimensionali nella realizzazione di manufatti in fibra di carbonio**

Relatore: Ing. Alessandra Lorenzetti

Tutor aziendale: Sig. Luca Bernardotto

Laureando: Giovanni Serventi

ANNO ACCADEMICO 2011-2012



# Indice

Indice .....	3
Riassunto .....	5
Introduzione .....	7
Capitolo 1 .....	9
Processo produttivo .....	9
1.1 Ruolo del sacco da vuoto.....	11
1.2 Verifica dimensionale .....	12
Capitolo 2 .....	13
I difetti estetici.....	13
2.1 Difetti estetici recuperabili.....	13
2.1.1 Bolle d'aria.....	14
2.1.2 Accumulo di resina .....	15
2.1.3 Errori nella laminazione.....	18
2.1.4 Commenti.....	19
2.2 Difetti estetici non recuperabili.....	20
2.2.1 Sella .....	20
2.2.2 Maniglia .....	23
2.2.3 Rotolo .....	25
2.2.4 Difetto strutturale .....	27
2.2.5 Commenti .....	27
Conclusioni.....	29
Siti web.....	32
Riferimenti bibliografici.....	32



# Riassunto

In questo lavoro si presentano i risultati ottenuti nel tirocinio effettuato presso l'azienda Compositex srl di Vicenza da Ottobre a Dicembre 2011. L'argomento di analisi è consistito nello studio dell'insorgenza di difetti estetici e di errori dimensionali nella lavorazione dei materiali compositi, in particolar modo di materiali rinforzati con fibra di carbonio. I casi esposti e analizzati derivano dalla particolare produzione del periodo in cui si è svolto il tirocinio, ma i risultati possono avere anche una valenza più generale. Si sono approfonditi gli aspetti che condizionano la resa estetica del prodotto e le possibili modifiche approntabili al processo produttivo atte a ridurre o evitare la ripresentazione di tali difetti nelle produzioni successive. In base ai particolari casi riscontrati, si è deciso di dare particolare rilevanza alla problematica dei difetti estetici, alla quale è dedicato un capitolo intero. Le cause riscontrate hanno in vari casi una radice comune e si è potuto quindi approntare delle modifiche generali che permettessero la risoluzione o la diminuzione dell'incidenza di tale problema.



# Introduzione

L'Azienda presso la quale si è svolto il tirocinio è la Compositex di Vicenza, la quale esegue lavorazioni e riparazioni con materiale composito. Il socio fondatore è il Sig. Palmiro Bernardotto che costituisce la Ditta nel 1986. Sin dalla sua fondazione l'Azienda si è rivolta a una clientela che richiedesse lavorazioni in materiale composito di alto livello. Ancora oggi i principali clienti operano nei settori: navale, aeronautico e competizioni sportive in genere. Il personale è costituito da circa una trentina di persone e il processo produttivo rimane totalmente all'interno dell'Azienda: sono, infatti, presenti un Ufficio Tecnico, un Ufficio Vendite e un reparto produttivo che si occupa della realizzazione dei manufatti dal modello alla polimerizzazione in autoclave.

Lo scopo del lavoro è stato quello di studiare le cause dell'insorgenza di difetti estetici e di errori dimensionali nell'ottica di un miglioramento del processo produttivo che limiti o elimini tali imperfezioni.

L'elaborato è suddiviso in quattro capitoli. Nel primo, "Introduzione", sono esposte le caratteristiche salienti della Ditta e lo scopo del tirocinio. Nel secondo, "Processo produttivo", si analizzano nello specifico le peculiarità del processo di produzione utilizzato, soffermandosi su punti di forza e di debolezza. Nel capitolo terzo, "Difetti estetici", si approfondisce il vero corpo di studio del tirocinio, esponendo alcuni casi rappresentativi e le eventuali soluzioni trovate per lo specifico difetto. Col capitolo finale, "Conclusioni", si riassumono i risultati ottenuti.





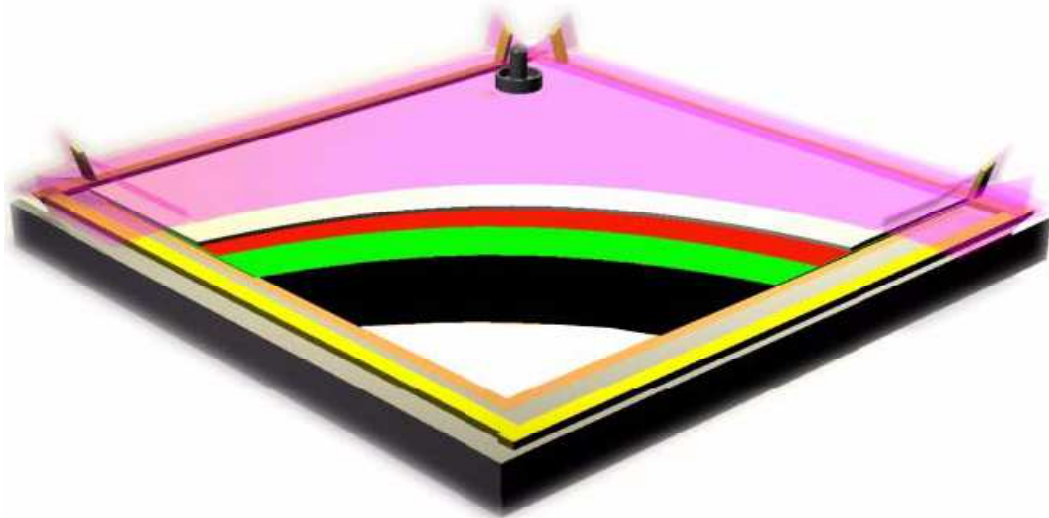
# Capitolo 1

## Processo produttivo

Compositex S.r.l. compie lavorazioni di materiali compositi, costruisce particolari in composito per i settori aeronautico, automobilistico, nautico e ciclistico ed effettua riparazioni di scocche e pezzi in composito per vari settori. L'alto livello qualitativo delle lavorazioni comporta una limitazione nei volumi produttivi. La produzione si basa sul metodo della laminazione manuale di preimpregnati, ovvero fibre di rinforzo tessute e annegate in una matrice di resina parzialmente polimerizzata. Le lavorazioni sono effettuate secondo le difettive del cliente o, dove esse non vi fossero, avvalendosi dell'ufficio tecnico interno. I compiti dell'ufficio tecnico consistono nella redazione delle distinte base, tecnica e di produzione, ottenute dalle direttive del cliente, e nella progettazione degli stampi. Un ulteriore compito svolto dall'ufficio tecnico riguarda le procedure di verifica dimensionale dei manufatti. Per la realizzazione dei modelli ci si affida a centri a controllo numerico, CNC, interni all'Azienda. La corrispondenza di ogni modello alle direttive progettuali è verificata per mezzo di un braccio di misura a scansione laser. Il centro nevralgico del processo produttivo è costituito dalla camera di laminazione, sala di *lay-up*, dove sono realizzati stampi e prodotti finali. Per la laminazione si utilizzano sagome di preimpregnato tagliato al plotter. I preimpregnati utilizzati in questa trattazione sono costituiti da matrici in resina epossidica rinforzate da fibra di vetro, carbonio o Zylon. I limitati volumi di produzione permettono di realizzare gli stampi all'interno dell'azienda utilizzando pelli di fibra di carbonio. Si rende necessario l'utilizzo di stampi in alluminio, a causa della maggiore fragilità del carbonio, solo per partite che superino la decina di unità; in questo caso ci si rivolge a fornitori esterni. La laminazione avviene in una camera a temperatura termostata e soggetta a filtraggio dell'aria, *clean room*. Al suo interno, gli operatori indossano indumenti appropriati per mantenere al minimo il livello di contaminazione con l'esterno. Il ricorso alla *cleanroom* è reso necessario per evitare la deposizione di agenti esterni sulle pelli, un'evenienza di questo tipo va impedita per evitare eventuali cedimenti strutturali dovuti a delaminazioni, causate dalla non continuità di materiale tra le varie pelli sovrapposte. Durante la polimerizzazione in autoclave il prodotto è sottoposto a specifici programmi di temperatura e a pressioni di 3-7 bar che favoriscono il consolidamento tra le pelli e il completamento della polimerizzazione. Completata la polimerizzazione, è effettuato un controllo dimensionale anche per lo stampo. L'ultimo passo prima della vendita è costituito dalla rifinitura, dove sono cancellati i difetti

estetici rimediabili e completato il processo di produzione. In alcuni casi si procede a un nuovo passaggio in autoclave, chiamato post-cure, il cui compito è di garantire la tenuta termica di stampi e manufatti sottoposti a stress termici particolarmente pesanti.

## 1.1 Ruolo del sacco da vuoto



**Figura 1.1:** schematizzazione di un sacco da vuoto

Alla conclusione della laminazione è di fondamentale importanza l'inserimento dello stampo in appositi sacchi da vuoto la cui funzione è di permettere una corretta polimerizzazione in autoclave. Il ruolo del sacco da vuoto è cruciale: nel caso in cui la chiusura non fosse ermetica, verrebbe meno la depressione e il processo di polimerizzazione ne risulterebbe compromesso, a volte solo da punto di vista estetico, a volte viene messa a rischio anche la resistenza meccanica del manufatto e la sua successiva idoneità alla vendita. I sacchi da vuoto, *vacuum bag*, sono realizzati con materie plastiche (nylon) la cui resistenza termica deve essere molto elevata per sostenere i programmi di temperatura necessari alla polimerizzazione; altro elemento fondamentale è la grande aderenza ed elasticità che permettano di far aderire l'intera superficie del manufatto al sacco permettendo un'omogenea distribuzione del vuoto.

## 1.2 Verifica dimensionale

La scansione di stampi e modelli è effettuata utilizzando un braccio di misura a scansione laser. Attraverso il confronto tra la nuvola di punti ottenuta dalla scansione con i dati nominali del progetto in CAD, si ottiene la conferma o meno del rispetto delle tolleranze progettuali. La verifica dimensionale di modelli e stampi ha un importante risvolto dal punto di vista economico in quanto evita di iniziare la produzione di manufatti che non corrispondano alle specifiche tecniche e che comporterebbero lo scarto del prodotto finale con conseguente spreco di risorse umane e materiali. Nella scansione si riscontrano frequenti problemi di riflessione del raggio a causa dell'alto indice di riflessione delle superfici scansionate. Per ovviare a tale problema si rende necessaria l'applicazione di prodotti sulla superficie del manufatto che limitino tale fenomeno. Per quanto riguarda la verifica dimensionale del pezzo finito, essa è effettuata solo in casi particolari in quanto si rivela solitamente superflua: le incongruenze di tipo dimensionale possono essere trasferite dallo stampo al pezzo, raramente queste insorgono nella fase di laminazione su stampo. Grazie a tali accorgimenti l'incidenza di errori dimensionali che portino allo scarto di un prodotto finito è risibile e durante il tirocinio non sono stati riscontrati casi del genere.

# Capitolo 2

## I difetti estetici

Ben diversa incidenza hanno i difetti estetici nel computo totale degli scarti. Una volta estratto il manufatto dallo stampo, non è infrequente notare piccole o grandi incongruenze sulla superficie. Tali tipi di difetti non influenzano in alcun modo le caratteristiche meccaniche e sono da evitarsi solo per motivi di gradevolezza estetica. Durante lo svolgimento del tirocinio la frequenza con la quale si sono manifestati difetti estetici è stata molto alta. Nella successiva trattazione saranno esposti i casi riscontrati, analizzate le cause principali e gli eventuali rimedi, quando questi siano stati possibili. Bisogna innanzitutto creare due macro-categorie:

- difetti recuperabili
- difetti non recuperabili

La differenza tra le due categorie è ben chiara: i difetti del primo gruppo rendono lo scarto del pezzo non necessario, quelli appartenenti al secondo possono invece portare allo scarto del pezzo.

### 2.1 Difetti estetici recuperabili

Sono i più frequenti, non sono di grande impatto in quanto facilmente eliminabili nel ciclo di rifinitura. Solitamente sono trattati con la deposizione di resina trasparente, la cui funzione è di uniformare la superficie, e successiva levigatura con carta abrasiva. In base al tipo di resina usata la polimerizzazione può essere effettuata all'aria oppure attraverso la somministrazione di raggi UV. Un altro metodo, per parti non propriamente visibili, consiste nella stesura di collante strutturale nero. Infine, nel caso di manufatti destinati alla verniciatura, il problema viene risolto con la verniciatura stessa.

### 2.1.1 Bolle d'aria

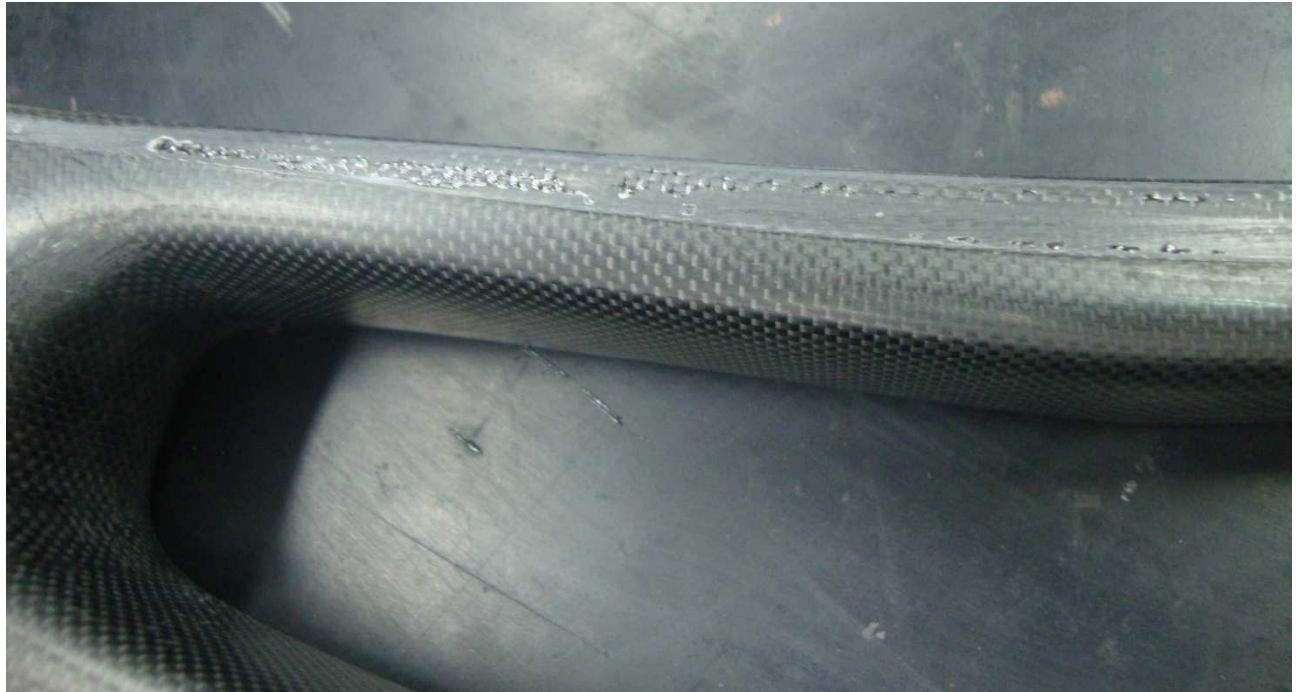


Figura 2.1 difetto causato da bolle d'aria formatesi nella polimerizzazione in autoclave.

Si può notare come in Figura 2.1 sia presente una serie di bolle, lungo tutta la lunghezza del pezzo, formatesi durante la polimerizzazione in autoclave. Causa principale della formazione di bolle superficiali è data da perdite di depressione del sacco da vuoto durante la polimerizzazione: a causa della grande pressione esterna, entra del gas all'interno del sacco causando appunto il problema. Una spiegazione alternativa può essere la seguente: durante la laminazione può rimanere incapsulata dell'aria tra le varie pelli, solitamente, però essa viene estratta durante l'applicazione di vuoti intermedi di consolidamento nel *lay-up*, ma a volte alcune bolle non riescono a fuoriuscire. È quindi possibile che nel ciclo di cottura in autoclave, temperatura e pressione vaporizzino e facciano risalire in superficie le bolle creando questo fenomeno di soffiature superficiali. Purtroppo la verifica sperimentale di tale ipotesi è risultata di impossibile attuazione quindi l'eventualità rimane valida solo dal punto di vista teorico. La cancellazione delle suddette imperfezioni è facilmente ottenibile uniformando la superficie con resina trasparente e successiva levigatura.

## 2.1.2 Accumulo di resina



**Figura 2.2:** accumuli di resina

In figura 2.1 sono evidenziate delle strisce di colore giallo in prossimità di alcuni spigoli negativi del pezzo. La causa di questo difetto è da ricercarsi in un'imperfetta calibratura degli spazi intercorrenti tra i due stampi e il mandrino in silicone interposto tra essi. Si possono inoltre notare delle piccole bolle come nel caso precedente. Poiché il problema era ricorrente e molto più esteso ed evidente rispetto a semplici bolle d'aria, si è ricercata una soluzione che permettesse di eliminare o ridurre il problema. Bisogna innanzitutto premettere che la totale aderenza del mandrino alle pelli è teoricamente possibile, però nella realizzazione ciò risulta molto meno praticabile in quanto le pelli non possono essere accostate l'una all'altra, ma leggermente sovrapposte per evitare cedimenti strutturali dovuti alla non continuità della fibra e quindi vengono a crearsi delle piccole incongruenze tra pelli e mandrino dove appunto si formano i difetti. Inoltre i mandrini sono realizzati per mezzo di una colata di silicone in appositi stampi e quindi è chiaro che alcune imperfezioni dimensionali siano insite nella realizzazione stessa del mandrino. Per porvi rimedio si è inizialmente provata a inserire una pelle in più per comprimere maggiormente lo spazio tra preimpregnati e mandrino. Questa soluzione è stata possibile in quanto il peso del pezzo sarebbe comunque rimasto all'interno

dei limiti posti del cliente. In seguito è stato però reso necessario un altro provvedimento in quanto l'incidenza del difetto restava comunque alta. Si è dunque posta sul mandrino una rete in fibra di PTFE (teflonfabric) per favorire l'aderenza e la fuoriuscita delle bolle d'aria.



**Figura 2.3:** rete in teflon posta sul mandrino per aumentarne l'aderenza

Grazie a quest'ultima soluzione, mantenendo sempre un numero di pelli superiore al normale, si è riuscita a ridurre significativamente l'insorgenza di tale problema. Per cancellare poi gli accumuli di resina comunque formati, si è proceduto con la deposizione di resina trasparente e successiva levigatura.





**Figura 2.4:** accumulo di resina causato dall'inserimento del mandrino.

Un altro deposito di resina si nota in Figura 2.4, la causa è leggermente diversa: nell'inserimento del mandrino all'interno dello stampo si è verificato un accavallamento tra le pelli che hanno anche in questo caso creato una distribuzione disomogenea degli spazi all'interno dello stampo favorendo l'accumulo di resina. Attraverso il ridimensionamento del mandrino si è riuscita a ridurre l'insorgenza di tale difetto.

### 2.1.3 Errori nella laminazione



**Figura 2.5:** deposizione del preimpregnato non corretta

Gli spigoli negativi sono una zona particolarmente delicata per quanto riguarda l'insorgenza di difetti estetici: si è già visto nel caso precedente per gli accumuli di resina. In Figura 2.5 invece, il problema consiste nella non corretta deposizione delle pelli. A causa della particolare conformazione del pezzo, si è verificato un accavallamento tra le fibre delle varie pelli sovrapposte che hanno portato alla formazione di uno spessore non previsto. La manipolazione dei tessuti è alquanto delicata e per particolari conformazioni dello stampo come quella analizzata si rischia di non riuscire ad ottenere la completa aderenza dei *prepregs* allo stampo ottenendo superfici irregolari. È quindi chiaro che gli spigoli negativi siano un punto delicato e fonte di difetti. Possono inoltre formarsi zone in cui il sacco da vuoto non riesce ad aderire formando quindi punti di tensione. Se il sacco non aderisce i pericoli, sono

molteplici: oltre alla formazione di difetti, è altresì probabile che nel ciclo di cottura in autoclave le alte pressioni esercitate possano lacerare il sacco nel punto dove esso non aderisce bloccando l'intero programma di cottura e costringendo a sostituire il sacco o alterando la polimerizzazione in maniera irreversibile. Per cancellare questo difetto si è provveduto, in fase di rifinitura, ad applicare un adesivo strutturale (in questo caso DYMAX 3093), che polimerizza con raggi UV, per riempire la cavità, successivamente si è proceduto con levigazione.

#### 2.1.4 Commenti

Si è dunque visto che i difetti recuperabili sono di agevole cancellazione. L'aspetto negativo di quest'analisi è però dato dalla scarsa possibilità di ridurre l'insorgenza. Per quanto riguarda le bolle d'aria è impossibile garantire la totale aderenza tra i *prepregs* con un semplice vuoto intermedio, si potrebbe provare a somministrare una depressione intermedia più spinta, ma i benefici sarebbero minimi a fronte di alti costi. Gli accumuli di resina sono causati dalla non perfetta aderenza tra pelli e mandrino o stampo o sacco da vuoto e da piccoli errori di dimensionamento di stampi e mandrini. Si ricordi che lo stampo è scansionato prima dell'utilizzo perciò il sovradimensionamento rientra comunque nei limiti di tolleranza e non è quindi rilevato nella fase di analisi dimensionale. Un discorso diverso si può fare per i mandrini in quanto la realizzazione degli stessi per mezzo della colata di silicone non è esente da imperfezioni, perciò in linea teorica tale aspetto andrebbe migliorato. Bisogna però ricordare che la cancellazione dei difetti fin qui analizzati è sempre stata resa possibile con la semplice levigatura del pezzo perciò una modifica del processo produttivo che cercasse di ridurre l'insorgenza di difetti non è conveniente dal punto di vista economico e d'incerto successo.

## 2.2 Difetti estetici non recuperabili

I difetti non recuperabili non hanno una natura sostanzialmente differente da quelli recuperabili. La loro diversità è per lo più data dall'impossibilità di eliminarli. Perciò, a meno di coperture con vernice, ove possibile, essi spesso portano allo scarto del pezzo. Per analizzare i difetti non recuperabili saranno esposti inizialmente i casi di due manufatti che presentano una buona varietà d'imperfezioni che ne hanno causato lo scarto. Seguirà l'esposizione dei difetti non imputabili al processo produttivo e infine verrà analizzato un caso dove la rifinitura ha portato a una modifica strutturale della realizzazione del pezzo.

### 2.2.1 Sella

Si è realizzata una sella per bicicletta utilizzando uno stampo fornito dal cliente. I materiali utilizzati sono Zylon, un polimero a cristallo liquidi la cui resistenza alla trazione è superiore al kevlar, e fibra di vetro.



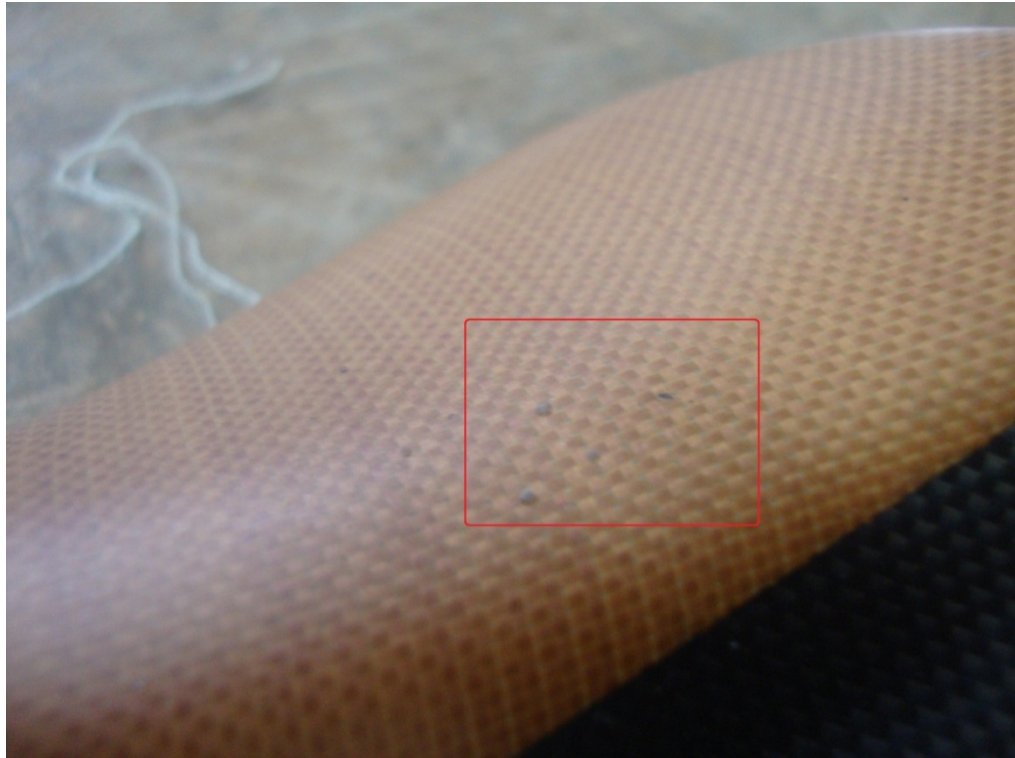
**Figura 2.6:** accavallamenti causati dalla deposizione dello Zylon sulla fibra di vetro

Non es di prova. Come si nota dalla Figura 2.6, sono presenti numerosi accavallamenti sulla superficie esterna. Questo problema è causato dalla scarsa adesione della fibra di vetro a contatto con lo stampo e con la successiva deposizione della pelle di Zylon si sono formate delle pieghe sulla fibra di vetro che non è stato possibile eliminare. La soluzione proposta è stata quella di stendere uno strato di collante tra stampo e fibra di vetro per migliorarne l'adesione, si è poi applicato un vuoto intermedio dopo la stesura della fibra di vetro.



**Figura 2.6:** effetti dell'utilizzo di un collante tra stampo e fibra di vetro, seguita da vuoto di consolidamento.

Dalla Figura 2.6 è chiaro che il problema sia stato totalmente risolto con i suddetti accorgimenti. In Figura 2.7 sono poste in evidenza delle bolle che si sono presentate come difetto ricorrente di tutta la serie di selle prodotte, infatti la causa della loro formazione risiede nel processo produttivo dello stampo: essendo stato realizzato senza l'ausilio della polimerizzazione sotto vuoto in autoclave, le bolle d'aria non sono state eliminate e hanno formato delle sporgenze nello stampo.



**Figura 2.6:** bolle superficiali prodotte da rilievi presenti sullo stampo utilizzato.

L'inserimento di una pelle di fibra di vetro è stato reso necessario proprio per questo motivo: si è cercato di creare una strato "sacrificale" che assorbisse il difetto e che poi venisse rimosso con carta abrasiva. Il risultato però non è stato soddisfacente in quanto le bolle venivano comunque impresse anche sullo strato di Zylon durante la polimerizzazione.



**Figura 2.7:** nei tondi rossi, scarti di carbonio depositati tra fibra di vetro e matrice. Nel riquadro: errata deposizione delle pelli che ha interrotto la continuità nella trama.

In Figura 2.7 sono chiari due difetti che non sono recuperabili e che da soli possono comportare lo scarto del pezzo: i due cerchi evidenziano gli scarti di carbonio intrappolati tra la fibra di vetro e lo Zylon, nel riquadro si nota un'incongruenza nella trama causata dall'errata deposizione della pelle di Zylon. Entrambi i difetti non sono rimediabili e il pezzo va scartato. Nelle produzioni successive si è prestata maggiore attenzione alla pulizia dello stampo e alla deposizione delle pelli cosicché i difetti sono stati eliminati.

### 2.2.2 Maniglia

In Figura 2.8 il difetto evidenziato è causato dalla presenza di materiale esterno sullo stampo: prima di ogni utilizzo lo stampo viene pulito e trattato con agente distaccante a base di nafta e paraffine in modo da formare un film tra stampo e manufatto per rendere il distacco di quest'ultimo più agevole. Nel caso lo stampo non sia totalmente pulito, può capitare che nel reparto dove viene effettuato il distacco dagli stampi si operi su più unità e che delle schegge di resina finiscano su uno stampo pulito, nel trattamento con distaccante si viene a consolidare la presenza dello sporco nel film stesso causando l'imperfezione di Figura 2.8.



**Figura 2.8:** difetto dovuto alla presenza di sporco nello stampo.

Il recupero di tale difetto non è possibile poiché esso non è in rilievo rispetto alla superficie, ma in negativo, e data anche la particolare posizione qualsiasi intervento nella fase di rifinitura non avrebbe alcun effetto positivo. Si è più volte affermata l'importanza del corretto funzionamento del sacco da vuoto: la sua funzione è non solo quella di mantenere la depressione, ma anche per il risultato estetico è fondamentale. Un sacco da vuoto deve essere correttamente posto in modo che non si formino delle pieghe o dei punti di non adesione che potrebbero influenzare la resa estetica del pezzo, creando zone di disomogeneità nella distribuzione della resina oppure la riproduzione della piega sulla superficie del pezzo. Sempre riguardante la stessa maniglia, in Figura 2.9. sono riportati gli effetti della perdita di depressione: venendo meno l'omogenea pressione assicurata dal sacco da vuoto, non è stato possibile completare il processo di polimerizzazione, inoltre, ove essa è stata portata a termine, la distribuzione della resina è risultata non uniforme.



**Figura 2.9:** la perdita di depressione del sacco da vuoto non ha permesso una distribuzione omogenea della resina né la sua completa polimerizzazione.



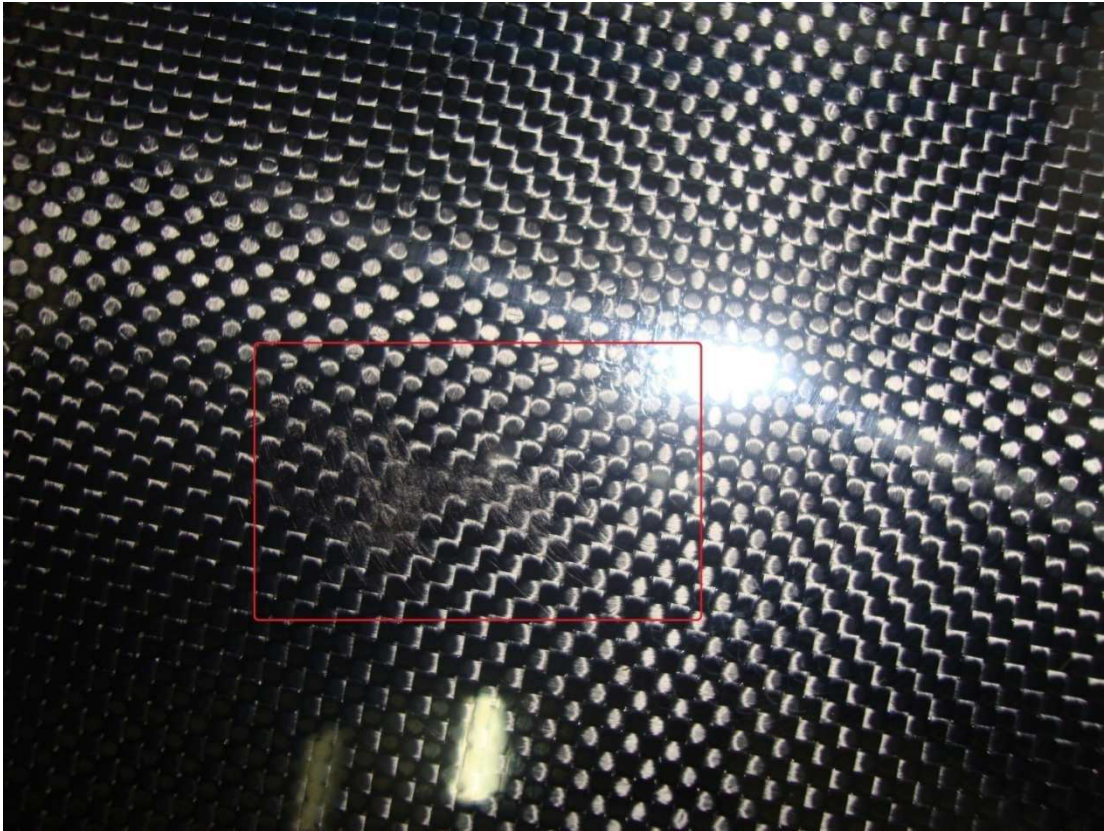
In Figura 2.10 sono evidenziati gli effetti di un'errata deposizione della pelle più esterna che ricopre il manufatto. Particolarmente degno di nota è il riquadro sulla destra, dove le fibre sono perfino separate. Le sagome di preimpregnato devono essere depositate sullo stampo senza eccessive manipolazioni in quanto il tessuto può facilmente sfibrarsi compromettendo irreparabilmente la resa estetica del pezzo.



**Figura 2.10:** errata deposizione delle pelli esterne che portano a una stiratura o interruzione della trama.

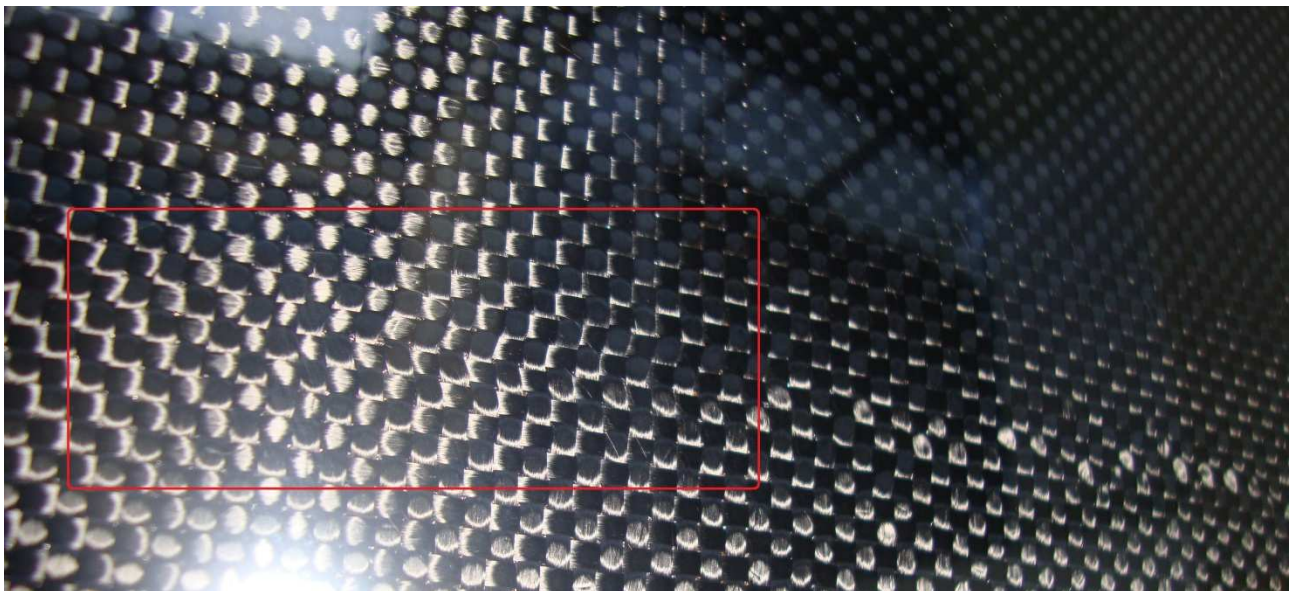
### 2.2.3 Rotolo

Ci sono dei difetti la cui natura è esterna al processo produttivo. In Figura 2.11. è ripresa l'immagine di una lastra in fibra di carbonio: si possono notare degli aloni nella trama che non hanno nulla a che fare con la realizzazione del manufatto o possibili errori realizzativi. Nella tessitura delle trame di fibra di carbonio vengono a formarsi delle polveri che permangono nell'ambiente di lavoro e che possono depositarsi sul tessuto stesso e finire per fare parte della matrice. La frequenza totalmente aleatoria dell'evento non permette una prevenzione di tale difetto ma potrebbe essere eliminata solo tramite un intervento sul processo produttivo del fornitore.



**Figura 2.11:** alone causato dal deposito di polveri di carbonio nella produzione del rotolo.

Un altro importante difetto estetico riscontrato nei rotoli di preimpregnato è raffigurato in Figura 2.12 dove si nota una discontinuità nella trama dovuta alla tessitura della fibra.



**Figura 2.12:** discontinuità nella trama dovuta a errori nella tessitura.

## 2.2.4 Difetto strutturale

Si presenta ora un particolare caso in cui durante i trattamenti di rifinitura di un pezzo per si è riscontrato un importante difetto strutturale. Durante la levigatura di una forcella in fibra di carbonio per bicicletta, del tipo di quelle finora raffigurate nell'analisi dei difetti estetici, ci si è accorti che era sufficiente un trattamento con carta abrasiva per causare la delaminazione del pezzo. La forcella è realizzata mediante la deposizione di preimpregnati di fibra di carbonio unidirezionale sugli stampi, successivamente viene inserito un mandrino, anch'esso rivestito con fibra di carbonio. Il punto di debolezza è scovato proprio nell'inserimento del mandrino: non essendovi sovrapposizione tra le pelli degli stampi né tra stampo e mandrino, la continuità di materiale viene meno. Perciò l'unione tra le due parti del manufatto era resa possibile dalla sola resina, chiaramente si era quindi creata una zona di forte debolezza lungo tutto l'asse della forcella. Per permettere la continuità di materiale si è provveduto ad applicare un vuoto di consolidamento sul mandrino ricoperto dalla fibra. La causa risiede proprio nella scarsa aderenza delle pelli al mandrino in silicone, per questo motivo si creavano nello stampo ingombri eccessivi che non permettevano l'unione delle pelli tra le due cavità e la resistenza meccanica veniva meno.

## 2.2.5 Commenti

Dall'analisi della casistica presentata si può notare che il punto di congiunzione tra i vari difetti che portano allo scarto del pezzo risiede nella relativa levità degli errori commessi: l'aderenza e la disposizione del sacco, la presenza di materiale eterogeneo nello stampo, la deposizione non corretta delle pelli esterne, sono mancanze nella realizzazione della procedura realizzativa. I difetti non recuperabili nascono dalla sottovalutazione di aspetti ripetitivi e usuali della procedura realizzativa. Del resto è chiaro che non potrebbe essere altrimenti: il difetto estetico nasce da imperfezioni di natura realizzativa, è impossibile che un pezzo sia scartato per incongruenze estetiche causate dall'errata realizzazione degli stampi in quanto questi vengono scansionati e per ognuno di essi redatto un report che ne evidenzia ogni possibile incongruenza con il progetto. La corretta sagomatura delle pelli è di fondamentale importanza per prevenire l'insorgenza dei difetti estetici come in Figura 2.10

poiché riducendo al minimo la necessità di manipolazione della pelle da parte dell'operatore si riesce a prevenire il deterioramento della tramatura stessa. Nel solo caso del cedimento strutturale si può parlare di errore di procedura, ma la soluzione trovata ha permesso l'eliminazione definitiva di tale problema. Un caso a parte sono i difetti presenti nella sella in precedenza analizzata: in quel caso non era presente un predefinito iter realizzativo, ci si trovava di fronte a delle richieste del cliente, il quale poi lasciava piena libertà dal punto di vista operativo. Perciò in quel caso si è ottenuto un primo pezzo di prova e dai difetti riscontrati, si è provveduto a modificare il processo per eliminare le cause dei vari difetti. In conclusione, la ricerca di una miglioria dell'incidenza dei difetti estetici è stata possibile ma in maniera limitata in quanto alcune cause, come quelle derivanti dal sacco da vuoto, sono generalmente già conosciute ma di difficile eliminazione in quanto possibili migliorie, come una migliore disposizione del sacco, sono già state approntate e sono dipendenti non da fatti oggettivi, ma dalla particolare conformazione del pezzo e dall'errore umano che, anche se diminuibile, non è eliminabile.

# Conclusioni

L'analisi ha riguardato lo studio dell'insorgenza dei difetti estetici e degli errori dimensionali, le rispettive cause e possibili soluzioni ai problemi riscontrati. Nel periodo di studio non è stato possibile approfondire l'analisi degli errori dimensionali in quanto non se ne sono presentati; del resto, dallo studio del processo produttivo risulta chiaro che errori nel dimensionamento sono alquanto improbabili poiché sia i modelli che gli stampi sono accuratamente analizzati e la sagomatura delle pelli lascia poco spazio a errori. Si può quindi ipotizzare che le uniche cause che possano portare a problemi nel dimensionamento dei pezzi sono da ricercarsi tra gli errori umani. Errori nella sagomatura o nella deposizione delle pelli non possono essere esclusi, ma anch'essi risultano improbabili poiché si può sempre agire in fase d'opera con una modifica manuale dei profili delle sagome, qualora non seguissero la conformazione dello stampo.

Maggiori spunti di riflessione si possono trovare nello studio dei difetti estetici: è stato adeguatamente rilevato il ruolo del sacco da vuoto nella resa sia estetica sia meccanica dei manufatti, infatti, la grande maggioranza dei difetti analizzati, è causata da problemi nella polimerizzazione in autoclave, sia si parli di perdite di depressione in fase di polimerizzazione o di non corretta adesione del sacco alla superficie dello stampo.

Per quanto riguarda la categoria dei difetti recuperabili, generalmente si è provveduto alla cancellazione del difetto mediante levigatura, solo nel caso dell'errata deposizione delle pelli è stato reso necessario un ritocco con resina che riempisse l'avvallamento creatosi.

Nei difetti non recuperabili le cause sono spesso da imputarsi a errori di tipo umano, come nel caso degli agenti esterni che si depositano sul film di distaccante, oppure a procedure di lavorazione ancora in fase sperimentale, si veda la trattazione sulla sella da bicicletta e le soluzioni approntate. Infine restano problemi non risolvibili, come i difetti insiti nel rotolo di preimpregnato stesso, che non possono neppure essere evitati in quanto il loro presentarsi è totalmente aleatorio e non offre alcuno spunto di controllo.

Un'ultima conferma dell'importanza dell'analisi qui effettuata si trova nell'ultimo caso analizzato, il difetto strutturale, dove proprio l'attenzione alla resa estetica ha permesso di rilevare un problema finora nascosto e che avrebbe portato al completo scarto dell'intera partita di prodotti causando un rilevante danno economico, oltre che lo spreco di risorse.

Dallo studio effettuato, è emerso come gli aspetti superficialmente più marginali o di routine, come il sacco da vuoto, possano essere in ultima analisi le maggiori cause dell'insorgenza di difetti estetici i quali, recuperabili o non recuperabili, hanno una loro incidenza nel bilancio economico di un'Azienda che fa della qualità il proprio fine ultimo.



# Siti web

<http://www.assocompositi.it/>

<http://www.compositex.com/ita/azienda/index.php>

<http://www.lamiflex.it/>

<http://it.wikipedia.org/>

<http://www.advanced-composites.co.uk/>

<http://www.g-angeloni.com>

# Riferimenti bibliografici

Handbook of plastics, elastomers, and composites, Charles A. Harper, McGraw-Hill Professional, 2002

FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures: a guide to fundamentals and design for repair and retrofit, Perumalsamy Balaguru, Antonio Nanni, James Giancaspro, Spon Press 2008

Handbook of composites, George Lubin, Springer - Verlag, 1998

Compositional and failure analysis of polymers: a practical approach, John Scheirs, Wiley, 2002