



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI
"FEDERICO II"**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
DEI MATERIALI E DELLA PRODUZIONE**

**Dottorato di Ricerca in Tecnologie e Sistemi di produzione
XXII CICLO**

***"Studio numerico sperimentale del processo
per infusione di resina per applicazioni
aeronautiche"***

Ing. Umberto Morano

Tutor : Ch.mo prof. ing. Antonio Langella

INDICE

Introduzione	1
Capitolo I - Resin Infusion Under Flexible Tooling	
1.1 Introduzione	6
1.2 Attrezzature per un processo RIFT	6
1.3 Fasi del processo RIFT	7
1.4 Sviluppo storico del processo RIFT	11
1.5 Sviluppo storico dei modelli teorici.	21
1.6 Micro e Macroflusso	24
1.7 Metodi di misura della permeabilità	30
1.8 Influenza della struttura delle fibre sulla permeabilità	31
1.9 Effetti sulla permeabilità di fronti di flusso convergenti	33
1.10 Recenti Modelli Matematici	72
Capitolo II – Prove Sperimentali Preliminari e Validazione FEM	
2.1 Introduzione	45
2.2 RTM-Worx	45
2.3 Prove di permeabilità – Introduzione	51
2.4 Prove di permeabilità – Tessuto in fibra di carbonio 200 g/m ²	51
2.5 Prove di permeabilità – Monodirezionale in fibra di carbonio 290 g/m ²	58
2.6 Prove di permeabilità – Monodirezionale in fibra di carbonio 290 g/m ² – laminati con variazione dell'angolo delle fibre delle lamine	66
2.7 Prove di permeabilità – Distributori di tipo rete	75
2.8 Validazione FEM	77
2.8.1 Prove di permeabilità sul tessuto in fibra di vetro	77
2.8.2 Prove Standard su laminati con geometrie semplici	78
2.8.2.1 Laminato simmetrico con immissione centrale	79
2.8.2.2 Laminato 4 strati di lunghezza 1 metro	81
2.8.2.3 Prova comparata di laminati da 8 strati	84
2.8.2.4 Laminato di lunghezza 1 metro e 8 strati	87
2.9 Laminati con geometria complessa	90
2.9.1 Laminato con foro centrale a forma di rombo	90
2.9.2 Laminati con 3 fori rettangolari	94
2.9.3 Laminati con un foro rettangolare posto sull'asse longitudinale	98
2.9.4 Relazione tra L, l, x	104
Capitolo III – Analisi e Fabbricazione di Componenti Aeronautiche	
3.1 Studio e fabbricazione di una frame con sezione a C	106
3.2 Studio di un'ala anteriore	112
3.3 Simulazioni per il pannello superiore	114
3.3.1 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 1	114
3.3.2 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 2	116
3.3.3 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 3	117
3.3.4 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 4	118
3.3.5 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 5	119
3.3.6 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 6	121
3.3.7 Simulazioni per il pannello superiore – Conclusione	121

3.4 Simulazioni per il pannello inferiore	123
3.4.1 Simulazioni per il pannello inferiore - Simulazione 1	123
3.4.2 Simulazioni per il pannello inferiore - Simulazione 2	126
3.4.3 Simulazioni per il pannello inferiore - Simulazione 3	128
3.4.4 Simulazioni per il pannello inferiore - Simulazione 4	130
3.4.5 Simulazioni per il pannello inferiore – Conclusione	132
3.5 Progettazione degli stampi per il profilo alare	132
3.6 Realizzazione delle parti del profilo alare.	134
Conclusioni	139
Bibliografia	140

Introduzione

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di studiare la fattibilità realizzativa di strutture complesse di tipo aeronautico con materiale composito mediante processi di tipo infusion.

Per materiali compositi si intendono i composti costituiti da fibre di varia origine (vetro, carbonio, boro, fibra aramidica) inglobate in una matrice di resina (poliestere, vinilica, epossidica, fenolica) la quale non ha compiti di resistenza meccanica, ma garantisce la coesione tra le fibre di uno stesso strato e tra strati adiacenti. Tali componenti, pur conservando le proprie identità chimiche e fisiche, contribuiscono mutuamente a fornire proprietà meccaniche e fisiche complessivamente superiori rispetto ai singoli elementi visti come entità separate. La combinazione di materiali diversi in un materiale composito consente la produzione di strutture che trovano applicazione in settori sempre più numerosi, data la possibilità di poter modellare i pezzi, o componenti, con molta facilità, oltre alla possibilità di disporre i rinforzi, quindi le fibre, secondo quelle che sono le esigenze progettuali e secondo direzioni prestabilite, in modo da privilegiare rigidità e resistenza in alcune direzioni. La superiorità delle proprietà meccaniche specifiche dei moderni materiali compositi è spesso penalizzata dai costi elevati della loro lavorazione, in quanto la loro progettazione e successiva produzione è spesso molto più complessa dei tradizionali materiali strutturali; inoltre, va posta la dovuta attenzione al problema riguardante un severo degrado delle proprietà meccaniche nel tempo, che non può essere trascurato, e di cui è necessario valutarne l'entità.

Il rinforzo è un materiale resistente, inerte, impiegato per aumentare la resistenza, la rigidità e la tenacità della matrice. Per essere efficace, il rinforzo deve costituire un buon legame fisico e chimico con la matrice.

Le fibre più importanti per uso tecnologico sono quelle di vetro, di carbonio, organiche e minerali e la loro scelta dipende da vari fattori come le proprietà meccaniche richieste, i costi di produzione, caratteristiche particolari, etc.

Se si esegue una prova di trazione su di un materiale, come ad esempio il vetro o la grafite, si trovano valori di resistenza a rottura di circa 30 - 50 N/mm², mentre i valori che caratterizzano le fibre di vetro o carbonio sono di due ordini di grandezza più elevati. Tale differenza è dovuta al fatto che tutti i materiali presentano, in misura maggiore o minore, dei difetti e di conseguenza, essendo le dimensioni delle fibre

estremamente limitate, la presenza dei difetti è molto contenuta, e ciò consente di ottenere una perfezione strutturale fuori dal comune; questa caratteristica, unita alle proprietà intrinseche dei materiali costitutivi, assicurano ai rinforzi fibrosi:

- resistenza meccanica molto elevata;
- modulo elastico molto alto;
- peso specifico molto basso;
- comportamento generalmente elastico lineare fino alla rottura.

È inoltre importante far notare che le fibre isolate sono in grado di resistere solo a carichi di trazione, invece una volta inglobate nella matrice acquistano caratteristiche di resistenza anche a compressione, flessione e taglio. Il rinforzo determina le proprietà del materiale finale, essendo la componente che assorbe e trasmette il carico meccanico ai vari organi componenti la struttura meccanica, e da esso dipende fortemente, come già detto, il costo del materiale e le caratteristiche meccaniche del pezzo. Di ultimo sviluppo sono le fibre aramidiche (Kevlar), che però stentano a diffondersi a causa di alcuni problemi legati alla loro produzione.

I vari tipi di rinforzo possono trovarsi sotto varie geometrie, che in genere possono trovarsi avvolte in bobine di diverse dimensioni:

- Unidirezionali (sono fibre continue e parallele)
- Tessuto (fibre continue bidirezionali)
- Mat (fibre continue con orientazione casuale)
- Chopped strand (sono fibre "tagliate" che vengono usate per il rinforzo di compositi con basse caratteristiche meccaniche.)

È possibile inoltre dividere ognuno di questi gruppi in altri sottogruppi in base al loro peso per unità di superficie e cioè in base alla loro grammatura (g/m^2).

La matrice ha lo scopo di trasmettere il carico alle fibre, di proteggerle e di tenerle unite, inoltre determina la forma finale del pezzo. Le proprietà a cui non è possibile rinunciare per la scelta di una matrice sono le seguenti:

- la resistenza alla corrosione;
- la resistenza al calore;
- la resistenza all'abrasione.

Queste proprietà sono richieste nella maggior parte delle applicazioni e quindi la ricerca del giusto tipo di resina assume una notevole importanza.

Le matrici possono essere di diverso tipo e classificate in funzione al valore delle temperature massime di impiego alle quali possono essere adoperate senza dover subire fenomeni di degradazione.

I principali tipi di matrici oggi operanti sono:

- matrici polimeriche organiche e non organiche;
- matrici metalliche;
- matrici ceramiche.

Le matrici polimeriche, a loro volta, si suddividono in organiche ed inorganiche. Le più importanti tra le prime sono le resine epossidiche. Il gruppo epossidico si trova in alcuni polimeri ottenuti sommando epossidi e fenoli come epiclorina e bisfenolo. Il polimero ottenuto è sotto forma di fluido viscoso. Per ottenere la condensazione per polimerizzazione della resina essa deve essere addizionata con l'indurente, costituito da ammine (contenente il gruppo amminico NH_2), avente funzione di catalizzatore della reazione chimica di polimerizzazione. I parametri che influenzano i fenomeni di formazione dei polimeri sono la temperatura di trattamento ed il tempo di formazione. Il prodotto che si ottiene ha buone caratteristiche meccaniche, ottima capacità di adesione alle fibre e basso ritiro nel passaggio di stato liquido-solido. Un inconveniente è dato dal fenomeno di assorbimento di piccole quantità d'acqua che degradano le caratteristiche di resistenza alla compressione ed al taglio. Tali resine vengono utilizzate particolarmente con le fibre di vetro e quelle di carbonio. Possono, però, essere utilizzati altri tipi di resine: quelle poliestere termoindurenti, costituite da materie plastiche termoindurenti che solidificano con l'innalzamento della temperatura hanno discrete caratteristiche meccaniche fino a $250\text{ }^\circ\text{C}$, vengono adoperate specialmente insieme alle fibre di vetro e sono caratterizzate da un basso costo di produzione. Le resine termoplastiche sono utilizzate come matrici con temperatura massima di impiego di $250\text{ }^\circ\text{C}$. Quella più utilizzata, denominata PEEK (polietachetone), è adatta a resistere agli agenti corrosivi ed all'umidità, conservando buone caratteristiche meccaniche anche ad elevate temperature. Le resine termoplastiche sono meno resistenti ad alte temperature, ma più tenaci di quelle termoindurenti. Le resine poliammidiche, fenoliche e silicatiche, sono in grado di resistere a temperature di lavoro di circa $250\text{ }^\circ\text{C}$ con caratteristiche meccaniche non elevate.

Le matrici metalliche pongono problemi più rilevanti relativi all'interfaccia con le fibre, che richiede l'uso di metalli che sono liquidi a temperatura non compatibili con l'integrità delle fibre. Inoltre, possono generarsi reazioni chimiche con formazione di

composti in grado di danneggiare le fibre. Per facilitare l'operazione ed evitare danni, la penetrazione del metallo senza arrivare alla temperatura di fusione, avviene per diffusione atomico-metallica in fase solida. Il metallo viene interposto tra le fibre sotto forma di polveri o fogli sottili. Le reazioni chimiche pericolose vengono eliminate trattando chimicamente la superficie della fibra. Tali materiali sono ancora sperimentali, ma quelli più promettenti di sviluppi futuri sono i compositi di grafite-alluminio e grafite-magnesio.

I materiali a matrice ceramica sono molto promettenti, soprattutto nel campo transatmosferico, caratterizzato da elevate temperature. Le matrici migliori risultano quelle costituite da ossidi, boruri, nitruri, che solidificano allo stato cristallino o vetroso. Altri costituenti sono l'ossido di alluminio Al_2O_3 e la mullite, composta da alluminio, silicio ed ossigeno. Tali sostanze refrattarie, difficilmente fusibili, vengono formate consolidando polveri ceramiche mediante sinterizzazione dei costituenti sotto forma di polveri. Le matrici realizzate hanno un'elevata rigidità e resistenza meccanica, buona resistenza allo scorrimento a temperatura elevata e le materie prime sono poi poco costose. Si è poi pensato di fabbricare parti meccaniche ceramiche non rinforzate, che però presentano un'elevata fragilità. Per risolvere tale problema si rinforza la matrice con filamenti costituiti di materiale ceramico. Le fibre consentono di migliorare la resistenza alla frattura, bloccando la propagazione del difetto. Il materiale ottenuto rimane utilizzabile oltre i $1500^\circ C$, grazie alla sua tenacità.

Un altro materiale dalle caratteristiche simili al ceramico è quello noto come carbonio-carbonio, costituito da fibre di carbonio grafitico contenute in una matrice di carbonio amorfo. Esso viene ottenuto impregnando le fibre di grafite con una resina fenolica polimerica. Segue un riscaldamento del prodotto in atmosfera di gas inerte. Ripetendo molte volte tale procedimento a pressione e temperatura determinata si ottiene una struttura solida detta appunto carbon-carbon. Tale materiale ha una buona resistenza meccanica precisa ed un buon modulo elastico specifico che si mantiene inalterato fino a $2300^\circ C$. Non presenta, inoltre, punto di fusione poiché sublima a $3300^\circ C$ e si presta bene al modellamento complesso. Ha, però, come inconveniente l'ossidabilità della matrice, a cui si è cercato di porre rimedio utilizzando, come costituenti della matrice, carburi ed ossidi diversi.

Il notevole successo dell'utilizzo di tali materiali, in campo aeronautico per la costruzione di profili alari, fusoliere, carrelli ed altri componenti strutturali, è legato proprio alle suddette caratteristiche intrinseche che permettono di ottenere componenti

con elevate proprietà meccaniche specifiche. La possibilità di disporre il rinforzo nella matrice polimerica secondo direzioni prestabilite, in modo da privilegiare rigidità e resistenza in particolari direzioni, costituisce, infatti, un'opportunità unica nella progettazione e nella realizzazione di una struttura aerodinamica.

Tra le varie tecnologie di tipo infusion in uso per la realizzazione di elementi in materiale composito, si presterà particolare attenzione alla tecnologia *RIFT (Resin Infusion under Flexible Tool)*. In tale processo il controstampo viene sostituito da un sacco elastomerico adagiato sulle fibre e chiuso sullo stampo tramite l'utilizzo di sigillante. Il rinforzo viene compattato grazie alla depressione imposta all'interno del sistema da una pompa, che generando il vuoto all'interno del sacco permette l'infusione per effetto della differenza di pressione esistente tra l'interno del sacco e quella atmosferica.

Al fine di garantire la realizzabilità dei processi presi in considerazione si individuerà, testerà e validerà un programma di tipo FEM (Finite Element Method) in grado di simulare un processo di tipo infusion supportando così la parte analitica di previsione e ottimizzazione del processo di fabbricazione.

La fase di validazione sarà associata ad una stadio sperimentale iniziale i cui obiettivi saranno in primo luogo la realizzazione di una banca dati necessaria alle esigenze di input del codice FEM e successivamente il confronto tra i risultati reali e le previsioni di output del suddetto codice. Tale fase sarà eseguita scegliendo per la sperimentazione forme semplici e complesse, in modo da poter individuare eventuali problematiche di utilizzo del programma.

Terminata la fase di validazione, il programma sarà utilizzato per l'ottimizzazione dei processi di infusione di strutture reali di tipo aeronautico, per realizzare le quali si progetteranno e realizzeranno gli opportuni stampi di formatura necessari alla realizzazione dei particolari prescelti e di comprovare i risultati teorici ottenuti dal codice FEM.

CAPITOLO I

Resin Infusion Under Flexible Tooling

1.1 Introduzione

La tecnica RIFT (Resin Infusion under Flexible Tool) è una tecnologia a stampo chiuso, per la realizzazione di elementi in materiale composito, che grazie ad una depressione imposta all'interno della preforma in formato fibroso consente l'impregnazione della stessa con una resina in forma liquida. Tali caratteristiche comportano una riduzione del contatto dell'operatore con la resina allo stato liquido e con tutti i suoi componenti volatili emessi durante la messa in opera.

E' stato infatti dimostrato che lo stirene, componente volatile di resine di poliestere insaturo o vinilestere, ha effetti nocivi sui lavoratori, provocando depressione e affaticamento, con una riduzione del tempo di reazione e in alcuni casi sintomi psichiatrici. Nel 1990, fu imposto un limite di stirene di 50 p.p.m., in attesa di una legge che ne definisse la presenza massima con ulteriore diminuzione negli anni successivi. Tale tecnologia inoltre prevede l'utilizzo di un sacco elastomerico quale controstampo, ottenendo notevoli risparmi sul costo di realizzazione e mantenimento degli stampi.

1.2 Attrezzature per un processo RIFT

Le attrezzature usate nel RIFT sono:

- semistampo rigido;
- pompa per il vuoto;
- sacco;
- sistema di distribuzione della resina.

La scelta del materiale per lo stampo è dettata da criteri economici, quali il costo e la vita utile dello stesso e da valutazioni tecniche, quali la correttezza geometrica, la finitura superficiale e la temperatura di esercizio.

A seconda del materiale di cui è costituita la superficie della cavità, si possono distinguere i seguenti gruppi di stampi:

Stampi in materiale composito: sono realizzati con resina termoindurente (poliestere o epossidica) rinforzata con fibra di vetro. Il loro basso costo e la modesta vita utile li rende adatti a produzione di piccola serie.

Stampi elettroformati: sono rivestiti da una pellicola di nichel o cromo ottenuta per deposizione elettrolitica su di un modello e che costituirà la superficie di lavorazione dello stampo.

Stampi in metallo: i risultati dei prodotti realizzati evidenziano le ottime proprietà in termini di precisione geometrica e di finitura superficiale; sono adatti però per le produzioni a grandi serie poiché il loro costo è elevato.

Il sistema per creare il vuoto è costituito da una pompa e da una valvola di controllo associata ad un manometro per regolare le condizioni di vuoto che dovrà essere controllato in continuazione e questo non solo per verificare la tenuta delle guarnizioni, e quindi che non vi siano flussi d'aria nella cavità, ma anche per non raggiungere elevate percentuali di vuoto oltrepassate le quali, si potrebbe avere il passaggio da liquido a vapore per alcune sostanze.

Infine, tra lo stampo e la pompa per il vuoto, andrà installato un serbatoio di raccolta della resina in eccesso proveniente dallo stampo, per evitare che questa possa disturbare il funzionamento della pompa.

I sacchi utilizzati nel RIFT sono essenzialmente di quattro tipi: in nylon, in polypropilene, in gomma siliconica ed in polyetilene a bassa densità. Le proprietà, in base alle quali si giudicano i vari tipi, sono la rigidità, la resistenza ai solventi e la resistenza ai picchi esotermici delle resine.

Il distributore è elemento che consente di aumentare l'uniformità del processo di impregnazione e di ridurre i tempi di lavorazione.

1.3 Fasi del processo RIFT

Il ciclo produttivo di un processo RIFT può essere così suddiviso:

- pulitura dello stampo (figura 1.1);



Figura 1.1 – Fase di pulitura dello stampo.

- applicazione del sigillante (figura 1.2);



Figura 1.2 – Posizionamento del sigillante.

- applicazione del distaccante;
- posizionamento del rinforzo (figura 1.3);

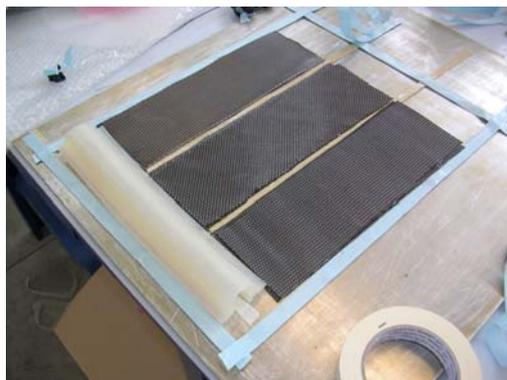


Figura 1.3 – Posizionamento del rinforzo.

- posizionamento del peel-ply e del sistema di distribuzione (figura 3.4);



Figura 1.4 - Posizionamento del peel-ply (a) e del sistema di distribuzione (b).

- chiusura con il sacco e sigillatura dei canali per il vuoto e l'iniezione (figura 1.5);

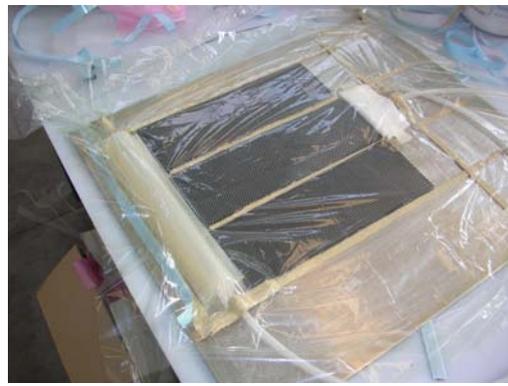


Figura 1.5 – Chiusura del sistema..

- iniezione e cura della resina (figura 1.6);

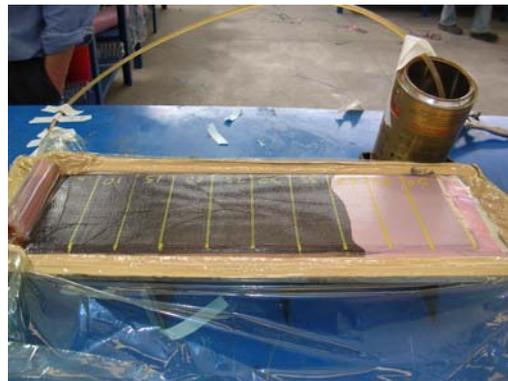


Figura 1.6 – Processo di impregnazione

- eliminazione del sacco, del peel-ply e del distributore ed estrazione del pezzo (figura 1.7);



Figura 1.7 – Estrazione del laminato.

- operazioni di rifinitura.

La pulitura dello stampo è un'operazione necessaria affinché non restino residui di precedenti utilizzazioni dello stampo, che possono compromettere la finitura superficiale dell'elemento prodotto e in alcuni casi addirittura modificarne il profilo. Successivamente il rinforzo si circonda di sigillante e si fa aderire il sacco allo stampo rendendo ermetica la tenuta.

L'applicazione del distaccante è una fase che, in genere, si ripete ogni dieci-dodici pezzi, ma, quando necessario, anche dopo la realizzazione di un singolo pezzo a seconda dell'entità del picco di temperatura durante le reazioni esotermiche di polimerizzazione, della complessità della forma dello stampo. In realtà, risulta visivamente evidente il momento in cui si deve effettuare il ripristino del distaccante e, cioè, quando si nota un aumento della opacità del pezzo finito.

Il posizionamento del rinforzo è la fase in cui bisogna posizionare le fibre. È conveniente utilizzare delle preforme in cui sistemare le fibre correttamente e che si adattano facilmente alla forma dello stampo. Successivamente, si pone, tra il rinforzo ed il distributore, il peel-ply che risulta permeabile al flusso di resina. Esso si distacca facilmente dal laminato, facilita l'apertura del sacco e consente di avere una superficie rugosa pronta per eventuali incollaggi. La chiusura dello stampo avviene stendendo direttamente il sacco sul distributore e facendolo aderire al sigillante.

Dopo aver chiuso lo stampo, si procede a creare il vuoto nella cavità per mezzo di una pompa e di una valvola di controllo, associata ad un manometro per regolare le condizioni di vuoto. La pressione atmosferica agirà sul sacco che comprimerà il rinforzo. Successivamente, si introdurrà la resina che, sotto la spinta della pressione atmosferica, impregnerà il rinforzo. La resina deve essere introdotta senza ulteriore

pressione, altrimenti si eliminerebbero gli effetti della compressione e compattazione delle fibre prodotti dal vuoto. Impregnato il rinforzo, si chiude la valvola di mandata della resina; raggiunto il gel-time, necessario per la gelificazione della resina, si spegne la pompa. Dopo la polimerizzazione, seguiranno le fasi di eliminazione del peel-ply e del distributore, infine, quelle di estrazione e rifinitura del pezzo.

1.4 Sviluppo storico del processo RIFT

Nonostante il recente interesse per il processo RIFT, esso è noto già dal 1950 ed è considerato una chiara alternativa per economizzare nella produzione di compositi di dimensioni medio-grandi.

Il metodo Marco [1] fu ideato negli USA per la manifattura delle carene delle barche: tale sistema prevedeva l'utilizzo di uno stampo maschio rigido, sul quale avveniva la deposizione del rinforzo e sul quale avveniva la stesura di uno stampo femmina semiflessibile che occorreva per compattare e sigillare il rinforzo una volta creato il vuoto.

Successivamente, nel 1972, il Group Lotus Car [2] brevettò un metodo per la produzione di componenti per auto in materiale composito. Il processo consisteva nel disporre le fibre asciutte in uno stampo rigido; prima della chiusura dello stampo veniva versata una quantità di resina sulle fibre la quale penetrava in esse una volta praticato il vuoto.

Nel 1978, Gotch [3] migliorò il metodo dell'impregnazione con il vuoto, usando una parte dello stampo rigida e un'altra costituita da un sacco di gomma di silicone. La resina liquida era versata sul rinforzo asciutto prima di essere anch'essa ricoperta col sacco. La qualità dello stampaggio era migliore di quella che si otteneva con la disposizione a mano di fibre e matrice e non richiedeva manodopera specializzata.

Il disegno del sacco elastomerico fu cambiato successivamente con un semistampo rigido, per produrre forme complesse attribuendo comunque i difetti che si riscontravano alla elevata viscosità della resina utilizzata e alla geometria della preforma, che aumentavano il tempo di riempimento e creavano problemi di polimerizzazione.

Nel 1980, Gotch [4, 5] accentuò nuovamente il problema di riconoscere livelli di vapori di stirene più bassi negli ambienti di lavoro, che già erano imposti nei paesi CEE.

Egli perfezionò ulteriormente il suo metodo del semistampo, costituito dal sacco in silicone, usando il vuoto come la pressione che agisce sulla resina per l'impregnazione e

suggerì che la viscosità ideale della resina, per un sistema di iniezione sotto vuoto, era di 100-200 mPa·s.

I sistemi sviluppati commercialmente hanno previsto viscosità simili. Inoltre, Gotch notò che le proprietà dei compositi ottenuti con tale metodologia erano meno variabili rispetto ai valori ottenuti ripetendo esperimenti con il metodo di disposizione a mano.

Nel 1982, Allen [6] considerò l'uso dell'infusione sottovuoto per la produzione di compositi con elevato contenuto di fibre disposte in stampi di alluminio; si dimostrò che, anche sotto basse pressioni come 1 bar, era possibile ottenere compositi avendo utilizzato frazioni volumetriche di tessuto di vetro oscillanti tra il 43% e il 60% e resine vinilestere.

Nello stesso anno, Le Comte [7] brevettò il suo *Metodo e apparato per produrre un articolo sottile di resina sintetica*. Il brevetto ha un disegno simile al metodo Marco: il tessuto di rinforzo è compresso sottovuoto tra una faccia dell'utensile rigida e un'altra flessibile. Il metodo può essere usato per la produzione di carene plastiche di barche rinforzate con fibre di vetro [8].

Le Comte ha prodotto carene di navi aventi superfici di 50 m², usando questo metodo, sollevando la resina a 4-5 metri per metterla in pressione. L'infusione richiedeva, approssimativamente, 10 ore di tempo e la solidificazione della resina avveniva alla temperatura ambiente di 18-20°C.

Nel 1985, Tengler [9] realizzò, attraverso un processo d'iniezione sottovuoto, dei compositi aventi una elevata resistenza grazie all'utilizzo di fibre di carbonio disposte in uno stampo di alluminio accuratamente chiuso con sigilli di analogo materiale per favorire il vuoto all'interno che a sua volta favoriva il fluire della resina e quindi l'impregnazione. Non si riuscì ad utilizzare percentuali volumetriche di fibre superiori al 35% a causa della viscosità della resina epossidica e i bassi tempi di solidificazione.

Adams e Roberts [10, 11] utilizzarono invece degli stampi rivestiti al nichel per la produzione di laminati con il metodo Vacuum Assisted Resin Injection. Questo processo fu sviluppato nel 1970, una volta evacuata l'aria dalla cavità dello stampo, il consolidamento avveniva per la sola pressione atmosferica senza sistemi di serraggio e con conseguente risparmio economico. Fu utilizzato questo metodo per la produzione di pannelli di protezione laterale delle automobili Lotus.

Ciba-Geigy [12] pubblicarono dettagliatamente una loro metodologia di infusione sottovuoto per la manifattura di un alettone di un aliante. Lo stampo era realizzato da una componente femmina rigido e da una componente maschio flessibile costituito da

un sacco di nailon. Praticando il vuoto nella cavità dell'utensile, la resina rifluisce all'interno dello stampo garantendo efficienza e qualità alla produzione, oltre ad una maggiore sicurezza per la salute degli addetti alla lavorazione rispetto alla tradizionale disposizione a mano. Lo stampo femmina era costituito internamente da un circuito nel quale scorreva un olio che fungeva da fluido di riscaldamento o raffreddamento, mentre il sacco, che poteva essere anche di silicone o PVC, veniva sigillato ai bordi comprimendo tutta la sua circonferenza con un telaio di alluminio serrato con degli stringenti. La resina epossidica, di bassa viscosità, entrava nello stampo attraverso un canale periferico ed impregnava la preforma partendo dai bordi verso il foro centrale collegato alla pompa del vuoto, furono prodotti così componenti di buona qualità.

Nel 1989 e 1990, Hayward e Harris [13, 14] studiarono gli effetti del vuoto in uno stampo per RTM e constatarono notevoli miglioramenti nella finitura superficiale del laminato e nella sua resistenza flessionale. I benefici erano dovuti, in particolar modo, alla riduzione delle soffiature nel laminato indipendentemente dalla depressione applicata. Gli autori rilevarono l'importanza di non applicare più il vuoto una volta riempito lo stampo, per evitare la vaporizzazione dello stirene in eccesso, anche se, con un vuoto modesto nel sacco, si riduceva inevitabilmente la pressione di compattazione sul rinforzo.

Boey[15], nel 1990, e Boey e Lin [16], nel 1991, usarono le tecniche di infusione con sacco sottovuoto per studiare come ridurre la formazione di bolle d'aria nel composito. Essi ritrovarono, come risultato, un contenuto di soffiature pari all'1.3% con notevoli proprietà meccaniche del laminato, avendo potuto disporre correttamente il rinforzo asciutto di fronte al canale di iniezione della resina. Lo schema del tipo di attrezzatura utilizzata da Boey per il RIFT è mostrato in figura 1.8.

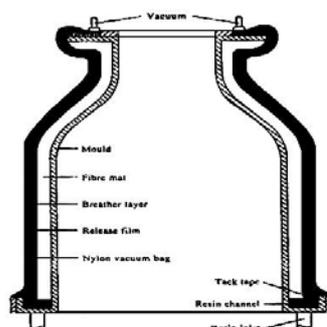


Figura 1.8 – Attrezzatura utilizzata da Boey per il RIFT.

I metodi tradizionali di produzione di imbarcazioni in composito sono i processi a stampo aperto con immissione di resina mediante formatura per contatto a mano o a spruzzo, nei quali il componente organico volatile (VOC) è piuttosto elevato: si produce emissione di stirene di circa il 14% nella prima e del 25% nella seconda.

Per migliorare la qualità dell'aria, sebbene con aumento dei costi di produzione, bisogna passare dai processi con stampo aperto a quelli con stampo chiuso [17, 18]. Tra questi, il VBM elimina più del 90% delle emissioni VOC prodotte da resine insature poliestere, oltre a ridurre il peso del prodotto, ottenendo migliore qualità grazie alla compressione degli strati di mat e all'espulsione dell'aria nel formare il vuoto. La tecnologia del sacco è una delle più vecchie e versatili fra i processi con stampo chiuso usati per la fabbricazione di compositi. Tale processo ha differenti versioni: il sacco in pressione, il sacco a vuoto, l'autoclave e lo SCRIMP.

Il metodo del sacco a vuoto (VBM) e lo SCRIMP sono spesso usati per produrre grandi compositi con geometria complessa, come gusci e cabine di barche [19]. Per la relativa economicità dell'attrezzatura, per il buon impatto ambientale e per la possibilità di produrre grandi pezzi di geometria complessa [20], rappresentano la migliore alternativa ai tradizionali processi di formatura con stampo aperto. La tecnica del VBM a stampo chiuso è, quindi, una valida alternativa anche riguardo i costi per processi a stampo aperto. Seemann [21 – 24], nel 1991, brevettò in Europa e negli Stati Uniti il metodo denominato Seaman Composites Resin Infusion Moulding Process (SCRIMP): il processo è simile alle altre tecniche di infusione sottovuoto, in cui il laminato è ricoperto da un sacco di nylon. La resina fluisce dentro lo stampo in seguito al vuoto generato in esso; l'aspetto innovativo dello SCRIMP è l'utilizzo di una maglia guida che distribuisce la resina all'interno. Si può così considerare lo SCRIMP come una versione del VBM, in cui una rete di scanalature o canali in un mezzo ad alta permeabilità serve a distribuire la resina e a ridurre le perdite di carico ed il tempo di riempimento. Nel VBM un lato dello stampo rigido ed il sacco sono usati per formare la cavità. La resina riempie i canali prima grazie al vuoto che si è creato e poi infonde nella preforma di fibre.

Nelle industrie si adoperano numerose versioni delle tecniche del sacco a vuoto: 24 brevetti sono stati rilasciati dal 1959 al 1995. In essi scanalature, canali, corpi ad alta permeabilità o reti sono usati per ridurre la resistenza all'infusione di resina e per il controllo delle traiettorie del flusso.

Nel processo VBM si eseguono le operazioni di prestampaggio, pulitura della superficie dello stampo, applicazione del distaccante e di uno strato di gel spruzzati sulla superficie dello stampo stesso. Durante il caricamento del rinforzo, il mat asciutto viene sistemato nello stampo e coperto dal sacco flessibile, la cavità è sigillata con nastri o con altre tecniche per formare il vuoto ottenendo reti di canali o scanalature. La cavità dello stampo è sotto vuoto e la resina infonde nel mat sotto la forza di pressione del vuoto; dopo che la cavità viene riempita, la resina viene accuratamente trattata e solidifica costituendo parte del composito (è la fase del trattamento della resina). Infine il composito viene estratto dallo stampo. Per un completo riempimento dello stampo, le posizioni di iniezione e di sbocco devono essere adeguate e le temperature di resina e stampo tali da evitare la gelificazione durante l'infusione, mentre la struttura e la sequenza degli strati di fibre determinano la qualità del prodotto finale. Lo SCRIMP è spesso usato per fabbricare compositi di grandi dimensioni e geometria complessa; per cui è difficile ottenere un valido sistema di prova ed errore variando il disegno dello stampo ogni volta che, durante i test, si riscontrano difetti per incompleto riempimento e trattamento non uniforme [25 – 27].

Nello SCRIMP particolare attenzione è rivolta al controllo e all'ispezione del sacco dopo aver fatto il vuoto e prima dell'iniezione della resina per verificare la sua perfetta tenuta e l'assenza di buchi e lacerazioni [24]. Per evitare la presenza di zone secche (non impregnate) si lascia circolare la resina nello stampo anche dopo il termine del processo [24]. Considerevoli spese ed i lunghi tempi richiesti da tale metodo ostacolano un ampio uso del VBM (sacco a vuoto).

Il modo migliore per risolvere il problema dello studio e della sperimentazione del flusso di resina attraverso i mat, è l'utilizzo del metodo degli elementi finiti per un dato volume di controllo (FECVM). Tale simulazione si avvale del disegno e produzione assistiti da calcolatore (CAD/CAM).

Sono stati sviluppati molti modelli di flusso, basati su equazioni di bilancio di massa e di energia per simulare processi di riempimento dello stampo durante l'iniezione di resina (RTM). Si è così ricavato il fronte di flusso ed il tempo di riempimento, una volta fissati i punti di iniezione e sbocco, le temperature di resina e stampo, la portata di resina, la pressione di iniezione, la porosità e permeabilità delle fibre e la geometria dello stampo. Trascurando il flusso nella direzione dello spessore, nei codici dei computer si considerano modelli di flusso detti 2½D, sviluppati da Young ed altri [28], riducendo notevolmente il tempo computato per la simulazione con accettabile

accuratezza dei risultati [29, 30]. I processi di infusione di resina nel VBM sono simili ai processi di riempimento dello stampo mediante RTM, ma bisogna considerare il flusso di resina nei canali tra le fibre mat e la loro comprimibilità.

Un modello di flusso 2D, valido per la tecnologia di stampaggio per iniezione di resina con sacco a vuoto (VBRTM) in strati ad alta permeabilità (HPL) [31], ed uno 2½D, valido per lo SCRIMP, dividono il dominio simulato in due regioni: una satura (HPL) con canali liberi da fibre ed una insatura con fibre mat (massa porosa di materiale). Nel processo VBM domina l'infusione di resina dai canali della prima regione alle fibre mat della seconda.

Lee e Han [32, 33], basandosi sul lavoro di Beavers e Joseph [34], semplificarono la simulazione ad una sola regione utilizzando il principio della lubrificazione ed una permeabilità equivalente per calcolare il flusso nei canali.

In un recente studio, è stato utilizzato un modello di colaggio semplificato per descrivere il flusso nei canali [35], in cui viene proposto un modello di flusso ibrido tra 2½ D e 3 D [35, 36] per simulare i processi di SCRIMP in cui si considera anche il flusso trasversale nella direzione dello spessore della preforma di fibre senza richiedere l'eccessiva memoria di calcolo del modello 3D che ne ostacola l'utilizzo industriale semplificando l'infusione di resina attraverso la rete ad un flusso in un canale del mezzo poroso. Tale modello può essere usato per ottimizzare il disegno dei processi di infusione di resina per la produzione di compositi. La comprimibilità delle fibre determina variazioni dello spessore, della porosità e della permeabilità dei rinforzi in seguito a variazioni della pressione di compattazione locale agente sulle fibre stesse: prima dell'infusione di resina (assunta incomprimibile) c'è un vuoto di pressione costante nell'intera cavità con minimo spessore e minima porosità, poi durante l'infusione il vuoto di pressione decresce localmente con la propagazione della resina a causa delle perdite di carico. La resina prima riempie i canali liberi da fibre poi diffonde nei canali adiacenti ed infine permea la zona dei rinforzi mat. In accordo ai risultati simulati furono fabbricati in sottoscala, usando la tecnologia SCRIMP, gusci in composito risultando tale simulazione in buon accordo coi risultati sperimentali. Lo stampo del guscio con il suo dominio simulato (modello degli elementi finiti) è mostrato in figura 1.9.

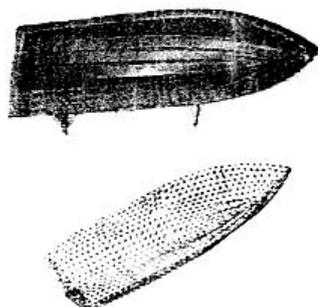


Figura 1.9 – Stampo dello scafo simulato al F.E.M.

Nell'esperimento si usavano due tipi di canali: uno ottenuto da un filo di bronzo a spirale avvolto su una bacchetta di metallo, l'altro da fibre tagliate e disposte in modo random su una bacchetta incurvata nello stampo con una minima quantità di resina poliestere applicata per solidificarle. La preforma di fibre del guscio in composito era formata da due strati di mat bidirezionale ed uno di mat random, la pressione di compattazione delle fibre era 0.09 MPa in ingresso e 0.012 Mpa in uscita e la viscosità della resina 0.247 Pa·s alla temperatura ambiente. Furono sperimentati quattro diversi disegni di stampo mostrati in figura 1.10.

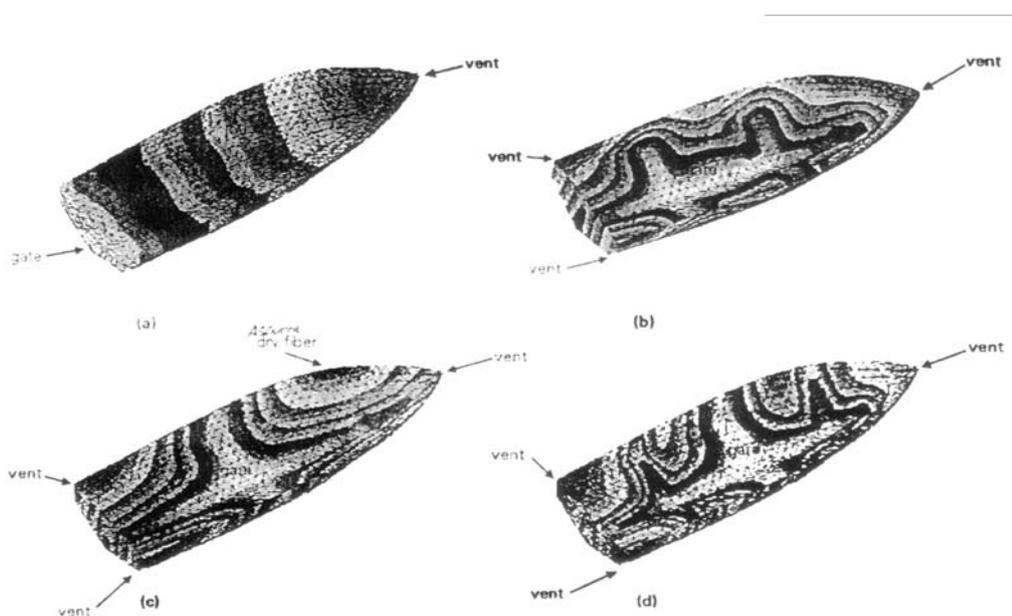


Figura 1.10 – Disegno del flusso nello stampo al variare dei punti di iniezione.

- con ingresso resina a poppa del guscio ed uscita a prua si aveva una traiettoria del flusso semplice ed uniforme senza scanalatura ma con elevato tempo di riempimento (più di 60 min.) per cui la resina gelificava durante l'infusione prima del completo riempimento;
- con una scanalatura latitudinale (dalla poppa alla prua) e due longitudinali si riduceva il tempo di riempimento e si eliminava ogni difetto di riempimento, risultava quindi il miglior disegno di stampo per la fabbricazione di gusci in composito;
- con ingresso nel punto di incrocio tra la scanalatura longitudinale e quella latitudinale si riscontravano alcuni difetti di riempimento;
- con tre scanalature latitudinali ed una longitudinale si otteneva un minor tempo di riempimento dei precedenti ma più complesse traiettorie del flusso.

Tali risultati rilevati dalle simulazioni erano in accordo con i dati sperimentali.

Questo processo è stato utilizzato per produrre carene di barche di 15 metri in un singolo processo di iniezione.

La resina, iniettata dopo aver creato il vuoto, passa prima attraverso un distributore che provvede a far avvenire l'impregnazione contemporaneamente su tutta la superficie del rinforzo con un flusso diretto normalmente al piano di giacitura delle fibre.

La caratteristica principale che differenzia lo SCRIMP dalle altre tecnologie risiede nell'uso di un mezzo che distribuisce la resina rapidamente su tutta la superficie del rinforzo, lasciando che il flusso di resina, sotto l'azione del vuoto creato dalla pompa si sviluppi solo trasversalmente, cioè solo lungo la sezione. Questo avviene perché la permeabilità longitudinale della resina nel rinforzo è trascurabile rispetto alla permeabilità longitudinale della stessa resina nel distributore [37].

Il brevetto di Bill Seemann è riferito ad un mezzo di distribuzione, un tessuto a maglia che incorpora una rete incrociata di canali di distribuzione, che viene posto su entrambi i lati del rinforzo, al di sopra del peel-ply, in modo che si possa raggiungere rapidamente una bagnatura completa e precisa (per laminati sottili una delle maglie, quella dal lato dello stampo rigido, può essere non inserita). Come detto, sotto il distributore si inserisce il peel-ply, permeabile alla resina e facilmente staccabile dal

rinforzo, in modo che la resina in eccesso ed il distributore possano essere rimossi dopo la polimerizzazione, per poi essere di nuovo utilizzato.

Il costo del distributore costituisce però un punto debole per tale processo, infatti terminata l'infusione e polimerizzata la resina il distributore dovrà essere ripulito per ulteriori utilizzi, ma l'operazione di pulizia fa aumentare i costi del processo. Per tale motivo si stanno sviluppando processi con diversi distributori molto economici che non si riutilizzano e che vengono buttati dopo la polimerizzazione.

Con la maggior parte di questi distributori l'impregnazione avviene parzialmente per un flusso di resina in direzione normale al piano del rinforzo e per la restante parte per un flusso che si muove attraverso le fibre nel piano delle fibre stesse.

La finitura superficiale conseguibile con lo SCRIMP può essere influenzata dall'elevato livello di vuoto e dalla presenza del distributore.

Lazarus [38] sottolineò il bisogno di migliorare i sistemi di iniezione e di minore viscosità e maggiore tempo di polimerizzazione della resina per fabbricare pezzi più larghi e spessi a temperatura ambiente.

I costi di tale metodologia sono comunque elevati riducendo i benefici ottenuti dalla riduzione dei tempi rispetto alla disposizione a mano, infatti la maggior parte dei tubi di gomma impiegati, tutto il peel-ply, la membrana di distribuzione della resina e il sacco flessibile dopo ciascuna infusione perdono la loro utilizzabilità, costituendo un costo supplementare. Pfund [39] sostenne però che si riduceva il costo della manodopera per ogni pezzo prodotto rispetto alla disposizione a mano che richiedeva operai specializzati. Fu Seemann [40, 41] a brevettare per primo un sacco elastomerico riutilizzabile da impiegare nello SCRIMP. Esso incorpora una membrana di distribuzione e un tubo di immissione di resina migliorando l'efficienza di una produzione di stampaggio in serie.

Nel 1993 Senibi ed altri [42] sostennero le tesi di Hayward e Harris, dimostrando che l'applicazione del vuoto durante un processo RTM riduceva le microcavità nel laminato realizzato con matrice epossidica e fibre di grafite con percentuale volumetrica inferiore al 53% ed incrementava la velocità di impregnazione della resina senza formare altre microcavità. Nel 1993 Barnes [43 – 45] sviluppò un sistema ibrido simile allo SCRIMP per la riparazione e il rinforzo di strutture di acciaio. Il substrato di acciaio si comporta efficacemente come la superficie di uno stampo rigido anche se è richiesto uno strato di adesivo all'interfaccia, il rappezzo avviene grazie a fibre di carbonio ad elevata percentuale volumetrica direttamente sulla struttura preparata con resina epossidica.

Lazarus [46] nel 1995 ha presentato i risultati una ricerca sull'infusion nella costruzione di carene di barche, confermando la teoria di Seemann secondo cui il processo di infusione della resina dura circa 1 ora per carene lunghe 13-18 metri ma che per deporre accuratamente il rinforzo bisognava assumere due uomini per dieci giorni, per assicurare una disposizione degli strati corretta.

L'aspetto fondamentale nello SCRIMP è il modello che prevede canali attraverso i quali la resina può espandersi sopra l'area del laminato e infondere nel tessuto. Questi ultimi sono mantenuti a contatto tra loro e in maniera stabile usando particolari adesivi tipo aerosol.

Lazarus descrisse tre metodi di processi per infusione di resina che attualmente sono ancora utilizzati nell'industria:

- Sandy Martin [47] usò il “Processo della Spatola” per la costruzione di canoe sopra i cinque metri di lunghezza, adottando una combinazione di materiali che includevano fibre di carbonio, kevlar, PVC, resina epossidica e vinilesteri. Posizionate le fibre asciutte sopra un mantello di gel e ricoperto il tutto con uno strato di peel ply, si pratica il vuoto nello stampo in modo da far scorrere la resina catalizzata all'interno costringendola ad impregnare anche i punti più difficili a causa di geometrie complesse. Il processo è rallentato rispetto allo SCRIMP richiedendo operatori che distribuiscono la resina nel rinforzo con delle spatole, ma è semplice e si è evoluto attraverso l'esperienza piuttosto che la ricerca scientifica.

- Il VARTM [48] (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) è correttamente considerato in competizione con lo SCRIMP per i progetti realizzati dalla US Navy. Pfund conferma che la US Navy utilizza tale metodo per la costruzione di navi di medie dimensioni, in particolare di tipo militare categoria Corvette.

Resin Injection Recycling method (RIRM) [49] sviluppato dal Structural Composite per la marina militare USA è un sistema di iniezione sottovuoto che utilizza un semistampo femmina rigido.

Il RIFT è stato sviluppato industrialmente, mentre la comunità accademica si è concentrata sulla sperimentazione dei metodi più tradizionali: RTM, VARTM e il sistema di infusione con sacco a vuoto in autoclave.

I limiti del metodo RIFT derivano da alcuni parametri chiave: massimo contenuto di fibre, quantità di resina fluente nella preforma, permeabilità, viscosità, livello di vuoto applicato, combinazione di rinforzo e di resina, qualità del laminato. Alla compressione iniziale del rinforzo asciutto segue la sua compattazione per effetto lubrificante della

resina che lo impregna, ciò si osserva dal rilassamento delle tensioni che tendono ad aprire lo stampo.

Nell'RTM il fluido nel permeato viene ben documentato [50, 51]: la quantità di resina scorre nel rinforzo proporzionalmente al gradiente di pressione ed inversamente alla viscosità della resina (equazione di Darcy), la cui costante di proporzionalità è nota come permeabilità. Essa varia con l'architettura del rinforzo (equazione di Kozeny-Carman) ed il raggio idraulico (superficie bagnata dal fluido), diminuisce all'aumentare della percentuale di fibre e della loro compattazione [52].

Uno studio preliminare sulle relazioni tra processo, proprietà e microstrutture è stato riportato dal Griffin [52, 53].

Applicando il vuoto si è ridotto il contenuto di cavità nel laminato e migliorata la resistenza flessionale [54] ciò dipende dal metodo di distribuzione della resina [55, 56] che determina anche la qualità del laminato.

1.5 Sviluppo storico dei modelli teorici.

Per comprendere il comportamento del flusso di resina attraverso il rinforzo, molti ricercatori [28, 40] hanno condotto studi per realizzare modelli matematici che descrivessero e spiegassero tale fenomeno, valutando il coefficiente di permeabilità in funzione delle proprietà del fluido, della struttura del rinforzo e della percentuale volumetrica di quest'ultimo.

Tali modelli si basano in gran parte sulla legge di Darcy [57 – 60], che descrive il flusso macroscopico di un fluido attraverso un mezzo poroso e che ha validità tenendo conto di due ipotesi:

- La resina è considerata incomprimibile (fluido Newtoniano e basso numero di Reynolds) ;
- la deformazione indotta nella preforma dal flusso durante l'iniezione è trascurabile (fibre stazionarie).

In realtà, la preforma tenderà comunque a deformarsi alterando l'assetto delle fibre. Ciò può indurre la formazione, lungo le pareti dello stampo, di canali nei quali la resina potrà scorrere velocemente raggiungendo il foro di uscita senza aver impregnato le fibre. Sarà quindi opportuno, in fase di progetto dello stampo, valutare l'influenza della deformazione della preforma.

La legge di Darcy può scriversi nella forma:

$$Q = \frac{K \cdot \Delta p \cdot \sigma}{\mu \cdot L}$$

ove σ è l'area della sezione di passaggio, L la lunghezza del percorso del fluido, μ la viscosità del fluido e K la permeabilità che, in genere, varia a seconda della preforma utilizzata e può essere ottenuta, per un letto granulare attraversato da fluido Newtoniano, dall'equazione di Kozeny-Carman [58, 59].

Carman e Kozeny [61, 62] hanno modellato un mezzo poroso come una serie di tortuosi canali e la loro equazione [63] può essere utilizzata per legare la permeabilità K di un fascio di fibre alla percentuale di vuoti Φ , al diametro delle fibre D_f e ad un parametro k chiamato costante di Kozeny:

$$K = \frac{D_f^2}{16k} \cdot \frac{\Phi^3}{(1 - \Phi)^2}$$

La costante di Kozeny tiene conto della tortuosità e della forma capillare ed, in accordo con la teoria di Carman, può ritenersi pari a 5 per la maggior parte dei rinforzi. Tale equazione è stata inizialmente sviluppata per mezzi granulari [64] per poi essere assunta anche per mezzi fibrosi. La permeabilità così calcolata è valida per mezzi isotropici, proprietà sicuramente non valida, per esempio, per rinforzi unidirezionali, nei quali la permeabilità trasversale è molto più bassa di quella longitudinale.

Molti studi hanno calcolato la permeabilità trasversale accostando all' equazione di Kozeny–Carman quella di Darcy e hanno usato la costante di Kozeny come un parametro regolabile, ottenendo un' ampia gamma di risultati [65 – 69] di k in funzione di Φ , presentati graficamente nel diagramma di figura 1.11.

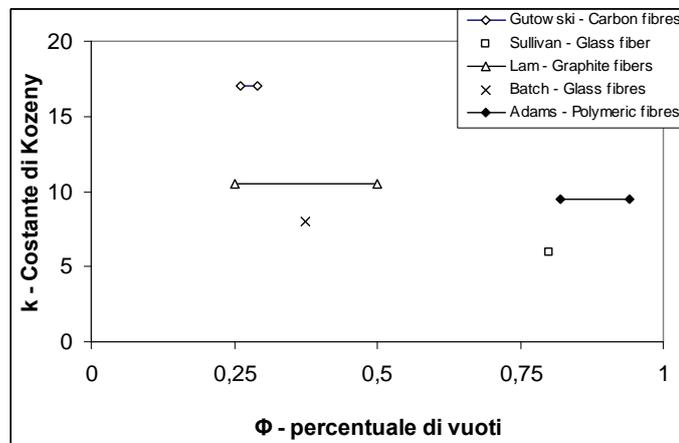


Figura 1.11 – Diagramma rappresentativo di alcune modifiche al valore della costante di Kozeny

È immediato notare come i risultati riportati assumano valori più alti del valore proposto da Kozeny; Dullien [70] ha suggerito che tale effetto è dovuto alla disomogeneità dei vuoti, per compensare la quale è possibile incrementare la costante di Kozeny fino ai valori rilevati. La frazione dei vuoti dipende, in alcuni casi, anche dalla forza di compressione applicata sul rinforzo. Alcune ricerche hanno proposto modelli per descrivere il legame tra i vuoti e tale forza [66, 71 – 74].

Molte sono state le variazioni [43, 47] portate alla formula per determinare il valore della permeabilità in un letto fibroso per flussi paralleli e ortogonali alla direzione delle fibre. In particolare Gutowski et al. [75] hanno proposto una modifica all'equazione nel caso di rinforzo unidirezionale, correggendo la costante di Kozeny in funzione della direzione analizzata.

Un fattore di disturbo sia per l'equazione di Kozeny–Carman che per le sue versioni modificate [75] è rappresentato dal fatto che la permeabilità trasversale è maggiore di zero per frazioni volumetriche di fibre più elevate di quella teorica massima, ottenuta quando le fibre toccandosi una con le altre bloccano il flusso trasversale. Tale problema è stato discusso da Gutowski et al. [66] che hanno proposto un modello euristico:

$$K = \frac{R^2 \left(\sqrt{\frac{V'_a}{V_f}} - 1 \right)^3}{4k' \frac{V'_a}{V_f} + 1}$$

In cui V'_a e k' sono parametri empirici e V_f è la percentuale volumetrica di fibre. Alcuni studi hanno inoltre evidenziato che la costante di Kozeny può variare per lo stesso rinforzo al variare della frazione volumetrica di fibre [76].

Nel VARTM, la frazione volumetrica delle fibre varia dinamicamente come la pressione applicata. È dunque importante modellare la compattazione del rinforzo e la sua relazione con la frazione volumetrica delle fibre come una funzione della pressione applicata.

Molti gruppi di ricerca [77 – 84] hanno esaminato gli effetti della compattazione sulla frazione volumetrica delle fibre. Il lavoro iniziale di Van Wyk [85] esaminò il comportamento delle fibre nei materiali naturali. Chen e Chou [86 – 89] hanno esaminato la compattazione di preforme mono e multi strato per descrivere in generale il fenomeno, ma l'equazione comunemente usata come modello fu sviluppata da

Gutowski [90]. Tale equazione, ricavata per fibre unidirezionali e poi estesa alle altre tipologie di rinforzo, assume la forma:

$$\sigma = A \frac{\frac{V_f}{V_o} - 1}{\left(\sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^4}$$

In cui σ è la pressione nella preforma, A una costante empirica, V_f la frazione volumetrica di fibre, V_a la frazione volumetrica massima di fibre e V_o la frazione volumetrica di fibre per carico nullo. Tale formula si basa sull'osservazione [66, 91] che la massima percentuale di vuoti corrisponde all'assenza di carico sul rinforzo e la minima percentuale corrisponde a un valore di carico infinito.

Sangani e Yao [92] presentarono una tecnica numerica per prevedere la permeabilità orizzontale e trasversale, mentre Bruske [93] fornì per la determinazione di K un nuovo modello che portava alla generazione di una particolare matrice e la cui teoria si basava sul fatto che la permeabilità non fosse costante.

Alcuni studi hanno riportato che il comportamento del flusso di un fluido Newtoniano in condizioni di impregnazione sature e non sature differisce dalla legge di Darcy, perché la permeabilità è funzione della porosità, della velocità superficiale e della caduta di pressione [39, 44, 45].

Chan [94, 95] ha valutato la dipendenza della permeabilità dalla velocità superficiale anche a basse pressioni d'iniezione, dove sia i fenomeni d'inerzia che la deformazione del rinforzo sono trascurabili, spiegando il fenomeno con l'interazione tra macro e micro flusso.

1.6 Micro e Macroflusso

È importante a questo punto chiarire la presenza di due flussi all'interno del processo di impregnazione, uno macroscopico, che interessa le regioni tra le fibre, ed uno microscopico, che viceversa interessa la parte interna delle fibre. Tali flussi portano all'individuazione di due zone, dette satura ed insatura, il cui diverso grado di impregnazione è evidenziabile tramite la figura 1.12.

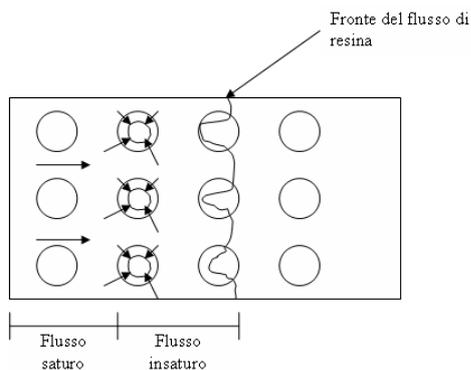


Figura 1.12 – Flusso Saturo e flusso insaturo.

Il rinforzo crea una doppia porosità dovuta alla presenza di vuoti tra i fasci delle fibre. Appena la resina è iniettata nello stampo le fibre vicino all'iniezione si impregnano prima rispetto a quelle successive. Finché la resistenza al flusso nelle fibre è elevata, la resina all'interno delle fibre è stazionaria rispetto al flusso di resina che viaggia nei vuoti intorno alle fibre.

Quindi la resina intrappolata dai fasci di fibre vicino all'iniezione è relativamente vecchia rispetto a quella intrappolata dai fasci di fibre successivi vicini al fronte di flusso (cosa sostenuta da un esperimento fatto da Shin e Lee [96] dove un liquido chiaro, seguito da uno scuro, è stato iniettato in un rinforzo unidirezionale). Questo comporta una profonda differenza nelle equazioni di tale modello rispetto ad un modello uniforme, come nel caso del mat in cui l'assenza di resina intrappolata dai fasci di fibre, porta la resina più vecchia sempre vicino al fronte di flusso, continuamente spinta in avanti dalla nuova resina in arrivo.

La presenza di una regione insatura dietro al fronte di flusso in un flusso non uniforme implica un flusso in due fasi. Nonostante tutti i tentativi nello studio del trasporto medio non è stato possibile ottenere un gruppo di equazioni che spieghino il fenomeno.

In accordo con gli studi di Patel et al. [97], se il flusso di resina tra i vuoti è più veloce del processo di assorbimento nei fasci di fibre, comporta che aria sia intrappolata nei fasci di fibre.

Le bolle d'aria comportano delle fessure nei fasci di fibre mentre nei vuoti sono più piccole e più facilmente rimuovibili, inoltre nei vuoti il volume occupato è minore del 5% dell'intero fluido e pertanto trascurabile [97 – 99], tenendo anche conto che la viscosità dell'aria è molti ordini di grandezza inferiore a quella della resina. Non trascurabile invece è l'aria intrappolata nei fasci di fibre che incide sulle equazioni della

continuità. Tale problema è però eliminato in quelle tecnologie che producono il vuoto nella cavità in cui verrà iniettata la resina.

La maggior parte dei modelli studiati per l'analisi del flusso nell'RTM considera solo gli effetti della struttura macroscopica della preforma con i classici metodi di flusso attraverso un mezzo poroso. Alcuni tentano di considerare gli effetti della microstruttura della preforma analizzando la formazione di vuoti [100, 101], e in un caso sono state modellate le interazioni chimiche tra la preforma e la resina [102]. È comunque di ampio consenso il fatto che l'analisi macroscopica sia la più importante e il punto di partenza per le altre. Sono stati realizzati anche numerosi esperimenti i cui risultati sono però soggetti ad una significativa incertezza dovuta alla non uniformità dei materiali, a eventi accidentali non facilmente controllabili e alle diverse tecniche di misura.

L'approccio tipico usato è, come detto, la legge di Darcy, relazione dimostrata essere valida nel flusso saturo in un mezzo poroso [103], anche se alcuni studiosi (Adams [104, 105], Fracchia [106] e Williams [107]) a seguito di opportuni esperimenti concordano sulla sua validità anche nella zona insatura, mentre altri (Molnar [108], Trevino [109] e Martin e Son [110]) hanno riscontrato significativi scostamenti dalla legge di Darcy. In particolare Martin e Son [110] e Williams et al. [107] sostengono che la permeabilità assume un valore, nella zona insatura, del 20% più alto rispetto alla zona satura.

La permeabilità pur essendo, come risulta dalla formula di Kozeny, una caratteristica del rinforzo, è in stretta correlazione con la velocità di avanzamento del flusso con cui aumenta proporzionalmente.

Da un'osservazione a livello microscopico del meccanismo di infiltrazione della resina attraverso il rinforzo, è possibile fornire una spiegazione di tale legame.

Bisogna considerare la presenza delle forze viscosive e capillari che hanno influenza diversa, e la presenza di un'impregnazione discontinua con formazione di bolle d'aria inglobate in zone già bagnate, e che solo successivamente si riempiranno.

Quando il fluido invade il mezzo poroso, con velocità maggiori di quelle che caratterizzano la sua penetrazione all'interno di un mezzo poroso per effetto delle sole forze capillari, esso si muove prevalentemente nei pori più grandi, intrappolando l'aria in quelli più piccoli.

In questo caso, le forze viscosive, definite come il prodotto della viscosità per la velocità, prevalgono su quelle dovute alla pressione capillare. Viceversa, quando le velocità di

avanzamento sono basse, saranno le forze capillari a prevalere su quelle viscose, ed allora i pori più stretti sono i primi a riempirsi intrappolando l'aria in quelli più grandi. Tali osservazioni trovano poi riscontro reale nella determinazione della permeabilità; infatti, quando le pressioni e quindi le velocità di avanzamento del flusso sono maggiori, anche la permeabilità mostrerà un andamento crescente, viceversa a pressioni minori.

Per analizzare i meccanismi di impregnazione è dunque necessario analizzare il microflusso ed il macroflusso: il primo si viene ad instaurare tra le fibre che costituiscono i raggruppamenti in fasci (tow) che determinano il rinforzo, il secondo è un meccanismo d'impregnazione che si sviluppa nei canali intorno ai tow.

Il primo meccanismo è prevalente per basse pressioni d'iniezione, mentre il secondo diventa prevalente per alte pressioni di iniezione.

I rinforzi possono essere caratterizzati dalla loro permeabilità derivata da misure o modelli basati su una precisa geometria della fibra.

I rinforzi usati per i compositi sono in molti casi formati da fibre raccolte in fasci [111], determinando due tipi di flusso: un flusso su microscala all'interno dei fasci di fibre, ed uno su mesoscala tra di essi. Tipiche unità di lunghezza, per i due tipi di flusso, sono minori di 10 micrometri e maggiori di 100 micrometri, rispettivamente.

In figura 1.13 sono rappresentati i due meccanismi.

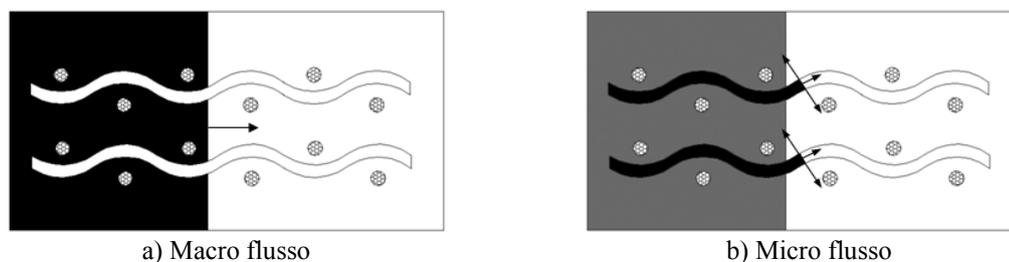


Figura 1.13 – Meccanismi di impregnazione.

E' stato mostrato che la relazione tra il micro ed il macroflusso è importante per i fenomeni causati dal fronte di flusso, quali la formazione di vuoti [112 – 114], mentre un certo numero di studi ha indicato che la portata totale del fluido attraverso il materiale è generata soprattutto dal macroflusso [115, 116]. Infatti, la portata per unità di area su macroscala è 100 volte maggiore di quella su microscala, sebbene la geometria sulle due scale sia praticamente la stessa.

Sono stati presentati un certo numero di modelli che considerano il flusso su microscala, tra i quali, di particolare interesse, sono quelli con alte frazioni volumetriche di fibre e quindi molto vicine tra loro.

Due di questi modelli sono stati presentati da Gebart [117] per flusso longitudinale e perpendicolare a una perfetta disposizione di fibre e dall'equazione di Kozeny-Carman per flusso attraverso i fasci. L'interesse, nel flusso su due scale, è cresciuto negli ultimi anni [112, 115, 116, 118, 119], in particolare Shih e Lee [71] hanno proposto un modello di permeabilità parallela per il flusso attraverso tessuti cuciti bidimensionali.

Il flusso tra i fasci è stato modellato risolvendo le equazioni di Stokes [119], nei casi di flussi attraverso un canale e tra due piastre parallele. Si è assunto che la velocità del fluido e la permeabilità ai bordi è uguale alla velocità all'interno del mezzo poroso.

In realtà, ci sarà uno strato limite all'interno del mezzo poroso, nel quale la velocità è più alta di quanto stabilito dalla legge di Darcy. Quindi, una maggiore portata volumetrica attraversa sia il mezzo poroso che i canali [120, 121].

Dai risultati presentati da Sadiq [122], si può concludere che gli effetti dello strato diventano marginali se la frazione di volume di fibre nel fascio è sufficientemente alta o, in altre parole, la permeabilità del fascio è molto più bassa di quella dei canali tra i fasci.

Ad una simile conclusione giunsero Larson e Higdon [123], affermando che l'effetto è significativo solo per sistemi relativamente diluiti. Da una regola pratica, risulta che la dimensione dello strato limite all'interno del fascio di fibre è la radice quadrata della sua permeabilità [120].

Molte discrepanze in letteratura [124], circa l'utilizzo della legge di Darcy per modellare il processo di infiltrazione negli esperimenti della permeabilità, possono essere dovute all'aver trascurato gli effetti dei fenomeni di flusso microscopico nell'interpretazione di quello macroscopico. Per iniezioni a bassa pressione, sono stati fatti tentativi per spiegare alcune delle suddette discrepanze, utilizzando modelli di flusso generalizzati che includevano effetti non Newtoniani [125, 126], effetti di pressione capillare [127] e separazione del flusso in macro e micro flusso [127], prendendo quindi in considerazione pressioni capillare ed effetti di bagnabilità [127].

Alcune pubblicazioni focalizzano, con studi microscopici, il problema delle formazioni di vuoto nella produzione di compositi legato all'impregnazione di resina e, più specificatamente, alla viscosità del flusso ed alle proprietà di bagnabilità del rinforzo in relazione alla resina utilizzata. E' stato, inoltre, osservato che la permeabilità globale

può variare, dipendendo dal fluido impregnante e dalle sue capacità di bagnabilità [128,129].

Negli studi sulla visualizzazione del flusso [130, 131], si è osservato che, per basse portate, il microflusso era preponderante, mentre per alte portate lo diventava il macroflusso.

Le previsioni di permeabilità e le proprietà di bagnabilità delle fibre potrebbero essere di aiuto per la fase progettuale del processo di realizzazione di compositi con RIFT.

Poiché più strati di tessuto sono posti in uno stampo, il flusso nel piano, durante la fase di infiltrazione, è sia nei macropori tra i fili di fibra che nei micropori dentro i fili di fibra.

Un modello generale di macro e micro infiltrazione, suggerito da L. Lekakou e Bader [127], è in grado di prevedere la permeabilità globale ma solo qualitativamente e necessita di successive conferme per una previsione accurata. A causa della complessa natura di questi modelli, divisi in alcuni sottomodelli, ognuno dei quali deve essere rifinito e convalidato indipendentemente.

Un modello matematico è stato sviluppato relativamente al microflusso attraverso una rete bidimensionale di fili di fibra in tessuti intrecciati.

Il termine *modelli di flusso a rete*, come incontrato in letteratura [132 – 134], descrive il flusso attraverso una rete di tubi e corrisponde ad un puro livello di simulazione.

Il flusso a rete di Darcy corrisponde a simulazioni di microflusso ad un livello più alto rispetto ai micropori. Lo scopo è di applicare il modello del microflusso della rete di Darcy, per prevedere la permeabilità e la pressione capillare attraverso tessuti intrecciati e confermare i dati sperimentali.

Per isolare il microflusso attraverso la rete di fili di fibra, furono condotti esperimenti di flusso capillare attraverso un singolo strato di tessuto intrecciato piano, in modo da convalidare il modello.

Oltre ad essere il primo sottomodulo per infiltrazione di resina in un assemblaggio di tessuti intrecciati, tale modello è potenzialmente importante nelle applicazioni RIFT con alta frazione in volume di fibre, dove i macropori sono molto piccoli ed il flusso, attraverso la rete di fili di fibre in ciascuno strato del tessuto, può essere un fattore determinante nell'infiltrazione dei rinforzi dei tessuti. Il raggio delle fibre, la microporosità (porosità del filo), la permeabilità microassiale, la pressione capillare rappresentano i parametri d'ingresso.

1.7 Metodi di misura della permeabilità

Tra i vari metodi sviluppati, i due principali per la misura della permeabilità nel piano delle fibre di rinforzo, di interesse per tecnologie di stampaggio di compositi mediante RIFT, sono: la tecnica del flusso parallelo e la tecnica del flusso radiale [135], con le quali si può valutare la permeabilità in condizioni di prima bagnatura e in condizioni di saturazione per valori costanti della portata o della pressione. Tali metodi di misura utilizzano uno stampo ed un controstampo rigidi, tipo RTM, e trasparenti, in modo da monitorare l'avanzamento del fronte di flusso.

Sono state valutate, da Parnas [136], tre diverse modalità di impregnazione:

- bagnatura con flusso radiale;
- bagnatura con flusso parallelo;
- saturazione con flusso parallelo;

rilevando valori della permeabilità più alti nella bagnatura rispetto alla saturazione del mat con disposizione random, a causa dell'azione capillare sul fronte di flusso, e più bassi nella bagnatura di un tessuto per l'inclusione di aria sul fronte di flusso.

La presenza di un fronte di flusso [136] nel mezzo poroso influenza la misura della permeabilità, indipendentemente dalla sua geometria attuale, radiale o parallelo.

Il valore della permeabilità si stabilizza solo dopo che il liquido è fluito attraverso il rinforzo per un tempo piuttosto lungo.

La tecnica di misura con flusso parallelo [137] valuta la permeabilità, sia nella bagnatura che nella saturazione e, le differenze riscontrate [138] con le misure della tecnica con flusso radiale, sono spiegate con le diverse velocità del fronte di flusso.

Ahn ed altri [139] confermarono tali risultati, mentre Gerbart ed altri [140] trovarono un valore della permeabilità nella bagnatura, misurato con la tecnica del flusso parallelo, un po' più alto di quello rilevato nella saturazione. Inoltre, misurarono la permeabilità nella bagnatura anche con la tecnica del flusso radiale, ricavando risultati simili per le tre modalità d'impregnazione sopra elencate nell'ipotesi, più difficile da verificarsi per la tecnica del flusso radiale, che l'inflessione dello stampo era sotto controllo e visibile attraverso uno stampo sufficientemente largo e trasparente. In tal modo, gli errori di misura, dovuti agli effetti di bordo, potevano essere identificati ed esclusi ed era possibile legittimare i vari modelli matematici e simulazioni numeriche legati ai processi mediante RTM. Durante la misura, i valori di pressione e viscosità della resina erano tenuti costanti. Da un confronto tra i tre metodi, quello del flusso

parallelo in condizioni di saturazione risultò il più adatto per una valutazione continuata della permeabilità.

I risultati delle misure evidenziarono che la geometria dello stampo e la pressione di iniezione erano molto meno influenti della preparazione del campione da testare e del relativo materiale sul valore della permeabilità. Per ridurre gli scarti riscontrati tra tali valori, si provò a stampare i campioni invece di tagliarli ed a sigillare lo stampo così da indirizzare il flusso nella direzione stabilita, minimizzando con tecniche speciali gli effetti dovuti allo sbilanciamento tra trama e ordito presente nel tessuto considerato. Per la valutazione della permeabilità trasversale non sono state molte le ricerche condotte e, comunque, queste hanno riguardato sempre la valutazione della permeabilità relativamente al singolo filo di roving [141].

1.8 Influenza della struttura delle fibre sulla permeabilità

L'utilizzo della tecnologia RIFT, come strumento economico ed efficiente di produzione di materiali compositi di grandi prestazioni [142], è criticamente limitato dalla bassa permeabilità delle fibre impiegate, per cui è necessario conoscere la permeabilità del rinforzo per valutare tempo e traiettorie di riempimento, oltre che per sviluppare rinforzi altamente permeabili.

Le espressioni teoriche, derivanti da tali valutazioni, si riferiscono ad una specifica architettura del rinforzo e non sono applicabili al caso generale [143 – 152].

L'architettura e la permeabilità della preforma di fibre, la viscosità, la pressione di iniezione e la temperatura della resina, le posizioni di ingresso ed uscita dallo stampo e la tecnica di posizionamento della preforma [153, 154] determinano la buona riuscita di un processo di stampaggio mediante RIFT.

Negli esperimenti veniva usata resina fenolica liquida, avente bassa viscosità e trattata con acido catalizzatore a bassa temperatura e con una miscela di acidi organici ed inorganici agente da ritardante catalitico per aumentare il tempo di impiego così da ridurre significativamente il rischio esotermico. Tenendo resina e catalizzatore a temperatura ambiente e lo stampo a 60°C, si aveva un processo RTM isotermico. I profili di avanzamento della resina venivano registrati in modo da poterne calcolare la velocità. Il processo di riempimento mediante RIFT ha effetti significativi su differenti aspetti, come la bagnatura e l'impregnazione delle fibre, il disegno del foro di iniezione, la formazione di parti asciutte e di vuoti.

La bagnatura delle fibre è un tipico problema incontrato durante il processo di iniezione, determinando scarse proprietà di uniformità del prodotto: quando la miscela di resina e catalizzatore è iniettata nello stampo chiuso, il preposto rinforzo assume, per la pressione di iniezione, movimenti e disposizioni non previsti e dipendenti dal tipo di fibre, architettura, dalla frazione in peso e in volume e dalla configurazione e geometria dello stampo (angoli, doppie curvature, ecc.) [155, 156].

Disposizioni non più uniformi delle fibre determinano un errato processo RIFT, cioè aree ricche di resina alternate con altre molto povere e, quindi, inaccettabili variazioni locali di proprietà fisiche e meccaniche nei materiali.

Per avere completo controllo del processo RIFT ed impregnazione della preforma, è necessario un regime di flusso stazionario quasi-unidimensionale, cioè con velocità di avanzamento costante in ogni istante.

A seconda di come è tagliata e disposta nello stampo, tra la preforma di fibre ed i bordi dello stampo, a causa delle diverse dimensioni e deformazioni del rinforzo rispetto a quelle della cavità, si formano piccoli spazi dovuti al margine libero dei fasci di fibre, dove si creano percorsi preferenziali del flusso di resina, dovuti alle basse perdite di carico, che rendono incerto il riempimento dello stampo.

All'aumentare della distanza tra il bordo della preforma e quello della cavità diminuisce il grado di compattazione ed aumenta la permeabilità del rinforzo creando effetti di inserimento.

Il bordo del flusso spezza l'uniformità delle traiettorie, causando incompleta bagnatura della preforma, e avanza più velocemente della parte centrale. Il fenomeno si intensifica al diminuire della permeabilità della preforma, poiché aumentando il tempo di iniezione aumenta la differenza di avanzamento della resina tra le zone centrali ed i bordi del flusso. Tali problemi, bagnatura delle fibre ed effetti del bordo di flusso, vengono mitigati manipolando il rinforzo per ottenere un regime di flusso costante. Sorgevano difficoltà nel taglio preciso della preforma con le dimensioni dello stampo nel caso di forme di geometria complessa.

Le concentrazioni di rinforzi influiscono fortemente sulle velocità di riempimento dello stampo per l'incremento delle perdite di carico che, agendo a pressione costante, riducono gradualmente le portate di resina e, allo stesso tempo, anche le differenze di velocità della resina tra le varie zone dello stampo. Summerscales [52] utilizzò un raggio idraulico specifico, in modo da considerare nel suo modello l'effetto delle variazioni nell'architettura del rinforzo sul valore della portata di resina che risultava

molto maggiore per un insieme raggruppato di fibre rispetto ad una disposizione uniforme di fibre uniche con stessa frazione volumetrica. Simili risultati, ricavati dagli esperimenti di Thirion ed altri [157], mostrarono che la portata attraverso i tessuti commerciali aumentava se contenevano fasci di fibre raggruppati a parità di frazione volumetrica del rinforzo, per cui variazioni microstrutturali, dovute a modifiche sui tessuti e rilevate da un'analisi automatizzata di immagini, incidevano sul valore della portata [158 – 162]. L'incremento di permeabilità non è proporzionale a quello del numero di fasci legati contenuti nella preforma di fibre. Disposizioni irregolari delle fibre provocavano un degrado delle proprietà meccaniche dei laminati [163], in particolare la riduzione della resistenza a compressione longitudinale e a taglio interlaminare [164].

Pearce ed altri [165 – 167] studiarono la relazione tra la permeabilità del tessuto, le prestazioni meccaniche e la microstruttura del tessuto, evidenziando l'incremento di permeabilità dovuto alla presenza di canali di area $0.08-0.30\text{mm}^2$ tra i fasci di fibre ed il contemporaneo deterioramento delle proprietà meccaniche per aree maggiori di 0.50mm^2 .

Le fibre in commercio sono disponibili ed hanno una permeabilità inferiore rispetto alle strutture di fibre che noi stessi realizziamo con lo scopo di aumentare appunto la permeabilità.

L'obiettivo è quello di mettere in relazione le differenze circa la permeabilità e le proprietà meccaniche [168, 169] che si hanno nella realizzazione della microstruttura dei compositi. Ciò è stato realizzato in seguito alla produzione di lamine di matrice epossidica e fibre di carbonio di differenti tipologie di tessitura, con RTM in uno stampo trasparente. Il progressivo avanzamento della resina è stato registrato tramite una videocamera durante l'iniezione e le immagini sono state elaborate da un opportuno computer che ci consente di determinare la permeabilità delle fibre. Inoltre, le lamine sono state realizzate utilizzando le stesse fibre e sono state sezionate per condurre un'analisi microstrutturale e per testare la resistenza al taglio interlaminare ILSS rispetto a modelli standard determinati con analisi CRAG [170].

1.9 Effetti sulla permeabilità di fronti di flusso convergenti

La velocità del processo di RIFT può essere migliorata, utilizzando più varchi di iniezione della resina. Ciò non dà luogo necessariamente alla convergenza dei fronti di

flusso di resina. Lundstrom [171] teorizzò che tale convergenza può avere come risultato la formazione di soffiature all'interno del materiale composito, che conduce ad una degradazione delle proprietà meccaniche del composito stesso. Attraverso un processo RTM, è stata realizzata una serie di piastre composite di matrice epossidica e fibre di carbonio che si differiscono per la tessitura. Lo stampo è stato realizzato trasparente con sistemazione degli iniettori in modo da generare la convergenza dei flussi di resina, determinando: l'effetto del tipo di iniezione, la temperatura di iniezione, e le differenze tra i vari tipi di tessitura. L'analisi è stata eseguita da Stone e Clarke [172], grazie ad una esame mediante attente metodologie, quali:

- 1) ultrasuoni;
- 2) analisi di rappresentazioni quantitative;
- 3) test di resistenza al taglio interlaminare.

Si è così dimostrato che c'è un incremento marcato delle soffiature nelle aree dove i flussi si incontrano e ciò si riscontra da un abbassamento delle proprietà meccaniche. Prima della convergenza, i fronti di flusso si muovono indipendentemente e in modo da poter essere ipotizzato il loro cammino; tali ipotesi sono basate su precedenti esperimenti condotti sulla permeabilità. L'angolo e la posizione, alla quale i flussi si incontrano relativamente al bordo dello stampo, influiscono sul loro modo di interagire:

- quando i fronti di flusso si incontrano su di un lato dello stampo, essi si fondono e si muovono come un unico fronte;
- quando i fronti di flusso si incontrano frontalmente, essi daranno luogo ad un aumento delle soffiature innanzi alla linea di unione e nei pressi degli spigoli adiacenti.

I vuoti, generati in questo modo, possono mantenere le loro posizioni durante i flussi seguenti, e ciò è dovuto all'annullamento della pressione di iniezione su tali zone di vuoto formatisi.

Si è detto che un metodo, molto efficace per tale riscontro, è quello basato sugli ultrasuoni. Tale metodo può fornire un'utile indicazione sulla distribuzione dei vuoti, tuttavia, in assenza di materiali di riferimento (studi già effettuati), i risultati possono garantire solo una misura relativa e non assoluta dei vuoti. Le frazioni volumetriche di vuoti sono risultate più alte nelle zone di convergenza dei flussi e, in tali casi, misurando la resistenza a taglio, Curtis [173], osservò che essa risulta più bassa, e ciò indicherà senz'altro l'influenza negativa del flusso convergente. La tipologia di iniezione a due ingressi (2 iniettori) su i lati adiacenti di uno stampo, ha dato come risultato il maggiore volume di vuoti formatisi. Tutti gli esperimenti sono stati condotti

avendo realizzato un vuoto spinto nella cavità dello stampo. Senza l'effetto positivo del vuoto, la presenza delle frazioni volumetriche delle soffiature sarebbe stata maggiore.

1.10 Recenti Modelli Matematici

Diversi tentativi sono stati fatti basandosi sul tipo di materiale e su un'analisi a livello microscopico della struttura costituente le fibre [127, 174, 175] e studiando l'effetto di deformazioni finite sulla struttura delle fibre [176 – 178]. Tenendo presente che la maggior parte dei tentativi fatti per trovare una stima della permeabilità coinvolge metodi numerici (come per esempio il metodo Lattice-Boltzman [179]), procedure sperimentali non standard [180] oppure richiede informazioni a livello microscopico [181], che si possono ottenere solo per parti limitate di compositi, non esiste ancora un metodo affidabile per la previsione della permeabilità, che è abbastanza semplice da ottenere sperimentalmente. I maggiori problemi derivano dal fatto che il rinforzo è soggetto a effetti di shearing, straightening, buckling, stretching e a scorrimenti tra le fibre e tra i piani. In aggiunta a questi vi sono poi effetti secondari come la curvatura e la torsione causate dall'attrito tra le fibre e dalla forza di compressione [182]. Per la maggior parte delle fibre si è visto che l'effetto predominante è quello di shearing [183, 184]. Diversi sono stati gli studi (quasi sempre limitati a casi bidimensionali) presentati sul comportamento delle fibre [185 – 191]. Un metodo largamente usato per la simulazione è basato su analisi cinematiche (come il PATRAN Laminate Modeler). Un primo modello [192] per la determinare la permeabilità di un rinforzo si basa sulla deformazione di una cella elementare (figura 1.14).

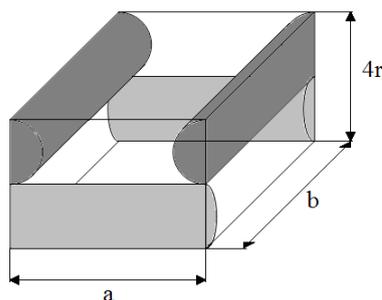


Figura 1.14 – Cella elementare.

Si assume, inoltre, che le proprietà nelle due direzioni delle fibre siano identiche e che non vi siano effetti di crimp. La porosità è calcolata a partire dal volume V della cella elementare e del volume V_f di fibre:

$$\Phi = 1 - \frac{V_f}{V}$$

L'azione della pressione deforma la cella elementare e rende ellittica la sezione delle fibre; tutto ciò comporta una riduzione del volume a disposizione della resina e quindi della porosità che al valore massimo di compattazione delle fibre assume il valore, teorico, minimo:

$$\Phi = 1 - \frac{\pi}{4 \sin 60^\circ} = 0,09$$

Valore che deriva dall'aver considerato, per la cella deformata, una configurazione esagonale.

Tali considerazioni sono ritenute indipendenti dal numero di strati di fibre, purché posizionati con lo stesso angolo. La deformazione subita dalla cella comporta inoltre una variazione della permeabilità; si introduce quindi una permeabilità equivalente, non calcolata con le formule di Kozeny–Carman ma a partire dal valore iniziale della permeabilità e da prove sperimentali. Tali valori della permeabilità sono solitamente diagrammati rispetto all'angolo di disposizione delle fibre e parametrizzati rispetto al raggio delle stesse. A titolo di esempio è riportata nei diagrammi di figura 1.15 una rappresentazione dei valori normalizzati, riferiti cioè al valore iniziale, di k_1 e k_2 (lungo le due direzioni nel piano).

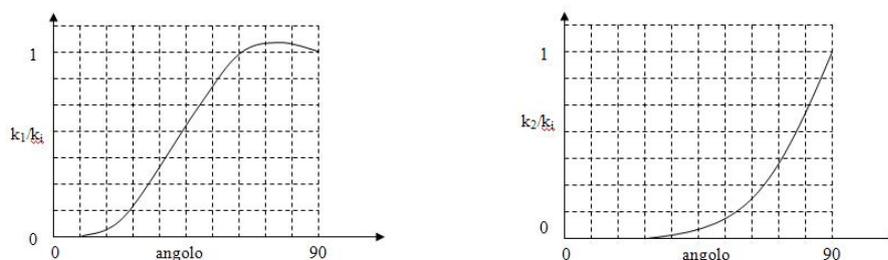


Figura 1.15 - Rappresentazione dei valori normalizzati della permeabilità nelle direzioni principali in funzione dell'angolo di disposizione delle fibre.

Al fine di ricavare le caratteristiche di permeabilità sono stati effettuati esperimenti sul flusso radiale con sezioni di iniezione circolari aventi raggio R_0 e pressione di iniezione nota. Risolvendo poi l'equazione differenziale riferita al generico caso di materiale anisotropo e fronte di flusso ellittico [193, 194] si ottiene un'equazione in cui è inserito un valore equivalente di permeabilità, dato da:

$$k_e = \sqrt{k_1 \cdot k_2}$$

Gli esperimenti sono stati eseguiti in uno stampo piano con un vetro trasparente nella parte superiore che, per ridurre gli effetti di deformazione dello stampo, era costituito da un vetro speciale spesso 6 cm e ulteriormente irrigidito da due barre di acciaio. Il fluido usato era un olio di silicone di viscosità pari a $0,105 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Il controllo del fronte di flusso è stato di tipo visivo, reso possibile dall'evidente contrasto tra il rinforzo asciutto e quello impregnato. I dati acquisiti durante gli esperimenti sono stati valutati per trovare il valore della permeabilità principale e l'asse lungo il quale è diretta tale permeabilità in funzione dell'angolo delle fibre. Tutti i dati rilevati suggeriscono un andamento molto simile a quello mostrato nei diagrammi precedentemente mostrati. In generale la variazione dei dati sperimentali è elevata, ma in accordo con lo scostamento massimo del 30% come riportato da Lundström et al. [195] e da Luo et al. [196]. La variazione è causata dal fatto che le fibre fornite dai distributori non sono perfettamente omogenee, inoltre lo stoccaggio e il trasporto possono comportare una deviazione dell'angolo delle fibre fino a 8 gradi. Lo studio di materiali anisotropi e indeformabili può essere effettuato con il suddetto modello a patto di considerare l'esistenza di una fittizia configurazione iniziale dalla cui deformazione si ottiene quella reale. Come già detto, essendo lo spessore molto minore delle altre dimensioni del laminato si preferisce un approccio bidimensionale ad uno tridimensionale. In realtà i flussi nei piani orizzontali saranno differenti creando un gradiente di pressione nella direzione trasversale e, di conseguenza, un flusso lungo tale direzione (cosa verificata sperimentalmente [197 – 201]) che si sviluppa nella zona vicino al fronte della resina. Tale fenomeno comporta la necessità di conoscere le proprietà del rinforzo in tale direzione, cosa però non semplice a causa della ridotta scala disponibile e dalle proprietà di compressione del rinforzo [199 – 202]. Quanto detto è reso esplicito nella figura 3.4 (in cui è rappresentata l'impregnazione di due strati e si suppone che l'iniezione di resina avvenga da $z = 0$).

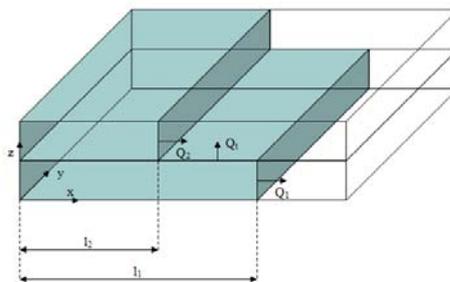


Figura 1.16 - Distribuzione del flusso in due strati adiacenti

Detta H l'altezza totale del laminato, h_j l'altezza della generica lamina e k_j la sua permeabilità si può ottenere la permeabilità media nel piano orizzontale:

$$\bar{k} = \frac{1}{H} \sum_{j=1}^n h_j k_j$$

Equazione valida per flusso trasversale nullo o istantaneo [203, 204].

L'espressione della permeabilità media non tiene conto, in tale caso, della lunghezza del laminato. Al fine di valutare tale fattore è stato considerato in alcuni studi [205] un modello le cui ipotesi principali sono:

- Il flusso avanza nel piano solo lungo le direzioni principali (in particolare è considerata la direzione x);
- Il flusso trasversale è limitato alle superfici libere tra due piani adiacenti;
- La pressione è valutata con un profilo di tipo lineare per ogni piano (diagramma di figura 1.18);

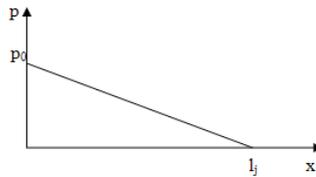


Figura 1.18 – Andamento della pressione nella direzione di impregnazione.

$$p_j(x) = \left(p_0 - p_0 \frac{x}{l_j} \right) (\delta(x) - \delta(x - l_j))$$

$$\begin{cases} \delta(x) = 0 & \text{per } x < 0 \\ \delta(x) = 1 & \text{per } x \geq 0 \end{cases}$$

L'espressione finale della permeabilità cui giunge il modello è:

$$\bar{k} = \frac{\bar{l}}{H} \sum_{j=1}^n \frac{h_j k_j}{l_j}$$

$$\text{Con } \bar{l} = \frac{1}{H} \sum_{j=1}^n \frac{h_j l_j}{n}.$$

In uno studio [206] effettuato su una tecnologia di tipo SCRIMP si è ipotizzato un andamento della velocità u del fronte di resina rappresentabile come in figura 1.19 (u_b rappresenta la velocità lungo il piano di scambio tra la rete e il mezzo poroso).

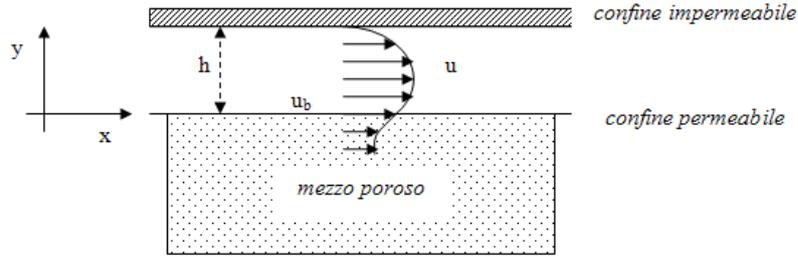


Figura 1.19 – Ipotesi di avanzamento del flusso.

Partendo dalle equazioni di Navier–Stokes e tenendo conto della legge di Darcy si arriva all’espressione della velocità u :

$$u = u_b \left(1 + \frac{\alpha}{\sqrt{k}} y \right) + \frac{1}{2\mu} (y^2 + 2\alpha y \sqrt{k}) \frac{dp}{dt}$$

Imponendo le condizioni al contorno:

$$\begin{cases} u = 0 & \text{per } y = h \\ u = u_b & \text{per } y = 0 \end{cases}$$

Si trova:

$$u_b = -\frac{k}{2\mu} \left(\frac{\sigma^2 + 2\alpha\sigma}{1 + \alpha\sigma} \right) \frac{dp}{dx}$$

In cui:

- k è la permeabilità (o meglio la componente del tensore di permeabilità lungo x);
- α è un parametro (compreso tra 0.8 e 1.2) che dipende dal materiale e che per quasi tutti i rinforzi è pari a 1;
- σ è un parametro adimensionale posto pari a $\frac{h}{\sqrt{k}}$.

Tali relazioni consentono di determinare le espressioni della portata (per unità di ampiezza) e della permeabilità equivalente:

$$q = -\frac{1}{2\mu} \left(\frac{\sigma^2 + 2\alpha\sigma}{1 + \alpha\sigma} \right) \left(\frac{2h\sqrt{k_x} + \alpha h^2}{2\sqrt{k_x}} \right) \frac{dp}{dx} + \frac{1}{2\mu} \left(\frac{h^3}{3} + \alpha h^2 \sqrt{k_x} \right) \frac{dp}{dx}$$

$$k_{eq} = \frac{h^3 + 4h^2 \sqrt{k_x} + 6hk_x}{12(\sqrt{k_x} + h)}$$

Risulta chiara, da quanto detto finora, l'importanza di ottenere la permeabilità di un rinforzo. Lidström [207] suggerisce che la permeabilità di un materiale isotropico possa dipendere dalla geometria dell'esperimento, riscontrando valori diversi in quelli condotti in modo radiale da quelli monodimensionali. Parnas e Salem [208] hanno ricondotto tali differenze a un fattore di scala dipendente dalla forma, dai fenomeni di flusso insaturo o a una combinazione di tali fattori.

Nella configurazione radiale (figura 1.20a) è possibile osservare un fronte di flusso circolare, nel caso di materiale isotropo, o ellittico, nel caso di materiale anisotropo.

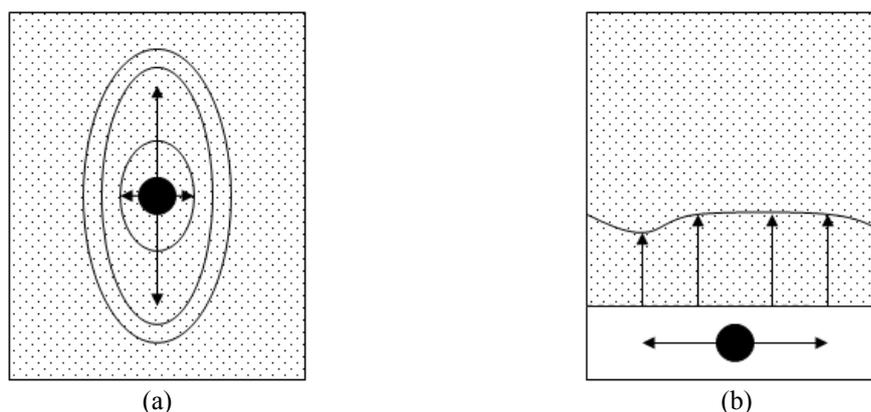


Figura 1.20 – Tipologie di flusso: (a) radiale; (b) monodimensionale

Il principale vantaggio della configurazione radiale risiede nella possibilità di individuare in unico esperimento le direzioni principali e i valori delle relative permeabilità, ragione per cui è largamente usata [193, 209 – 214].

A tale fine Weitzenböck et al. [215] sono partiti dalla legge di Darcy in coordinate polari:

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}$$

In cui v è la velocità del fronte di flusso, k la permeabilità (ritenuto un tensore del secondo ordine), μ è la viscosità (dinamica) del fluido e $\partial p/\partial r$ è il gradiente di pressione. Le ipotesi principali su cui si basa lo studio sono la costanza della pressione di immissione, la trascurabilità del flusso microscopico, della forza di gravità e della tensione superficiale. Il fluido è ritenuto Newtoniano e incompressibile. Si presuppongono inoltre condizioni isoterme durante l'esperimento.

Il modello distingue il caso isotropico da quello anisotropo. Nel primo caso è possibile l'uso dell'equazione di Laplace in coordinate polari la cui soluzione fornisce l'espressione del gradiente di pressione, in funzione della posizione, da inserire

nell'equazione di Darcy. L'avanzamento del fronte di flusso è misurato in diversi istanti, mentre gli altri parametri sono ritenuti costanti. Nel secondo caso non è utilizzabile direttamente l'equazione di Laplace. Si ricorre allora ad una trasformazione del fronte di flusso ellittico in un fronte di flusso quasi-isotropico mediante l'uso di un raggio equivalente.

Alcuni studi hanno dimostrato l'utilità della tecnica del flusso radiale [104 – 106, 216, 217] per una veloce determinazione delle direzioni principali nel piano; tale tecnica però mal sopporta la deformazione della forma dovuta alle elevate dimensioni nel piano, richieste dal flusso radiale. La maggior parte degli studi si concentra sul flusso monodimensionale [208, 218 – 221], anche se recentemente è stata applicata una tecnica chiamata PIERS (Permeability Identification using Electrical Resistance Sensors) [222] basata sull'utilizzo di una piastra di sensori (figura 1.21). Questa piastra, al cui centro è posto il canale di ingresso, è di acciaio spessa 13 mm e contiene 43 sensori elettrici (semplici elementi metallici con un diametro di 2 mm isolati dalla piastra) disposti a 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 180 e 270 gradi. La piastra è poi inserita in una pressa idraulica.

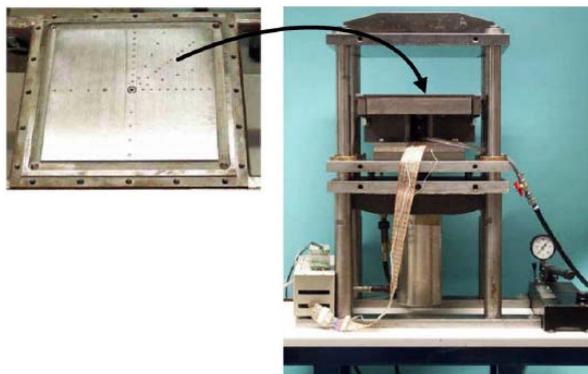


Figura 1.21 – Piastra e pressa utilizzate per il metodo PIERS.

Il fluido di prova è iniettato dal foro al centro della piastra. Per misurare la pressione di ingresso appena sotto la piastra è installato un trasduttore di pressione, che come gli altri sensori è connesso a un sistema di acquisizione dati. Quando il fluido entra nel materiale e l'impregnazione ha luogo esso viene a contatto con i sensori elettrici. Si è creato così un ponte conduttivo tra la massa della piastra ed il sensore (questo implica che mentre il fluido di prova deve essere elettricamente conduttivo il materiale di collaudo non deve esserlo). A questo punto si genera una piccola corrente elettrica raccolta dal sistema di acquisizione dati, che memorizza i tempi di arrivo del fluido ai sensori e i dati di pressione. Il software con i dati raccolti può calcolare i valori di

permeabilità basandosi su una procedura sviluppata da Adams e Rebenfield [223 – 225]. Il vantaggio più evidente è il gran numero di dati ottenibili con un unico esperimento, che consente di costruire una carta di controllo del processo, carta che in genere ha mostrato una notevole dispersione dei valori ottenuti. Possibili cause di tale dispersione possono essere:

- La deformazione del materiale durante la preparazione della preforma;
- Errori (casuali) di tipo sperimentale;
- L'esistenza di un microflusso all'interno del rinforzo;
- Differenze nella sovrapposizione degli strati.

Al fine di studiare il flusso di resina all'interno del sistema si può assimilare, tramite un'analogia elettrica, la resistenza che il mezzo poroso oppone all'avanzamento della resina ad una resistenza elettrica [226].

Dalla legge di Darcy è noto che:

$$Q = \frac{\Delta p k \sigma}{\mu L}$$

che è possibile riscrivere come:

$$\Delta p = Q \left(\frac{\mu L}{k \sigma} \right)$$

Assimilando Δp ad una differenza di potenziale e Q ad un'intensità di corrente, dalla nota relazione di Ohm ($V = RI$) il termine in parentesi può considerarsi una resistenza. Da notare che ovviamente i punti alla stessa pressione saranno ritenuti allo stesso potenziale.

Volendo impostare uno schema rigoroso, il flusso di resina all'interno del sistema costituito da distributore e rinforzo è dato da tre contributi, evidenziati dalla figura 1.22.

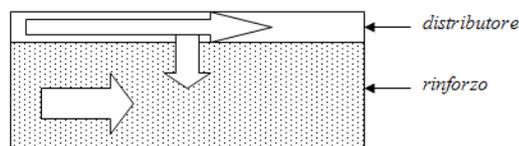


Figura 1.22 - Caratterizzazione dei flussi all'interno del sistema costituito da rinforzo e distributore.

È possibile osservare dalla figura:

- un flusso longitudinale nel distributore;
- un flusso longitudinale nel rinforzo;

- un flusso trasversale nel rinforzo (dovuto alla maggiore velocità della resina nel distributore).

Nota l'espressione della resistenza in funzione dei parametri della legge di Darcy e delle regole che vincolano serie e parallelo la resistenza totale può scriversi:

$$R_T = \frac{\left(\frac{2 \cdot \mu \cdot x}{k_d \cdot \sigma_d} + \frac{\mu \cdot s}{k_t \cdot \sigma_t} \right) \cdot \frac{\mu \cdot x}{k_l \cdot \sigma_l}}{\left(\frac{2 \cdot \mu \cdot x}{k_d \cdot \sigma_d} + \frac{\mu \cdot s}{k_t \cdot \sigma_t} \right) + \frac{\mu \cdot x}{k_l \cdot \sigma_l}}$$

in cui μ , σ e k indicano ovviamente la viscosità della resina, la sezione attraversata e la permeabilità del mezzo, mentre i pedici l , t e d indicano rispettivamente la componente longitudinale, trasversale e quella relativa al distributore. È importante notare la presenza di un coefficiente 2 nell'aliquota del distributore derivante dall'ipotesi che solo metà della sua portata partecipa al processo di impregnazione del rinforzo, ma questo sempre fino al suo completo riempimento. Ancora da notare è la presenza dello spessore s nell'aliquota trasversale, è infatti questa la lunghezza che tale aliquota deve percorrere. A questo punto è semplice scrivere l'espressione della portata:

$$Q = \Delta p \cdot \frac{\left(\frac{2 \cdot \mu \cdot x}{k_d \cdot \sigma_d} + \frac{\mu \cdot s}{k_t \cdot \sigma_t} \right) + \frac{\mu \cdot x}{k_l \cdot \sigma_l}}{\left(\frac{2 \cdot \mu \cdot x}{k_d \cdot \sigma_d} + \frac{\mu \cdot s}{k_t \cdot \sigma_t} \right) \cdot \frac{\mu \cdot x}{k_l \cdot \sigma_l}}$$

e da questa è possibile calcolare i tempi utilizzando l'espressione:

$$t = \int_i^f \frac{(dV/2)}{Q} \quad (4.5)$$

Tale espressione deriva direttamente dalla definizione di portata volumetrica. La presenza del fattore 2 che divide il volume si giustifica con l'ipotesi che il laminato presenti una percentuale volumetrica di fibre pari al 50%; i ed f sono ovviamente il punto iniziale e finale di interesse.

Un tale schema comporta però un grado di difficoltà, nella formula finale, tale da non consentire un rapido apprezzamento delle portate e dei tempi.

Al fine di semplificare lo schema generale gli autori hanno proposto uno schema semplificato detto schema dell'analogia "parallela" in cui si trascura il contributo trasversale nel rinforzo, attribuendo l'impregnazione dello stesso alla sola componente longitudinale (figura 1.23).

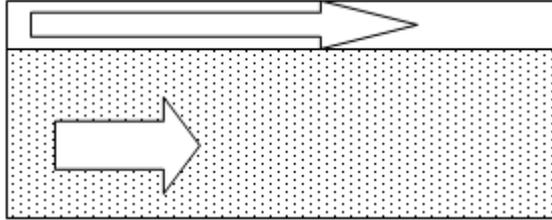


Figura 1.23 - Schema dell'analogia parallela.

Lo schema scelto risulta più semplice dal punto di vista computazionale, mantenendo comunque un sufficiente grado di approssimazione.

L'espressione della resistenza totale e della portata, secondo tale modello, risultano:

$$R_T = \frac{\frac{2 \cdot \mu \cdot x}{k_d \cdot \sigma_d} \cdot \frac{\mu \cdot x}{k_l \cdot \sigma_l}}{\frac{2 \cdot \mu \cdot x}{k_d \cdot \sigma_d} + \frac{\mu \cdot x}{k_l \cdot \sigma_l}} \quad Q = \Delta p \cdot \frac{\frac{2 \cdot \mu \cdot x}{k_d \cdot \sigma_d} + \frac{\mu \cdot x}{k_l \cdot \sigma_l}}{\frac{2 \cdot \mu \cdot x}{k_d \cdot \sigma_d} \cdot \frac{\mu \cdot s}{k_l \cdot \sigma_l}}$$

confermando l'espressione temporale.

CAPITOLO II

Prove Sperimentali Preliminari e Validazione FEM

2.1 Introduzione

Un importante aiuto allo studio del processo di infusion analizzato è stato apportato dall'utilizzo di un programma di tipo FEM (Finite Element Method), l' RTM-Worx emesso dalla Polyworx. Tale programma consente di simulare il processo di impregnazione di un qualunque laminato restituendo in output tempi e modalità del processo. Come si vedrà nel seguito, le richieste di input del suddetto codice comporterà l'esecuzione di un'estesa campagna di prove sperimentali al fine di creare una "banca dati" necessaria per le simulazioni stesse.

2.2 RTM-Worx

L'RTM-Worx nasce originariamente come programma FEM per la simulazione del processo Resin Transfer Moulding, ma ha riscontrato ottimi risultati, nel confronto con quelli reali, anche in applicazioni con i processi di tipo infusion per la produzione di componenti di piccole e grosse dimensioni in campo nautico ed aeronautico ed in particolar modo con il processo RIFT, analizzato in questo lavoro.

L'RTM-Worx simula il flusso della resina durante l'impregnazione del laminato. In uscita calcola il tempo di impregnazione del laminato, restituendo una serie discontinua di istanti del fenomeno di impregnazione e quindi da la possibilità di valutare la fattibilità del progetto indicando il tempo totale di impregnazione, che non deve superare il gel-time della resina, e la posizione del flusso di resina evidenziando le possibili zone in cui il flusso può convergere frontalmente isolando zone secche (non ancora raggiunte dal flusso). Utilizzando questo simulatore è possibile effettuare una serie di tentativi di impregnazione variando la posizione e il numero dei vari punti di iniezione e le varie caratteristiche del materiale in breve tempo.

Gli elementi necessari che richiede il programma per effettuare una simulazione si possono riassumere in tre categorie:

- geometria del laminato;
- viscosità della resina (alla temperatura di iniezione);
- frazione del volume di fibre nel laminato e loro permeabilità.

Nella simulazione isotermica effettuata dal RTM-Worx ci sono tre elementi fondamentali riassumibili in:

1. Pre-processore: elemento che permette la definizione delle geometrie di tutti gli enti del progetto e delle caratteristiche dei materiali;
2. Simulatore: elemento centrale del programma, che simula il processo di impregnazione e calcola i tempi e tutte le informazioni di uscita;
3. Post-processore: elemento che propone all'operatore la sequenza di impregnazione del laminato e i dati di uscita.

In RTM-Worx è integrato un modellatore di superfici 3D, le parti costituenti il pezzo vengono presupposte bidimensionali e indicate dal loro piano medio. In base a queste assunzioni viene considerato che:

- il gradiente di pressione attraverso lo spessore sia pari a zero
- non c'è un fronte di flusso nella direzione dello spessore
- la permeabilità ha valore solo nelle altre due dimensioni

Vengono così, inserite le coordinate x, y e z dei così definiti “keypoints” che costituiranno i vertici delle superfici da costruire. I bordi di una superficie possono essere descritti poi connettendo i keypoints con delle curve.

Una superficie infine è fatta su di un set chiuso di curve consecutive.

Una volta inserite le coordinate dei vari punti vanno decise le posizioni dei punti di ingresso e di uscita della resina. Il punto di uscita (Venting Port) ha bisogno di due informazioni aggiuntive rispetto ai normali punti (figura 2.1):

- Tempo di inizio apertura valvole
- Tempo di chiusura valvole

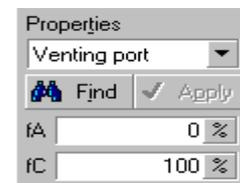


Figura 2.1

il punto di immissione (Gate) ha bisogno inoltre di altre due informazioni (figura 2.2):

- Pressione massima di iniezione
- Portata massima erogabile di resina

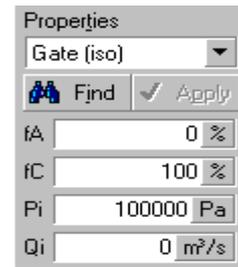


Figura 2.2

Una volta uniti i punti vengono create le superfici delle quali vengono visualizzati i piani medi sul video. A questo punto è necessario dare loro le proprietà sia geometriche che fisiche (figura 2.3):

- spessore;
- frazione volumetrica di fibre;
- angolo delle fibre;
- permeabilità longitudinale (K_{11}) e trasversale (K_{22}).

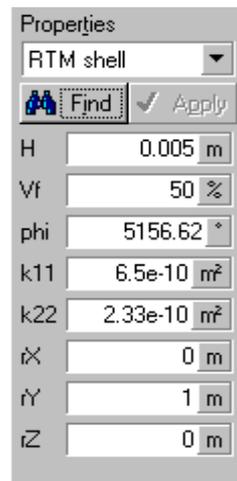


Figura 2.3

È necessario specificare a proposito delle informazioni da inserire nella sezione comandi della figura 2.3, che in tale programma FEM non è però possibile sovrapporre più materiali con differenti caratteristiche sia geometriche che fisiche; ciò comporta che in ogni superficie, se fatta da differenti tipi di rinforzo, i valori da inserire siano così calcolati: lo spessore pari alla somma degli strati, la permeabilità pari a quella equivalente del sistema, e va calcolata, almeno secondo le indicazioni della casa costruttrice del programma, considerando la “regola delle miscele”. Se, per esempio, un laminato è formato da due materiali differenti, detti K_1 e h_1 la permeabilità in una

definita direzione e lo spessore del primo materiale, e detti K_2 e h_2 la permeabilità (nella stessa direzione del primo materiale) e lo spessore del secondo materiale, secondo la regola delle miscele si ha che:

$$h_{tot} = h_1 + h_2$$

mentre per la permeabilità si ha che

$$K_{eq} = \frac{K_1 \cdot h_1 + K_2 \cdot h_2}{h_1 + h_2}$$

In realtà tale formula ha mostrato in studi precedenti [190] una non perfetta aderenza ad esperimenti similari a quelli effettuati in tale lavoro.

Al fine di migliorare i risultati ottenuti con la simulazione FEM è stata utilizzata, per il calcolo della permeabilità, il valore della permeabilità equivalente ottenuto utilizzando la teoria dell'analogia elettrica, considerando che i due flussi sono paralleli e da cui la permeabilità viene calcolata utilizzando la formula:

$$K_{eq} = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{\Delta P \cdot \sigma}$$

in cui Q viene calcolata con la citata teoria.

Una volta che sono state assegnate tutte le caratteristiche ai vari elementi che compongono il pezzo, questo va meshato.

Tale operazione nel RTM-Worx viene eseguita tramite la creazione di triangoli, il cui numero di pende dalla accuratezza che si desidera avere dalla simulazione.

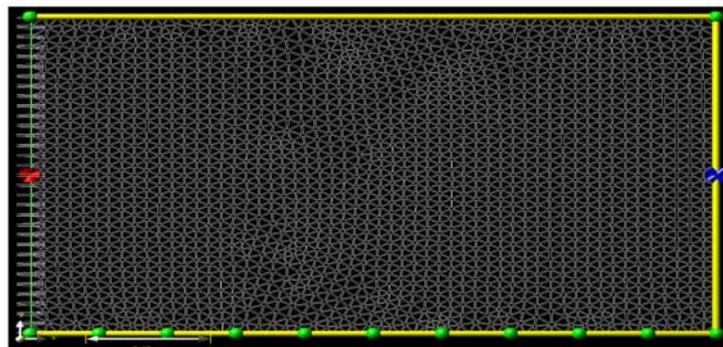


Figura 2.4

Il simulatore calcola la pressione che agisce nei vari punti del laminato, effettuando la media delle pressioni agenti ai vertici del triangolo, e considerando tale pressione agente nel baricentro della figura in esame (figura 2.5).

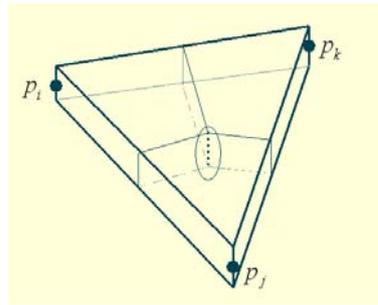


Figura 2.5

Nello studio di geometrie complesse che comportano cambi di direzione del flusso, ostacoli, e variazioni di sezione RTM-Worx applica il bilancio di conservazione della massa.

Per lo studio di elementi posti in serie

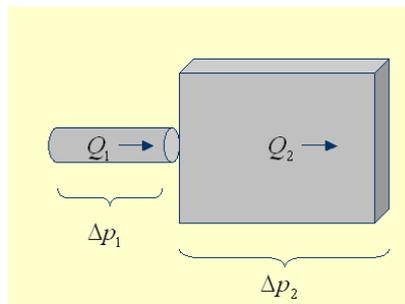


Figura 2.6

L'equazione di conservazione della massa può essere scritta come:

$$Q_1 = Q_2$$

e quindi:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

mentre per elementi posti in parallelo il bilancio di massa porta a

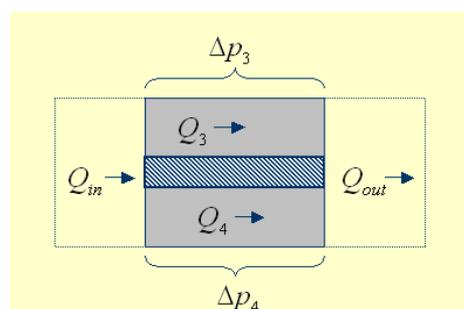


Figura 2.7

$$Q_{in} = Q_3 + Q_4 = Q_{out}$$

e quindi:

$$\Delta P_3 = \Delta P_4$$

una volta finito di effettuare la simulazione di impregnazione del pezzo, è finalmente possibile vedere i risultati attraverso il post-processore (figura 2.8).

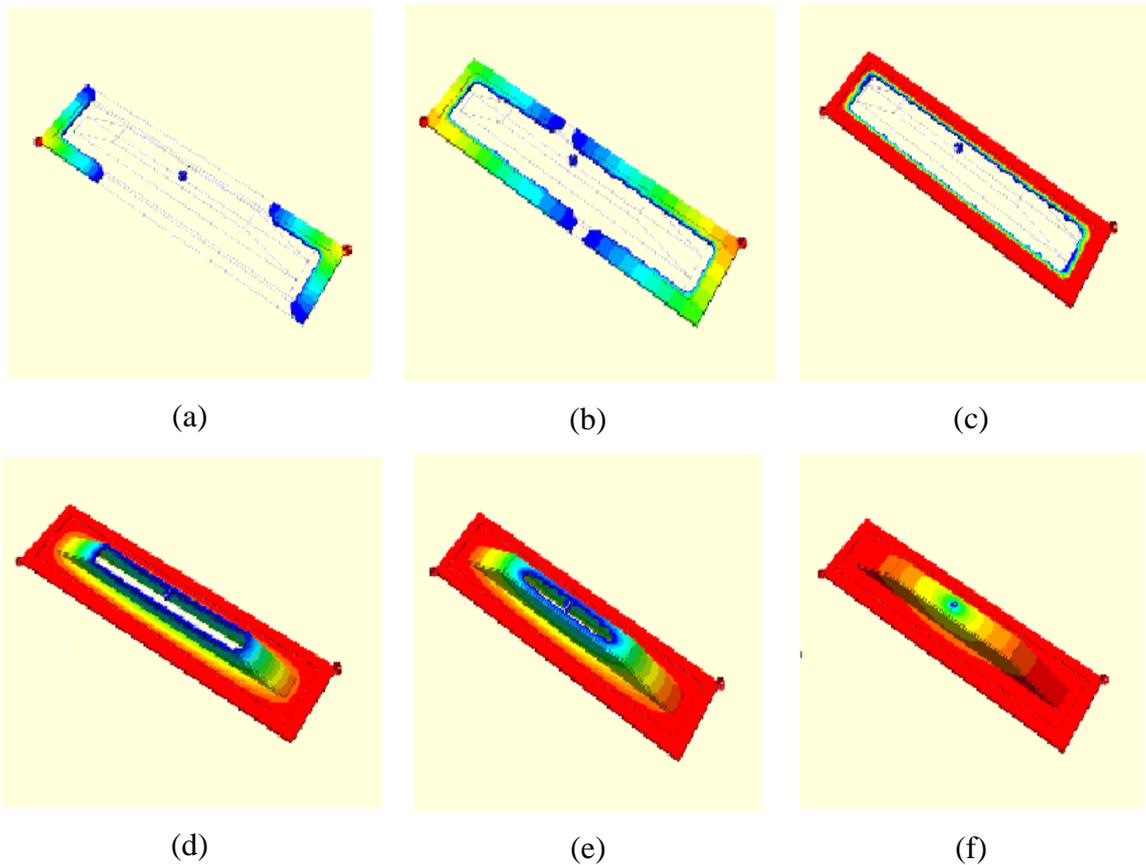


Figura 2.8: Fasi della simulazione di impregnazione di un laminato con il FEM:
 (a) inizio del processo; (b), (c), (d), (e) step intermedi; (f) fine del processo.

Il processo di impregnazione attraverso l'infusion è, come già detto, utilizzato per la creazione di parti per usi prevalentemente nautici ed aeronautici, ciò comporta la presenza quasi costante di geometrie complesse non facilmente analizzabili con semplici modelli atematici. In tali casi risulta indispensabile l'apporto di un programma FEM; infatti tramite la previsione del flusso di resina in geometrie complesse bidimensionali è possibile, già in fase di progetto, ridisegnare il sistema di immissione e di uscita della resina evitando così inutili sprechi di questa e riducendo i costi supplementari dovuti alla non completa impregnazione del laminato. Quando ci si trova

davanti a geometrie di forma complessa, non sempre le valvole di ingresso ed uscita, se presenti in quantità maggiore di una, vengono aperte e chiuse contemporaneamente. Ciò comporta che nel caso di più flussi convergenti ci sia la possibilità della creazione di difetti indesiderati come inclusioni gassose, la cui espulsione può risultare difficile ed a volte impossibile. La sola inversione di posizione di un “Gate” e di una “Venting Port” può comportare un differente avanzamento del fronte di flusso sia per quanto riguarda i tempi che per quanto concerne le linee di flusso.

2.3 Prove di permeabilità – Introduzione

La permeabilità del rinforzo fibroso, come descritto in precedenza, è un parametro fondamentale per la previsione del processo di impregnazione e lo studio dei flussi all'interno della preforma. È dunque necessario effettuare opportune prove di impregnazione delle preforme scelte al fine di conoscere tale parametro

2.4 Prove di permeabilità – Tessuto in fibra di carbonio 200 g/m²

Le tipologie di effettuate possono dividersi in due campagne sperimentali, di cui la prima è stata così articolata:

- 8 strati di tessuto in carbonio, ognuno dei quali con una lunghezza pari a 30 cm e una larghezza pari a 10 cm (per la permeabilità longitudinale).
- 19 strati di tessuto in carbonio, ognuno dei quali con una lunghezza e una larghezza pari a 15 cm (per la permeabilità trasversale).

In figura 2.1 si riportano due foto relative al processo di impregnazione, mentre i tempi rilevati sono riportati in tabella 2.1.

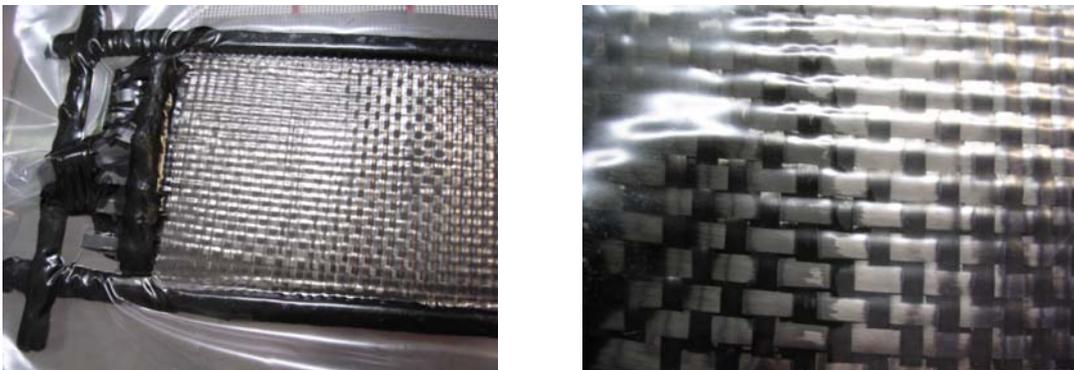


Figura 2.9 – Prova per la determinazione della permeabilità longitudinale del rinforzo

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	420
100	1110
150	1860

Tabella 2.1

Nel rilevamento dei tempi ci si è fermati ai 15 cm per raggiungere i quali la resina ha impiegato circa 20 minuti, tempo oltre il quale la resina raggiunge il *gel-time*.

Il calcolo della permeabilità è stato effettuato sulla distanza che va dai 5 cm ai 10 cm per evitare di ottenere risultati poco rispondenti alla realtà, dovuti ai primi 5 cm, i quali erano caratterizzati da un anomalo accumulo di resina, e dagli ultimi 5 cm utili, caratterizzati da una eccessiva mancanza di resina: queste zone, quindi, non permettevano di rilevare uno spessore attendibile del laminato, che nella zona centrale, quella considerata, è risultato essere pari a 2,5 mm.

$$K_l = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{\sigma \cdot \Delta P} = 1.96 \cdot 10^{-11} m^2$$

questo valore della permeabilità longitudinale K_l sarà quello utilizzato nel seguito.

Un altro parametro fondamentale per l'applicazione del modello analitico, a causa degli elevati spessori a cui si fa riferimento, è la permeabilità trasversale del rinforzo.

Nel corso degli anni numerosi studiosi si sono interessati di questo parametro, Bates [148] ha verificato la validità dell'equazione di Kozeny–Carman con un valore della costante di Kozeny pari a 8 e una percentuale volumetrica pari al 70%. In altri lavori [134, 156] invece di ricorrere a tale equazione si è preferito ottenere la permeabilità di vari rinforzi mediante l'uso di un permeametro (figura 2.10) e della legge di Darcy.

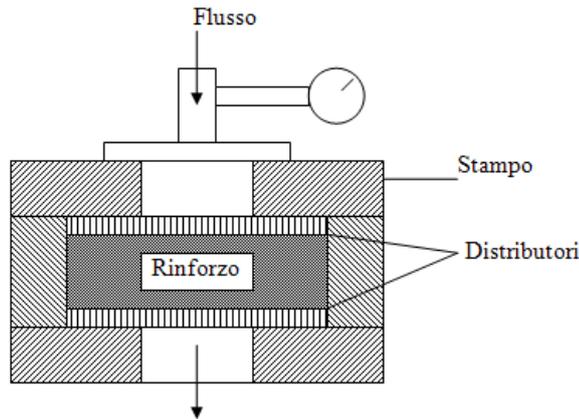


Figura 2.10 – Schema di un permeametro trasversale.

Anche se molto simile il primo permeametro trasversale utilizzato è quello di figura 2.11.

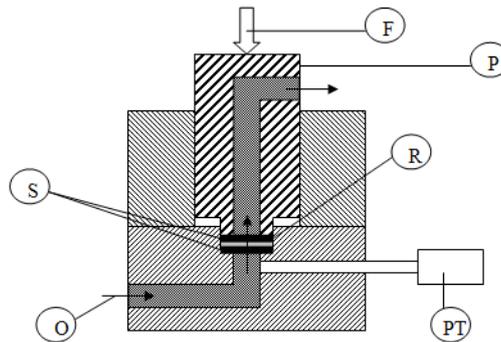


Figura 2.11 – Schema del primo permeametro trasversale F: carico; P: pistone; R: fibre; PT: manometro; S: supporti; O: flusso olio di Silicone

Fissata la velocità dell'olio, la sua viscosità e la pressione applicata, misurata la caduta di pressione e lo spessore del rinforzo è possibile calcolare la permeabilità tramite la legge di Darcy.

Il metodo utilizzato nel presente lavoro (figura 2.12) è molto più vicino al primo schema, infatti dopo aver realizzato le preforme, 19 strati di forma quadrata di 15 cm di lato, leggermente più grandi della zona di interesse affinché l'impregnazione non risentisse di eventuali effetti di bordo, è stata effettuata l'impregnazione dall'alto, sfruttando la sovrapposizione di 6 strati di reti nella parte superiore al fine di assicurare un fronte di flusso il più omogeneo possibile, rilevando i tempi e successivamente gli spessori ottenuti.

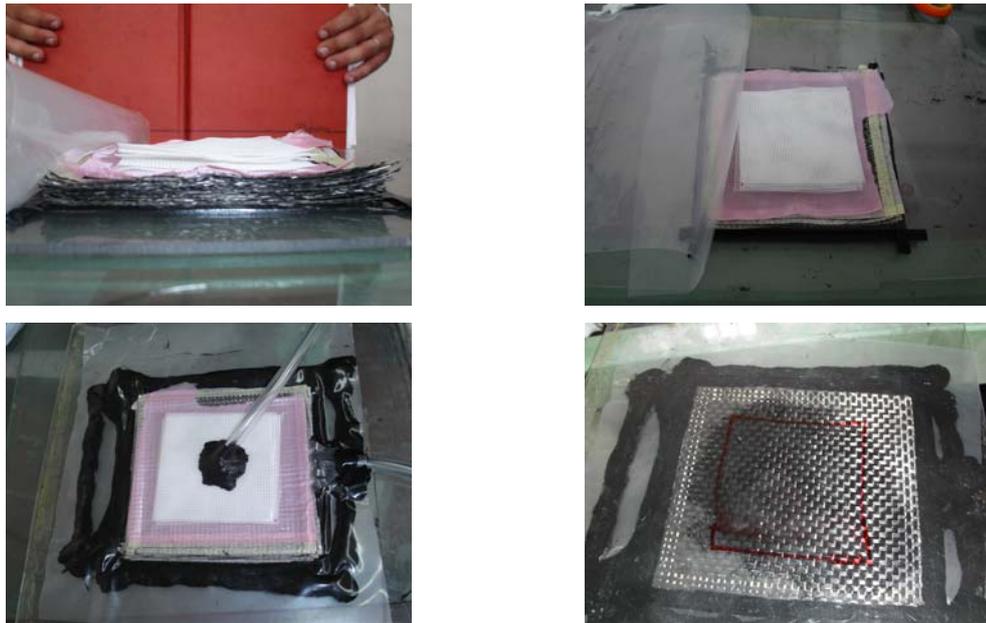


Figura 2.12 – Sequenza delle fasi per la misura della permeabilità trasversale

Con calcoli molto simili a quelli utilizzati nel caso longitudinale (calcolo del volume dalla geometria, della portata dalla sua definizione e della permeabilità dalla legge di Darcy), si è ottenuto il valore della permeabilità trasversale indicato in tabella 2.2.

Rinforzo	Permeabilità trasversale [m ²]
Tessuto in fibre di carbonio	$1,18 \cdot 10^{-13}$

Tabella 2.2

La seconda campagna di prove è stata articolata con le seguenti modalità:

- 6 strati di tessuto in carbonio con orientazione 0°/90°, ognuno dei quali con lunghezza pari a 25 cm e larghezza pari a 15 cm;
- 6 strati di tessuto in carbonio con orientazione ±45°, ognuno dei quali con lunghezza pari a 25 cm e larghezza pari a 15 cm;

Per misurare la permeabilità di tale rinforzo nella direzione 0° sono state effettuate due prove consecutive. In figura 2.13 si riportano due foto relative al processo di impregnazione.

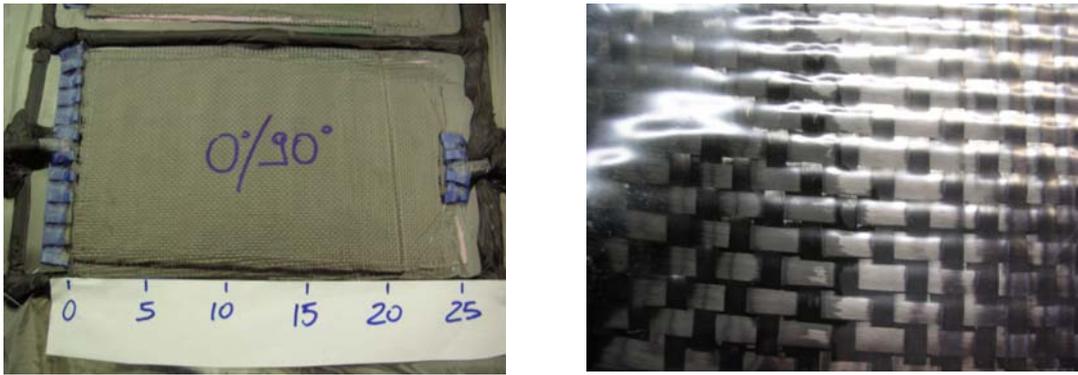


Figura 2.13 – Prova per la determinazione della permeabilità longitudinale del rinforzo 0°/90°.

I tempi rilevati nella prima prova sono riportati in tabella 2.3.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	372
100	982
150	170

Tabella 23

Nel rilevamento dei tempi ci si è fermati ai 15 cm dato che per raggiungere tale distanza la resina ha impiegato circa 30 minuti.

Il calcolo della permeabilità del tessuto è stato effettuato utilizzando la legge di Darcy e mediando i valori della permeabilità rilevati nei tre intervalli lunghi 5 cm l'uno in cui è possibile dividere la distanza di 15 cm percorsa dalla resina.

Partendo da queste ipotesi si ha:

$$k_{[0/5]} = 1.00 * 10^{-11} \text{ m}^2$$

$$k_{[5/10]} = 1.53 * 10^{-11} \text{ m}^2$$

$$k_{[10/15]} = 1.94 * 10^{-11} \text{ m}^2$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_m = 1.49 * 10^{-11} \text{ m}^2$.

I tempi rilevati nella seconda prova sono invece riportati in tabella 2.4:

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	348
100	960
150	1800

Tabella 2.4

Nel rilevamento dei tempi ci si è fermati nuovamente ai 15 cm dato che per raggiungere tale distanza la resina ha impiegato ancora circa 30 minuti.

Partendo dalle precedenti ipotesi si ha:

$$k_{[0/5]} = 1.07 * 10^{-11} m^2$$

$$k_{[5/10]} = 1.56 * 10^{-11} m^2$$

$$k_{[10/15]} = 1.87 * 10^{-11} m^2$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_m = 1.51 * 10^{-11} m^2$.

Mediando i due valori ottenuti, si ha $k_m = 1.50 * 10^{-11} m^2$ che sarà il valore della permeabilità longitudinale di tale rinforzo utilizzato nel seguito.

Anche per misurare la permeabilità longitudinale rinforzo nella direzione $\pm 45^\circ$ tale rinforzo sono state effettuate due prove consecutive. In figura 2.14 si riportano due foto relative al processo di impregnazione.

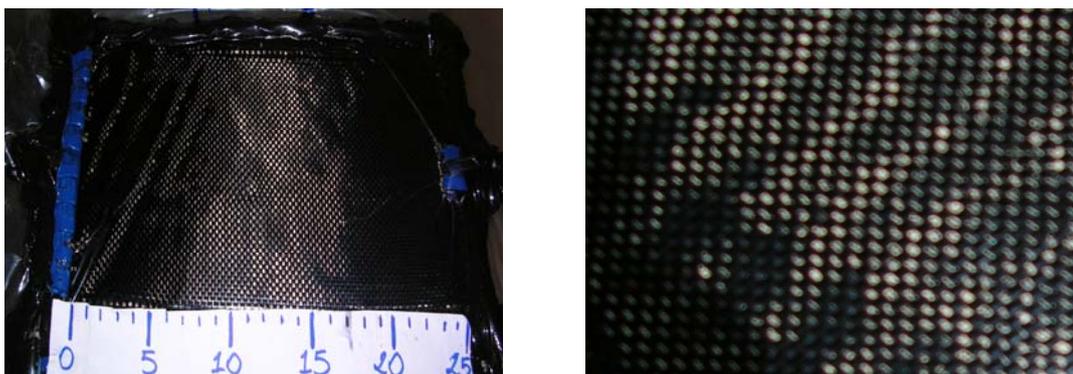


Figura 2.14 – Prova per la determinazione della permeabilità longitudinale del rinforzo $\pm 45^\circ$.

I tempi rilevati nella prima prova sono riportati in tabella 2.5.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	342
100	998
150	1850

Tabella 2.5

Nel rilevamento dei tempi ci si è fermati nuovamente ai 15 cm dato che per raggiungere tale distanza la resina ha impiegato oltre 30 minuti.

Ancora una volta il calcolo della permeabilità del tessuto è stato effettuato utilizzando la legge di Darcy e mediando i valori della permeabilità rilevati nei tre intervalli lunghi 5 cm l'uno in cui è possibile dividere la distanza di 15 cm percorsa dalla resina.

Partendo da queste ipotesi si ha:

$$k_{[0/5]} = 1.09 * 10^{-11} \text{ m}^2$$

$$k_{[5/10]} = 1.50 * 10^{-11} \text{ m}^2$$

$$k_{[10/15]} = 1.82 * 10^{-11} \text{ m}^2$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_m = 1.47 * 10^{-11} \text{ m}^2$.

I tempi rilevati nella seconda prova sono invece riportati in tabella 2.6.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	300
100	700
150	1320

Tabella 2.6

Partendo dalle precedenti ipotesi si ha:

$$k_{[0/5]} = 1.25 * 10^{-11} \text{ m}^2$$

$$k_{[5/10]} = 2.14 * 10^{-11} \text{ m}^2$$

$$k_{[10/15]} = 2.55 * 10^{-11} \text{ m}^2$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_m = 1.98 * 10^{-11} \text{ m}^2$.

Mediando i due valori ottenuti, si ha $k_m = 1.73 * 10^{-11} \text{ m}^2$.

2.5 Prove di permeabilità – Monodirezionale in fibra di carbonio 290 g/m²

Le tipologie di prove effettuate su tale materiale sono state:

- 4 strati di tessuto con orientazione 0°, ognuno dei quali con lunghezza pari a 25 cm e larghezza pari a 15 cm;
- 4 strati di tessuto con orientazione +45°, ognuno dei quali con lunghezza pari a 25 cm e larghezza pari a 15 cm;
- 4 strati di tessuto con orientazione 90°, ognuno dei quali con lunghezza pari a 25 cm e larghezza pari a 15 cm.

Lo spessore medio di uno strato è 0.28 mm. Tali provini sono stati posizionati sullo stesso stampo in modo da poter condurre la prova simultaneamente su tutti e tre i campioni. In tale modo si ha un confronto diretto tra le tre disposizioni del tessuto. Tale scelta è dettata anche dal fatto che il risultato delle prove di permeabilità varia con la temperatura ambiente che influenza la viscosità della resina. È quindi opportuno poter svolgere la prova sui diversi provini contemporaneamente, in modo da avere le stesse condizioni di temperatura ambiente.

In figura 2.15 si riportano le foto relative al processo di impregnazione della prima prova scattate in istanti diversi.





Figura 2.15 – Prova per la determinazione della permeabilità del rinforzo unidirezionale.

La seconda foto evidenzia come il flusso di resina sia più avanzato nel provino a 0° rispetto a quello a 90° e 45° e tale incremento aumenta con il proseguire della prova. Questo dato è atteso in quanto la resina riesce molto più facilmente a trovare un canale di scorrimento quando le fibre sono disposte lungo la direzione di propagazione del fronte di flusso, e naturalmente avrà una maggiore difficoltà quando incontra le fibre in disposizione trasversale.

Nella terza e quarta foto si nota molto bene un rigonfiamento del sacco elastomerico. Si tiene a precisare che ciò non è dovuto ad un ingresso di aria o ad un cedimento del sacco stesso. Questo fenomeno si verifica perché la portata di resina che entra dalla spirale nel provino non riesce a scorrere completamente tra le fibre, ed una parte di essa tende ad accumularsi attorno la spirale, determinando così il rigonfiamento del sacco. Tale anomalia non influenza la prova visto che il fronte di flusso è distante da tale accumulo, continuando così il suo percorso, indisturbato. E' interessante evidenziare che dall'esecuzione di queste prove si è potuto vedere chiaramente, come mostrato nelle foto di figura 2.16, il fenomeno del micro e macro flusso, già trattato nei capitoli precedenti. Tale fenomeno è dovuto dallo scorrere della resina all'interno di canali che si sono formati tra le fibre ammassate, e si può notare come il macro flusso sia predominante rispetto al micro flusso.

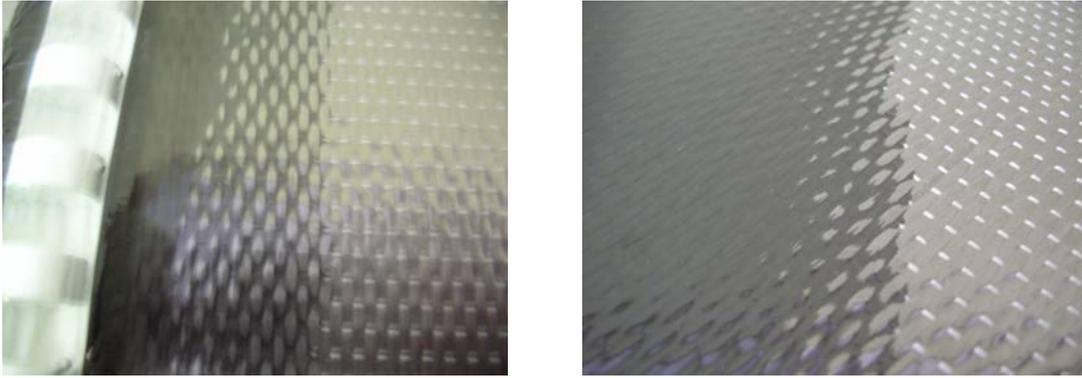


Figura 2.16 – Effetto micro e macro flusso su rinforzi disposti a 90° e 45°

I tempi rilevati nella prima prova, per la disposizione del rinforzo a 0°, sono riportati in tabella 2.7.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	35
100	180
150	385
200	680
250	1005

Tabella 2.7

si ha:

$$k_{[0-5]} = 1.07 * 10^{-10} m^2$$

$$k_{[5-10]} = 7.76 * 10^{-11} m^2$$

$$k_{[10-15]} = 9.15 * 10^{-11} m^2$$

$$k_{[15-20]} = 8.90 * 10^{-11} m^2$$

$$k_{[20-25]} = 1.04 * 10^{-10} m^2$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{m1}^0 = 9.38 * 10^{-11} m^2$.

I tempi rilevati per il rinforzo con disposizione a 90° sono invece riportati in tabella 2.8.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	135
100	510
150	860

Tabella 2.8

Nel rilevamento dei tempi si è fermati a 150 mm dato che per raggiungere la soglia dei 200 mm la resina ha superato il tempo di gelificazione, dovendo interrompere la prova.

Partendo dalle precedenti ipotesi si ha:

$$k_{[0-5]} = 2.78 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[5-10]} = 3 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[10-15]} = 5.36 * 10^{-11} m^2;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{m1}^{90} = 3.712 * 10^{-11} m^2$.

I tempi rilevati per il rinforzo con disposizione a +45° sono invece riportati in tabella 2.9.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	135
100	520
150	1320

Tabella 2.9

Anche in questo caso non si è potuto andare oltre il terzo intervallo avendo raggiunto il gel-time della resina.

I valori di permeabilità ricavati sono:

$$k_{[0-5]} = 2.78 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[5-10]} = 2.92 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[10-15]} = 2.34 * 10^{-11} m^2;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{m1}^{45} = 2.68 * 10^{-11} m^2$.

E' stata svolta una seconda prova di permeabilità seguendo la stessa tecnica descritta per la prima prova.

I tempi rilevati, per la direzione 0° del rinforzo, sono riportati in tabella 2.10.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	35
100	190
150	490

Tabella 2.10

I valori di permeabilità ricavati sono:

$$k_{[0-5]} = 1.07 * 10^{-10} m^2;$$

$$k_{[5-10]} = 7.26 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[10-15]} = 6.25 * 10^{-11} m^2;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{m2}^0 = 8.07 * 10^{-11} m^2$.

Per la direzione 90° si riportano i tempi in tabella 2.11.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	50
100	310

Tabella 2.11

I valori di permeabilità ricavati sono:

$$k_{[0-5]} = 7.5 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[5-10]} = 4.33 * 10^{-11} m^2;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{m2}^{90} = 5.91 * 10^{-11} m^2$.

Per la direzione 45° si sono rilevati i tempi riportati in tabella 2.12.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	120
100	310
150	540

Tabella 2.12

I valori di permeabilità ricavati sono:

$$k_{[0-5]} = 3.12 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[5-10]} = 5.92 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[10-15]} = 8.15 * 10^{-11} m^2;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{m2}^{45} = 5.73 * 10^{-11} m^2$.

Nella foto di figura 2.17 sono riportati ulteriori provini realizzati con le fibre disposte nelle direzioni 45° e 90°.

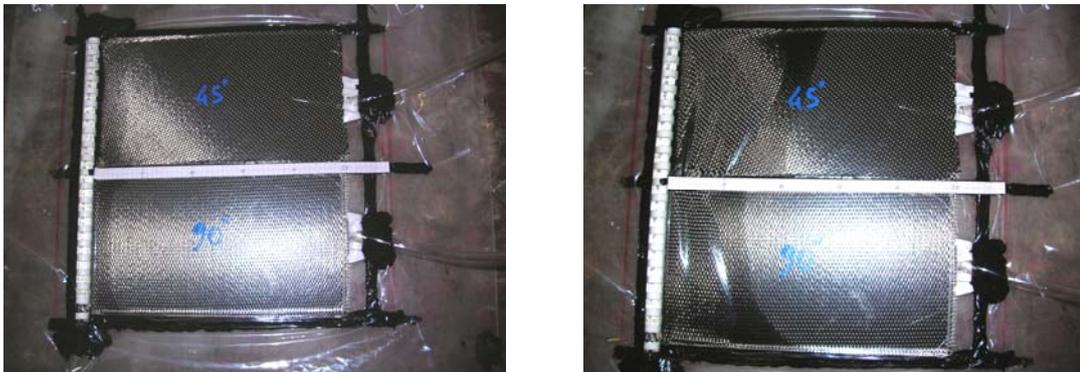


Figura 2.17 – Prove di permeabilità (45° e 90°)

Per la direzione 90° si sono ottenuti i tempi riportati in tabella 2.13.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	180
100	620
150	1160

Tabella 2.13

I valori di permeabilità ricavati sono:

$$k_{[0-5]} = 2.08 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[5-10]} = 2.56 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[10-15]} = 3.47 * 10^{-11} m^2$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{m2}^{90} = 2.7 * 10^{-11} m^2$.

Per la direzione 45° si sono ottenuti i tempi riportati in tabella 2.14.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	95
100	340
150	860

Tabella 2.14

I valori di permeabilità ricavati sono:

$$k_{[0-5]} = 3.95 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[5-10]} = 4.59 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[10-15]} = 3.61 * 10^{-11} m^2;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{m2}^{45} = 4.05 * 10^{-11} m^2$.

E' stata svolta, poi, una terza prova con i seguenti tempi rilevati e valori di permeabilità calcolati come fatto in precedenza.

Per la direzione 0° si sono ottenuti i valori riportati in tabella 2.15.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	37
100	180
150	330
200	670
250	1215

Tabella 2.15

I valori di permeabilità ricavati sono:

$$k_{[0-5]} = 1.01 * 10^{-10} m^2 ;$$

$$k_{[5-10]} = 7.87 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[10-15]} = 1.25 * 10^{-10} m^2 ;$$

$$k_{[15-20]} = 7.72 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[20-25]} = 6.19 * 10^{-11} m^2 ;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{m3}^0 = 8.88 * 10^{-11} m^2$.

Per la direzione 90° si sono ottenuti i valori riportati in tabella 2.16.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	240
100	600
150	1130

Tabella 2.16

I valori di permeabilità ricavati sono:

$$k_{[0-5]} = 1.56 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[5-10]} = 3.12 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[10-15]} = 3.54 * 10^{-11} m^2$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{m3}^{90} = 2.74 * 10^{-11} m^2$.

Per la direzione 45° si sono ottenuti i valori riportati in tabella 2.17.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	100
100	545

Tabella 2.17

I valori di permeabilità ricavati sono:

$$k_{[0-5]} = 3.75 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[5-10]} = 2.53 * 10^{-11} m^2 ;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_m^{45} = 3.14 * 10^{-11} m^2$.

Anche in questo caso si è avuto effetto di bordo sui provini con fibre a 45° e 90°. Questa volta però è possibile non ripetere la prova visto che l'anomalia si è presentata nell'intervallo 10-15 cm, non influenzando quindi i primi due rilevamenti e determinando effetti marginali sul terzo. Successivamente l'influenza del difetto è stata determinante, falsando completamente i tempi per il quarto e quinto intervallo.

Mediando i valori ottenuti, si ricava il valore della permeabilità longitudinale dei rinforzi nelle direzioni 0°, 90° e 45° come segue:

$$k_m^0 = 8.78 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_m^{45} = 3.29 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_m^{90} = 3.05 * 10^{-11} m^2.$$

2.6 Prove di permeabilità – Monodirezionale in fibra di carbonio 290 g/m² – laminati con variazione dell'angolo delle fibre delle lamine

Essendo la fibra unidirezionale cucita molto innovativa e ancora poco conosciuta, è necessario che si verifichi la validità della regola delle miscele per il calcolo della permeabilità di un laminato composito costituito da questo particolare materiale. Si ricorda che la regola della miscela è

$$K_{tot} = \frac{\sum K_{Li} H_{Li}}{\sum H_{Li}}$$

cioè la permeabilità totale di un laminato K_{tot} è data dalla sommatoria del prodotto della permeabilità di ogni lamina K_{Li} e del corrispettivo spessore H_{Li} diviso lo spessore totale del laminato. Questa formula ha dato ottimi risultati nel caso di tessuti in fibra di vetro, dando una previsione della permeabilità totale molto accurata, ma non si può dire lo stesso per il tessuto non-crimp, dovendo quindi verificare la sua validità.

Per questo motivo si sono condotte delle prove di permeabilità su un provino costituito da 4 strati di tessuto in carbonio con orientazione 0°/45°/0°/90°, ognuno dei quali con lunghezza pari a 25 cm e larghezza pari a 15 cm.

Successivamente è stata calcolata la permeabilità totale con la regola delle miscele per verificare se esiste una congruenza tra il risultato sperimentale e quello analitico.

Sono stati realizzati due provini e posti sullo stesso stampo in modo da poter condurre la prova simultaneamente per avere le stesse condizioni di temperatura ambiente che, come già accennato, influenza la viscosità della resina.

In figura 2.18 si riportano le foto relative al processo di impregnazione della prova scattate in istanti diversi.

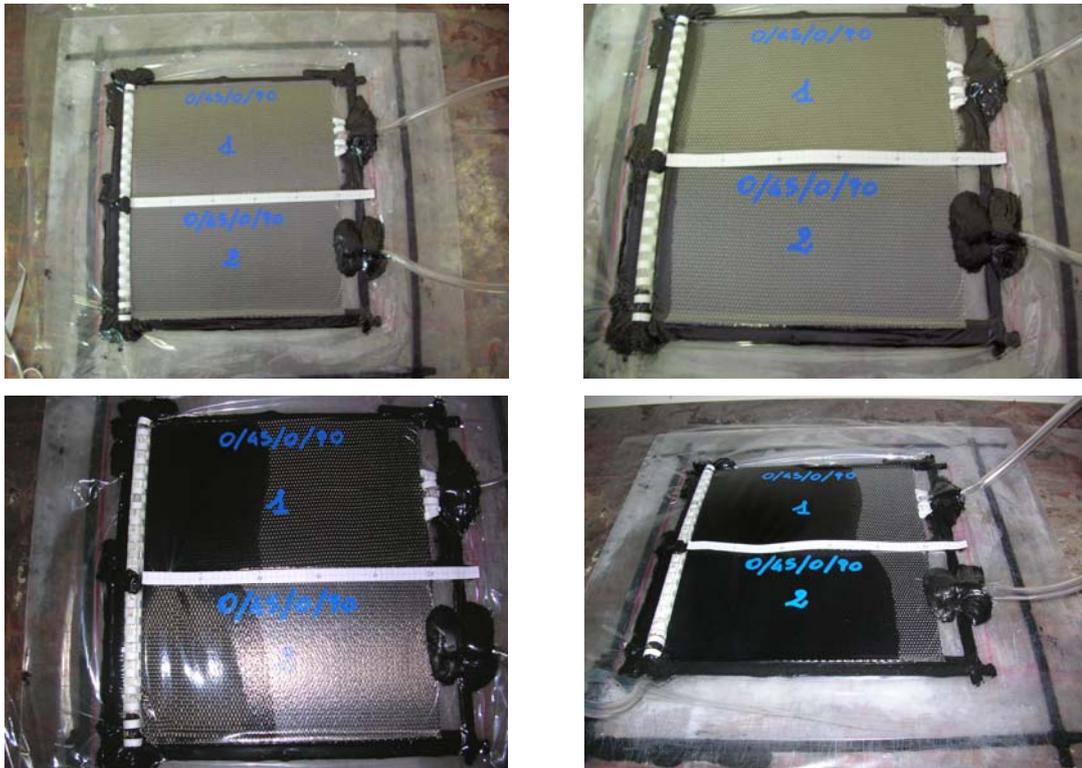


Figura 2.18 – Laminati con variazione dell'angolo delle fibre.

I tempi rilevati per il primo provino sono riportati in tabella 2.18, mentre quelli relativi al secondo provino sono riportati in tabella 2.19.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	70
100	200
150	340
200	560
250	825

Tabella 2.18

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	60
100	160
150	290
200	440
250	610

Tabella 2.19

I valori della permeabilità per il primo provino sono:

$$k_{[0-5]} = 5.36 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[5-10]} = 8.65 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[10-15]} = 1.34 * 10^{-10} m^2;$$

$$k_{[15-20]} = 1.19 * 10^{-10} m^2;$$

$$k_{[20-25]} = 1.27 * 10^{-10} m^2;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_1 = 1.04 * 10^{-10} m^2$.

I valori della permeabilità per il secondo provino:

$$k_{[0-5]} = 6.25 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{[5-10]} = 1.12 * 10^{-10} m^2;$$

$$k_{[10-15]} = 1.44 * 10^{-10} m^2;$$

$$k_{[15-20]} = 1.75 * 10^{-10} m^2;$$

$$k_{[20-25]} = 1.98 * 10^{-10} m^2;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_2 = 1.38 * 10^{-10} m^2$.

Utilizzando i valori sperimentali di permeabilità della fibra nelle tre direzioni prima esaminate, è stata applicata la regola delle miscele per il laminato in questione, ottenendo i seguenti valori:

$$k_{xx} = 5.98 * 10^{-11} m^2;$$

$$k_{yy} = 4.51 * 10^{-11} m^2;$$

dove k_{xx} e k_{yy} sono le permeabilità calcolate per le direzioni principali x (parallela al gradiente di pressione) e y.

Dal confronto di questi dati emerge che esiste una grande differenza tra i valori sperimentali e quelli analitici. In particolare il valore analitico è di un ordine di grandezza più piccolo di quello sperimentale.

A questo punto è stato necessario compiere altre prove di permeabilità cambiando la sequenza di orientamento delle ply, in modo da avere ulteriori dati per poter giustificare tale discostamento tra i risultati teorici e sperimentali.

Successivamente sono state cambiate le dimensioni del provino in 100 mm x 200 mm. Queste dimensioni molto restrittive obbligano ad una deposizione delle fibre molto accurata, in modo da evitare radicalmente il fenomeno dell'effetto di bordo.

E' stata condotta una singola prova su quattro provini posti sullo stesso stampo, in modo da potere considerare la viscosità della resina costante e da avere un confronto diretto della rilevazione dei tempi. I laminati sono di tre tipi:

- 1 provino di 4 strati di tessuto con orientazione 0°
- 2 provini di 4 strati di tessuto con orientazione $0^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ$
- 1 provino di 4 strati di tessuto con orientazione $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$

In figura 2.19 sono mostrati i provini in due istanti diversi della prova.



Figura 2.19 – Provini di dimensioni 100mm x 200mm.

I tempi rilevati per i suddetti provini sono riportati in tabella 2.19.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]	Tempo trascorso [s]	Tempo trascorso [s]
	0°	0°/0°/90°/90°	0°/90°/0°/90°
50	33	60	40
100	118	314	118
150	300	595	241
200	568	1007	318

Tabella 2.19

I valori della permeabilità per il provino 0° sono:

$$k_{[0-5]} = 1.14 * 10^{-10} m^2 ;$$

$$k_{[5-10]} = 1.32 * 10^{-10} m^2 ;$$

$$k_{[10-15]} = 1.04 * 10^{-10} m^2 ;$$

$$k_{[15-20]} = 9.8 * 10^{-11} m^2 ;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{0^\circ} = 1.12 * 10^{-10} m^2$.

I valori della permeabilità per il provino 0°/0°/90°/90° sono:

$$k_{[0-5]} = 6.25 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[5-10]} = 4.43 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[10-15]} = 6.7 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[15-20]} = 6.4 * 10^{-11} m^2 ;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{0^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ} = 5.9 * 10^{-11} m^2$.

I valori della permeabilità per il provino 0°/90°/0°/90° sono:

$$k_{[0-5]} = 9.4 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[5-10]} = 1.44 * 10^{-10} m^2 ;$$

$$k_{[10-15]} = 1.52 * 10^{-10} m^2 ;$$

$$k_{[15-20]} = 3.4 * 10^{-10} m^2 ;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ} = 1.83 * 10^{-10} m^2$.

Da questi risultati si nota innanzitutto che la sequenza 0°/90°/0°/90° ha una permeabilità maggiore del provino a 0°, cioè la resina scorre più velocemente. Ciò induce a pensare

che essendo la fibra in esame molto compatta, quando vengono posti più strati con la stessa orientazione uno sull'altro, si determinano dei canali di scorrimento della resina tra i tows molto piccoli. Essendo le fibre orientate tutte allo stesso modo, in direzione parallela al flusso di resina, le varie lamine, tendono a compattarsi maggiormente rispetto alla configurazione che vede alternarsi lamine con orientazioni trasversali. Questa considerazione è confermata anche dal valore di permeabilità del secondo provino che risulta essere il più piccolo. Questo si spiega perché abbiamo due strati consecutivi a 0° e due strati consecutivi a 90° . La resina troverà difficoltà a scorrere tra le fibre a 0° , vista la loro elevata compattazione, ed una difficoltà ancora maggiore a scorrere tra le fibre, anch'esse compatte e disposte trasversalmente alla direzione di scorrimento del flusso. Il percorso più agevole sarà necessariamente quello che si interpone tra la lamina a 0° e quella a 90° . Il secondo provino avrà quindi meno canali tra i tow di scorrimento rispetto al provino che vede alternate lamine con disposizione perpendicolare tra loro. Il laminato con quattro fibre a 0° anche se risulta essere molto compatto, ha comunque le fibre orientate nella stessa direzione del gradiente di pressione, consentendo quindi alla resina di scorrere con buona rapidità tra le stesse.

Da questa prova si è anche avuta la conferma che la regola delle miscele non risolve il problema della permeabilità del lamina, dando dei risultati poco attendibili.

Infatti il provino secondo e terzo, anche se hanno lamine disposte diversamente, sono costituiti dallo stesso numero di lamine con pari orientazioni e considerando che gli spessori sono uguali, la regola delle miscele fornisce lo stesso risultato pari a $6.2 \cdot 10^{-11} m^2$. Invece le prove sperimentali danno risultati molto diversi tra loro e con la regola delle miscele. Questa discrepanza è ancora riconducibile alla forte compattazione dei tows.

In figura 2.20 sono riportate alcune foto fatte al microscopio su un provino costituito da lamine unidirezionali cucite con disposizione $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$. Per questi campioni è stata fatta una impregnazione manuale con stampo e controstampo con una compressione di 0.4 atm.

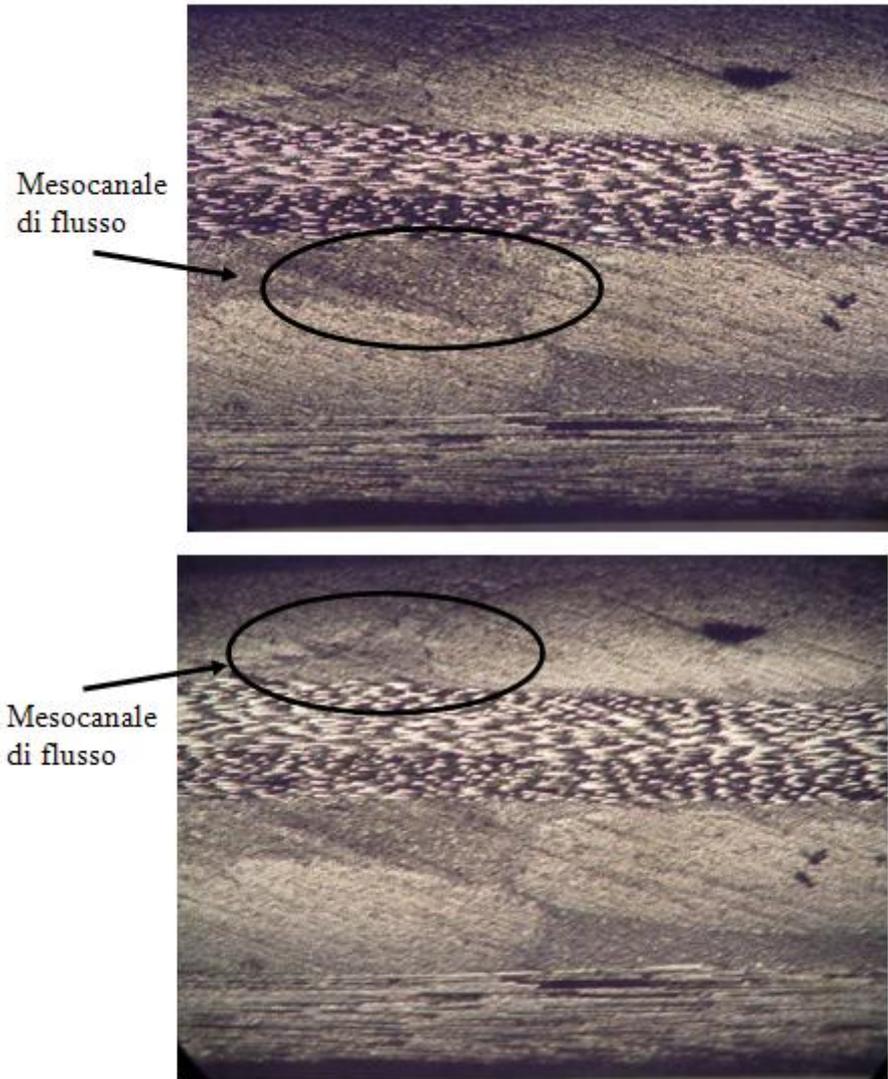


Figura 2.20 – Laminato di fibra unidirezionale cucita $[90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}]$ visto al microscopio: negli ovali è evidenziato il canale di mesoflusso che si crea tra le lamine.

Queste immagini verificano le ipotesi su dette e permettono di trarre un'ultima considerazione: il fascio di fibre si mantiene pressoché lineare con una curvatura solo in corrispondenza del filo di cucitura. Anche se questa fibra non è del tipo non-crimp (le lamine non sono cucite tra di loro) si presenta, però, con un comportamento molto simile avendo, tra una lamina e l'altra, degli effetti di crimp molto deboli. Le fibre, e quindi i tow che compongono, tendono a rimanere nel piano della lamina. In questo modo tra le lamine si determinano dei mesocanali nei quali non può più essere considerata la legge di Darcy bensì quella di Stokes, rifacendosi quindi agli studi condotti sulle fibre non-crimp.

Successivamente si sono realizzate delle prove di permeabilità su tale rinforzo monodirezionale utilizzando come matrice la resina monocomponente RTM6, la quale

richiede una temperatura di processo di 120°C ed una temperatura di cura di 180°C per ottenere le quali si è usato un sistema di riscaldamento ad infrarossi (figura 2.21)

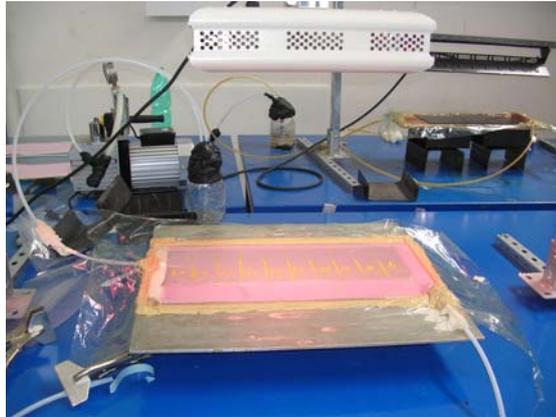


Figura 2.21 – Fase di riscaldamento di un laminato da infondere con resina RTM6.

Le tipologie di stratifica studiate sono state:

- $[0/90]_6$;
- $+45/45/[0/90]_4/+45/-45$;
- $[0/90]_2/[+45/-45]_2/[0/90]_2$.

In figura 2.22 si riporta una foto del processo di impregnazione, in cui è possibile notare le linee tracciate sul sacco elastomerico per il calcolo dei tempi di impregnazione, mentre in tabella 2.20, 2.21 e 2.22 si riportano i tempi rilevati durante le prove effettuate.



Figura 2.22 – Impregnazione di un laminato in fibra di carbonio unidirezionale con resina RTM6.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]	Tempo trascorso [s]	Tempo trascorso [s]
	I provino [0/90] ₆	II provino [0/90] ₆	III provino [0/90] ₆
50	66	175	40
100	198	370	100
150	402	635	193
200	674	950	332
250	990	1291	490
300	1342	1920	704

Tabella 2.20

I valori della permeabilità per il provino [0/90]₆ sono quindi:

$$k_{[0-5]} = 4.60 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[5-10]} = 2.51 * 10^{-11} m^2 ;$$

$$k_{[10-15]} = 6.56 * 10^{-11} m^2 ;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{0/90} = 4.56 * 10^{-11} m^2$.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]	Tempo trascorso [s]	Tempo trascorso [s]
	I provino +45/45/[0/90] ₄ +45/-45	II provino +45/45/[0/90] ₄ +45/-45	III provino +45/45/[0/90] ₄ +45/-45
50	20	17	28
100	45	66	95
150	80	135	210
200	139	240	300
250	220	365	430
300	315	515	554
350	435	706	678

Tabella 2.21

I valori della permeabilità per il provino +45/45/[0/90]₄+45/-45 sono quindi:

$$k_{[0-5]} = 1.50 * 10^{-10} m^2 ;$$

$$k_{[5-10]} = 0.86 * 10^{-10} m^2 ;$$

$$k_{[10-15]} = 0.95 * 10^{-10} m^2 ;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{0/90} = 1.10 * 10^{-10} m^2$.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]	Tempo trascorso [s]	Tempo trascorso [s]
	I provino [0/90] ₂ /[+45/-45] ₂ /[0/90] ₂	II provino [0/90] ₂ /[+45/-45] ₂ /[0/90] ₂	III provino [0/90] ₂ /[+45/-45] ₂ /[0/90] ₂
50	20	10	18
100	65	50	47
150	135	112	130
200	222	190	198
250	332	276	303
300	480	370	420
350	650	485	560
400	840	598	725
450	1100	730	907
500	1460	940	1160

Tabella 2.22

I valori della permeabilità per il provino [0/90]₂/[+45/-45]₂/[0/90]₂ sono quindi:

$$k_{[0-5]} = 0.90 * 10^{-10} m^2 ;$$

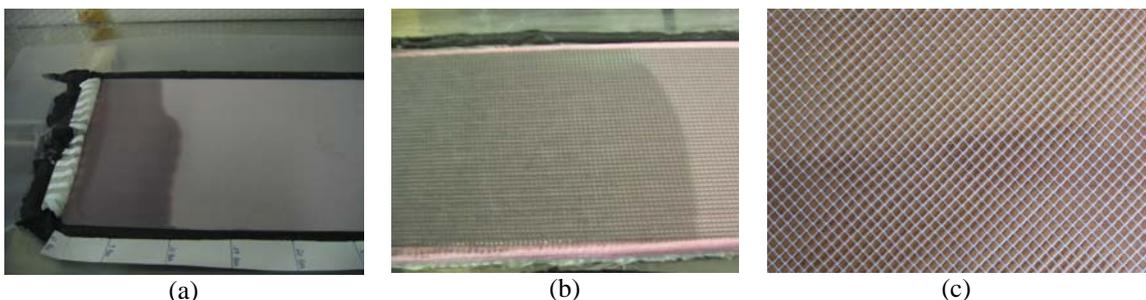
$$k_{[5-10]} = 1.32 * 10^{-10} m^2 ;$$

$$k_{[10-15]} = 1.43 * 10^{-10} m^2 ;$$

da cui si ottiene un valore medio pari a $k_{0/90} = 1.22 * 10^{-10} m^2$.

2.7 Prove di permeabilità – Distributori di tipo rete.

Successivamente sono state effettuate delle prove di permeabilità su tre distributori di tipo rete (figura 2.23), di cui uno a maglia quadrata (colore bianco) e due a maglia romboidale (colore verde e colore bianco).



2.23 – Distributori di tipo rete: (a) maglia quadrata (colore bianco); (b) maglia romboidale (colore verde); (c) maglia romboidale (colore bianco);

In figura 2.24 a titolo di esempio si riportano alcune foto delle prove effettuate sul distributore di tipo rete a maglia romboidale di colore bianco.

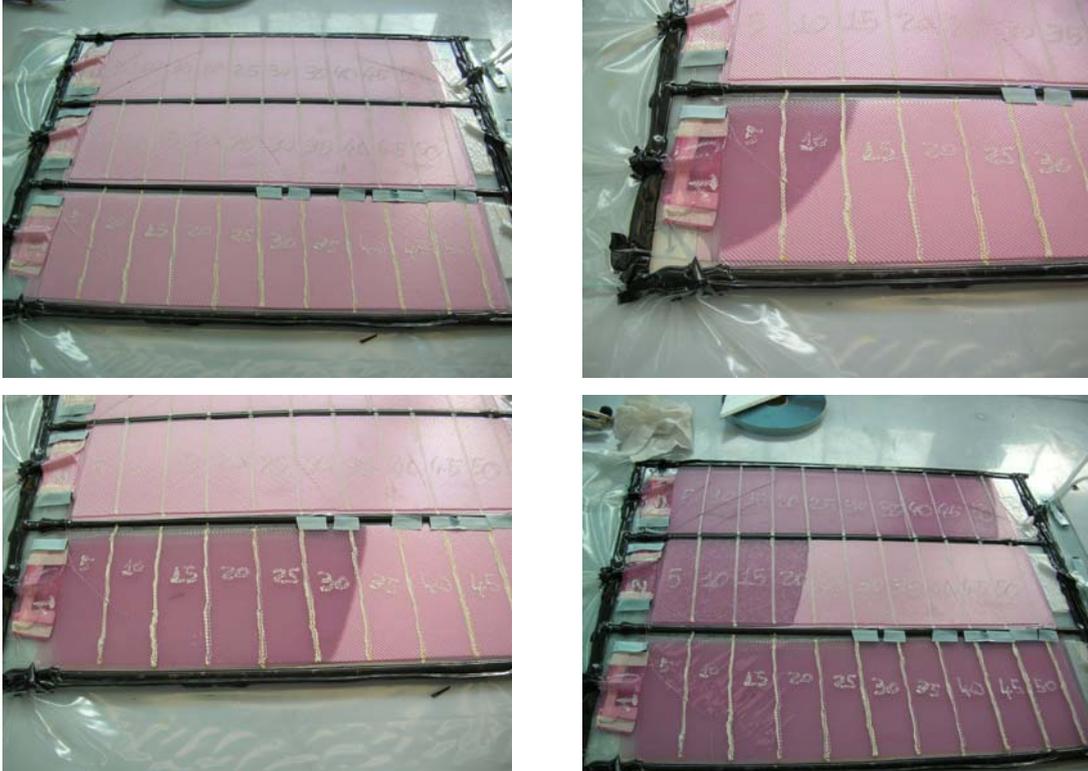


Figura 2.24 – Prove di permeabilità con distributore a maglia romboidale (colore bianco)

In tabella 2.23 si riportano i valori di permeabilità calcolati, tenendo conto che i distributori non sono in realtà mezzi porosi.

Tipologia distributore	Permeabilità longitudinale [m ²]
Distributore a maglia quadrata	$1.51 \cdot 10^{-9}$
Distributore a maglia quadrata (2 strati)	$2.40 \cdot 10^{-9}$
Distributore a maglia romboidale (colore verde) a 0°/90°	$1.73 \cdot 10^{-8}$
Distributore a maglia romboidale (colore verde) a ±45°	$1.70 \cdot 10^{-8}$
Distributore a maglia romboidale 1 strato (colore bianco)	$1.87 \cdot 10^{-9}$
Distributore a maglia romboidale 2 strati (colore bianco)	$8.20 \cdot 10^{-9}$

Tabella 2.23

2.8 Validazione FEM

Al fine di testare e quindi validare il programma FEM (RTM-Worx) individuato quale supporto per l'analisi del processo di infusione, si è resa necessaria la realizzazione di opportune prove di impregnazione per confrontare i dati di output del suddetto codice FEM con dei dati ricavati da esperimenti. Tali confronti vedranno anche l'applicazione dell' "analogia parallela" (metodo per l'ottenimento di un valore di permeabilità equivalente di un qualunque stratificato e in grado di fornire una relazione analitica per la previsione dei tempi di impregnazione di un laminato qualsiasi). Per tali esperimenti si è utilizzato, quale rinforzo, un tessuto in vetro avente una grammatura pari a 400 g/m². Le prove effettuate possono raggrupparsi in due categorie:

1. laminati di grosse dimensioni con geometria semplice (geometrie rettangolari di lunghezza superiore ai 50cm);
2. laminati con geometria complessa (in cui sono presenti variazioni di sezione e in cui il flusso di resina subisce significative variazioni di direzione).

Resta ancora da precisare che le prove di permeabilità svolte in precedenza sono rivolte alla realizzazione di elementi in fibra di carbonio per il settore aeronautico, mentre le prove di validazione del codice FEM verranno eseguite, come detto, con un tessuto di vetro, comportando quindi ulteriori prove di permeabilità al fine di conoscere i dati di ingresso necessari alla simulazione.

2.8.1 Prove di permeabilità sul tessuto in fibra di vetro

In figura 2.25 si riporta una foto del processo di impregnazione di alcune prove di permeabilità eseguite sul rinforzo in fibra di vetro, mentre i tempi medi rilevati durante le prove effettuate sono riportati in tabella 2.24.

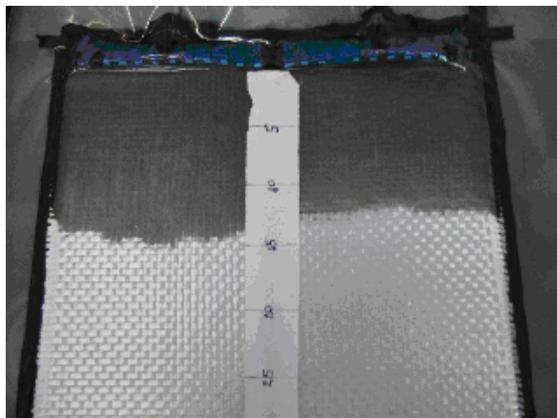


Figura 2.25 – Prova di permeabilità sul rinforzo in fibra di vetro.

Lunghezza percorsa [mm]	Tempo trascorso [s]
50	150
100	433
150	900
200	1720

Tabella 2.24

Il calcolo della permeabilità, misurato uno spessore pari a 3 mm restituisce:

$$\Delta V = \frac{(0,10 - 0,05) \cdot 0,16 \cdot 0,003}{2} = 1,20 \cdot 10^{-5} m^3$$

da cui è possibile ricavare la portata Q

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1,20 \cdot 10^{-5}}{(433 - 150)} = 3,58 \cdot 10^{-8} \frac{m^3}{s}$$

e quindi calcolare la permeabilità K_l

$$K_l = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{\sigma \cdot \Delta p} = 0,372 \cdot 10^{-10} m^2.$$

2.8.2 Prove Standard su laminati con geometrie semplici

I laminati realizzati presentano dimensioni differenti (in larghezza, lunghezza e numero di strati) a seconda degli scopi desiderati. Su ognuno di essi sono stati poi rilevati gli spessori. Prima di descrivere le singole prove è necessaria una precisazione. Il controllo dell'avanzamento della resina è stato fatto finora (prove di permeabilità) guardando la prova dall'alto e cioè dal lato del controstampo (sacco elastomerico trasparente). Tale verifica non è però sufficiente nei laminati prodotti con uno o più distributori poiché, come visualizzato in figura 2.26, l'avanzamento in questi casi non è uniforme nella direzione trasversale. Di seguito verranno riportati le tabelle dei tempi di impregnazione dei laminati e successivamente, calcolata la funzione del tempo di impregnazione $t(x)$, verranno riportati i dati di impregnazione secondo l'analogia elettrica e secondo il simulatore FEM con un diagramma comparativo dei tre tempi.

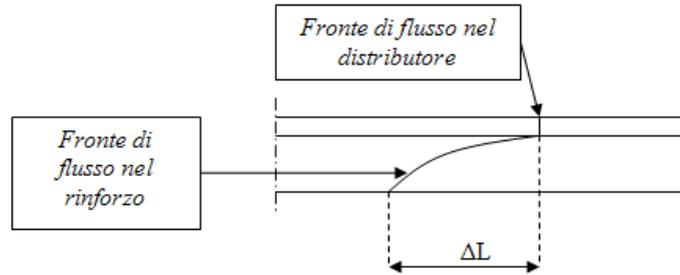


Figura 2.26 – Andamento del fronte di flusso nello spessore del rinforzo.

Per conoscere il reale valore dei tempi, è stato necessario guardare l'avanzamento del fronte di flusso dal lato dello stampo, e cioè dalla faccia inferiore del sistema. Si è quindi utilizzato un opportuno stampo trasparente ed inoltre si è creato un particolare sistema di appoggi, che permettessero la vista della prova dal basso.

2.8.2.1 Laminato simmetrico con immissione centrale

Il primo laminato realizzato all'interno di questo lavoro con la tecnologia RIFT è stato un laminato della lunghezza di 1 metro e largo 200 mm, con una immissione posta al centro del laminato e due distributori sovrapposti, formato da 8 strati di tessuto, come mostrato in figura 2.27.

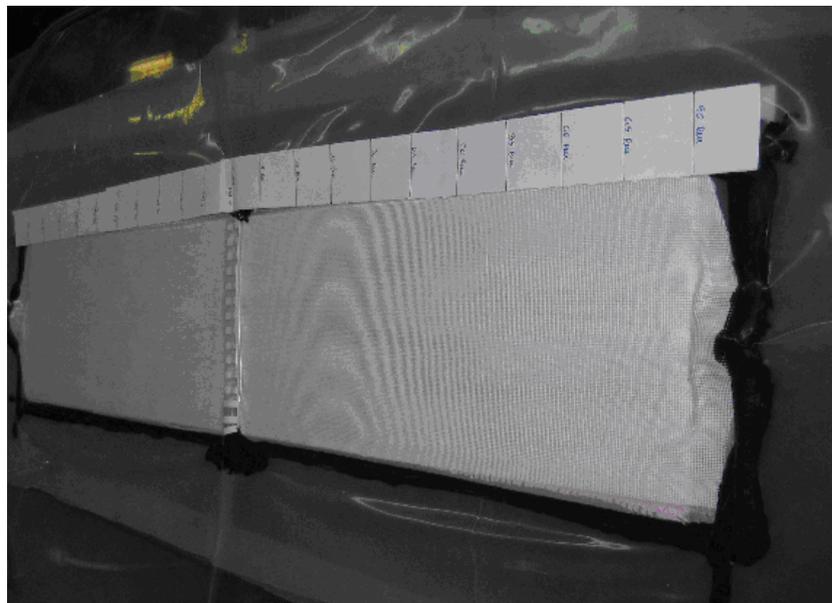


Figura 2.27 – Laminato simmetrico di lunghezza 1 metro.

I tempi di impregnazione del laminato rilevati sono riportati in tabella 2.25.

Distanza [mm]	Tempi lato destro [s]	Tempi lato sinistro [s]
50	58	58
100	96	88
150	138	127
200	213	204
250	302	282
300	360	340
350	480	477
400	610	600
450	730	720
500	960	900

Tabella 2.25

Sono anche stati rilevati gli spessori in diversi punti del laminato dopo la fine della polimerizzazione, rilevando uno spessore medio di 3.1 mm.

A questo punto, utilizzando i dati di permeabilità trovati in precedenza è possibile sostituire i parametri nella formula della portata, che si ricorda essere in questo caso:

$$Q = \Delta p \frac{\frac{2 \cdot \mu \cdot x}{k_{eq} \cdot \sigma_d} + \frac{\mu \cdot x}{k_l \cdot \sigma_l}}{\frac{2 \cdot \mu \cdot x}{k_{eq} \cdot \sigma_d} \cdot \frac{\mu \cdot x}{k_l \cdot \sigma_l}}$$

Si ottiene dunque:

$$Q = \frac{7,70}{10^8 x}$$

Mentre il tempo viene rappresentato dall'espressione:

$$t = 0,805 \cdot 10^4 \left(\frac{x^2}{2} \right)$$

A questo punto è possibile impostare un confronto tra i tempi reali, quelli derivanti dall'analogia elettrica e quelli della simulazione, in funzione della distanza (diagramma di figura 2.28).

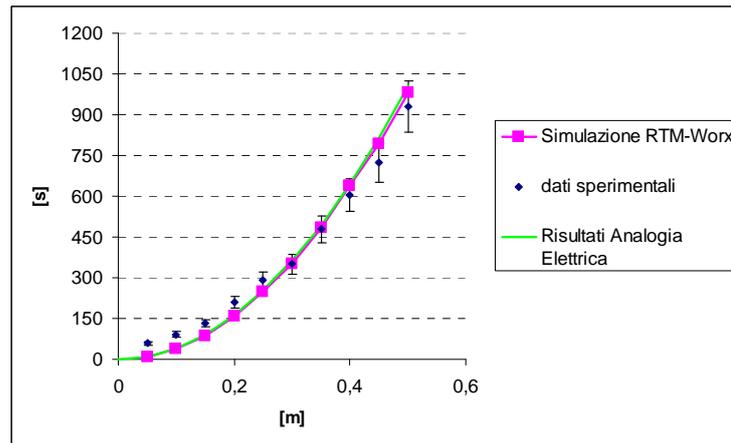


Diagramma 2.29

Si sottolinea che nel diagramma di figura 2.29 i dati vengono riportati graficamente tutti in modo differente: i valori reali vengono riportati come semplici punti perché sono quelli rilevati sperimentalmente alle rispettive distanze; i dati dell’analogia elettrica sono invece rappresentati da una curva continua parabolica (il motivo è che tale curva è la rappresentazione grafica dell’equazione del tempo secondo la suddetta analogia); i valori della simulazione con il programma FEM vengono invece visualizzati come punti e uniti da una curva (i punti rappresentano i dati rilevati alle varie distanze di 50 mm, 100 mm e così via, che rappresentano però solo un sottoinsieme dei punti effettivamente rilevabili e quindi è necessario interpolarli).

2.8.2.2 Laminato 4 strati di lunghezza 1 metro

Al fine di impregnare un laminato della lunghezza pari ad 1 metro è stato deciso come seconda tipologia di laminato da impregnare uno costituito da 4 strati di tessuto e da due reti sovrapposte. Il laminato è mostrato in figura 2.30.



Figura 2.30 – Laminato di lunghezza 1 metro (4 strati) con un unico punto di immissione ed un unico punto di aspirazione.

Tali laminati aventi, come i precedenti, la dimensione trasversale pari a 200 mm presentano una immissione su uno dei lati trasversali e l'uscita dalla parte opposta.

Contemporaneamente ai tempi di impregnazione sono state rilevate le differenze di avanzamento tra il fronte del flusso di resina all'interno del distributore e il fronte all'interno del laminato.

Di seguito (tabella 2.26) vengono riportati i dati relativi all'impregnazione dei laminati ottenuti effettuando la media dei due laminati in questione impregnati:

Distanza [mm]	Tempo d'impregnazione [s]	Distanza [mm]	Tempo d'impregnazione [s]
50	43	550	680
100	73	600	777,5
150	101	650	885
200	139	700	1048
250	190,5	750	1195
300	243,5	800	1346,5
350	313	850	1510
400	377,5	900	1741,5
450	460	950	1925
500	567	1000	2122,5

Tabella 2.26

Lo spessore medio rilevato è di 1,6mm. La portata ottenuta sempre considerando l'analogia parallela è:

$$Q = \frac{3,97}{10^8 x}$$

Mentre il tempo viene rappresentato dall'espressione:

$$t = 0,415 \cdot 10^4 \left(\frac{x^2}{2} \right)$$

a questo punto viene nuovamente riportato il confronto tra i tempi ottenuti secondo

l'analogia elettrica, i tempi sperimentali e quelli del RTM-Worx (diagramma di figura 2.31)

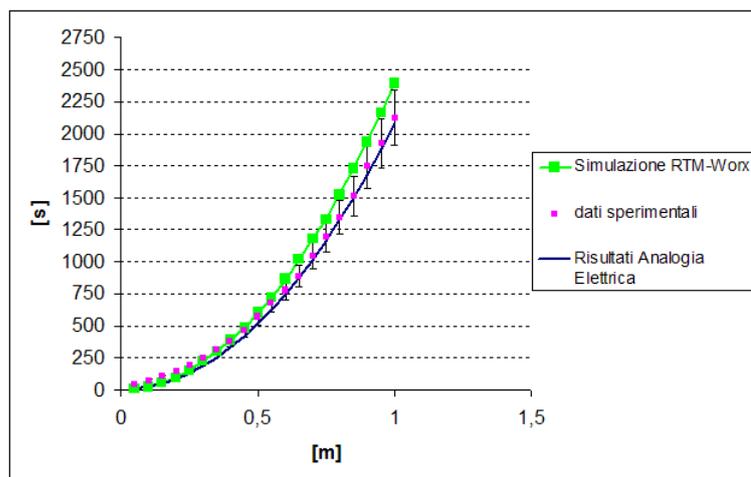


Figura 2.31 – Confronto tra i dati teorici e quelli sperimentali nel caso del laminato di lunghezza 1 metro (4 strati) con un unico punto di immissione ed un unico punto di aspirazione

Nel diagramma di figura 2.32 viene anche riportato il diagramma della differenza dell'avanzamento della resina tra il distributore e le fibre. In esso si può notare che la differenza del fronte del flusso di resina tra distributore e fibre (asse delle ordinate) va diminuendo con l'aumentare della distanza percorsa dalla resina nel distributore (asse delle ascisse).

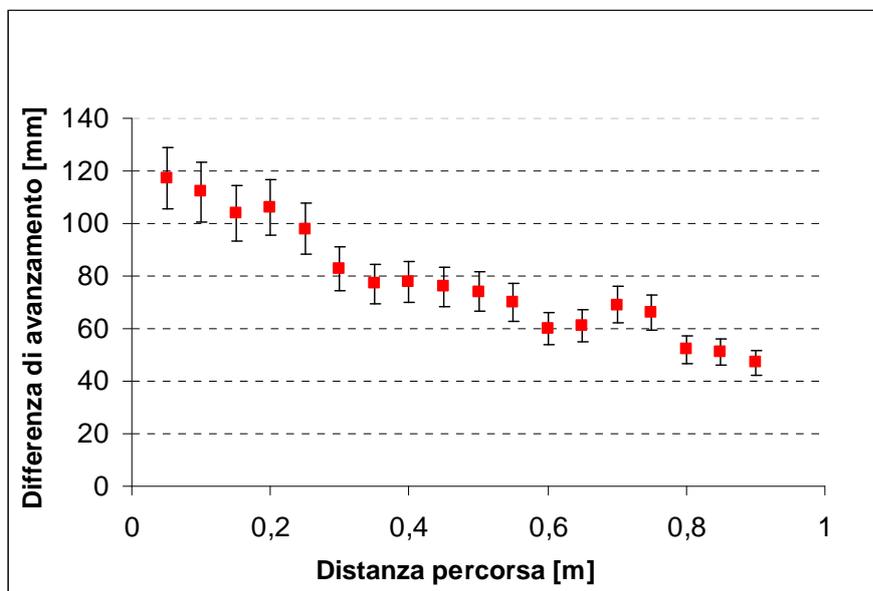


Diagramma 2.32 – Rappresentazione del gap tra il fronte di flusso nel distributore e quello nel rinforzo.

Nel diagramma 2.33 viene riportata lo stesso grafico di figura 2.32 in cui però viene aggiunta la curva che meglio approssima tali punti

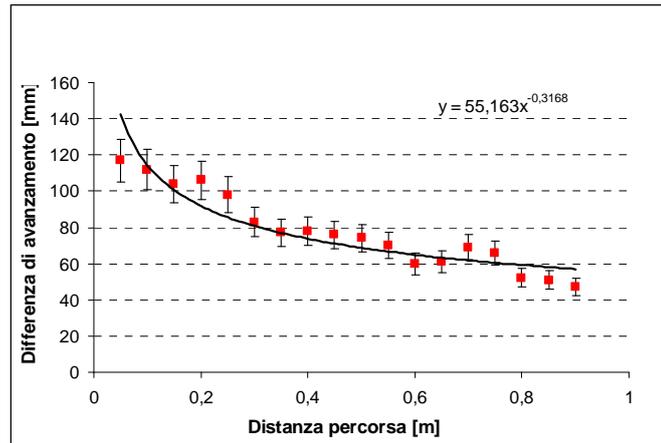


Figura 2.33 – Approssimazione del gap tra il fronte di flusso nel distributore e quello nel rinforzo.

L'andamento che meglio approssima i punti reali è quello della curva di potenza. In tale curva, nella quasi totalità dei punti la differenza percentuale di valore con i dati sperimentali non supera il 10%. Nel diagramma riportato qui sopra è riportato anche l'equazione della curva (dalla sua analisi si può pensare che la variazione di avanzamento si azzererebbe per lunghezze infinite del laminato).

2.8.2.3 Prova comparata di laminati da 8 strati

Questa prova è stata realizzata ponendo tre laminati da 8 strati uno di fianco all'altro al fine anche di mostrare la variabilità intrinseca del processo. Recenti studi, effettuati per investigare sull'influenza dell'eterogeneità delle preforme fibrose nella progressione del flusso di resina, hanno evidenziato la già citata variabilità.

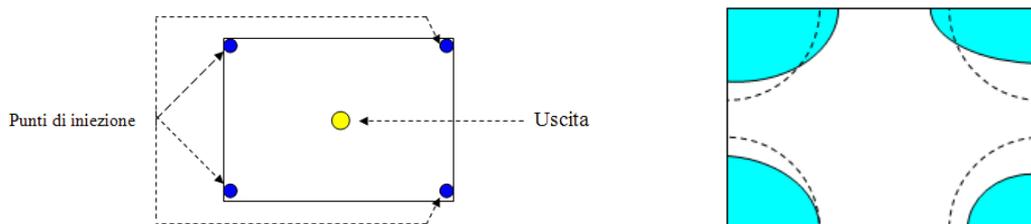


Figura 2.34 – Schema di prova di impregnazione per lo studio della variabilità del flusso (a); differenza tra impregnazione reale (zona blu) ed impregnazione ideale (archi tratteggiati);

Gli esperimenti effettuati in tali studi hanno riguardato un laminato rettangolare con quattro punti di iniezione posti nei quattro vertici ed il punto di aspirazione posto nel baricentro del rettangolo (figura 2.34a), rilevando una non uniformità dei flussi di impregnazione (schematizzati in figura 2.34b).

Nel caso ideale con materiali omogenei, come quello usato per queste prove, ci si potrebbe aspettare che le zone d'impregnazione siano circolari (attorno ai punti d'iniezione) e si muovono uniformemente verso il punto di aspirazione. Queste deviazioni spostano la posizione del punto finale di impregnazione dall'aspiratore, ed è necessario uno spreco di resina attraverso l'aspiratore per una completa infusione del laminato.

Ritornando alla prova effettuata in laboratorio, vengono riportati nella tabella 2.27 i dati relativi all'impregnazione dei tre laminati.

Distanza percorsa [m]	Tempo I laminato [s]	Tempo II laminato [s]	Tempo III laminato [s]
0,05	51	51	51
0,10	96	80	80
0,15	157	128	128
0,20	214	200	200
0,25	275	247	240
0,30	390	324	316
0,35	520	450	410
0,40	650	570	560
0,45	760	645	750
0,50	917	791	880

Tabella 2.27

I suddetti dati e la figura 2.35, di seguito riportata, confermano il presente problema della variabilità dei tempi di impregnazione all'interno del processo di impregnazione dei laminati RIFT.

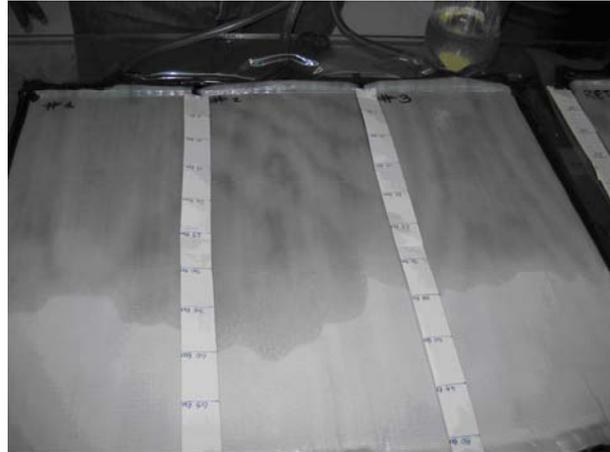


Figura 2.35 – Prova comparativa di 3 laminati identici.

Lo spessore medio rilevato è 3,1mm. A questo punto utilizzando il valore medio degli spessori è possibile calcolare il valore della portata da inserire nella analogia elettrica

$$Q = \frac{4,46}{10^8 x}$$

Mentre la funzione del tempo viene calcolata e viene rappresentata dalla seguente espressione:

$$t = 0,322 \cdot 10^4 \left(\frac{x^2}{2} \right)$$

Ora è finalmente possibile visualizzare il grafico relativo ai tempi di impregnazione restituiti dall'analogia elettrica, dalla simulazione FEM e quelli reali. Si noti che i punti relativi ai dati reali sono quelli ottenuti effettuando la media tra i valori dei tre laminati.

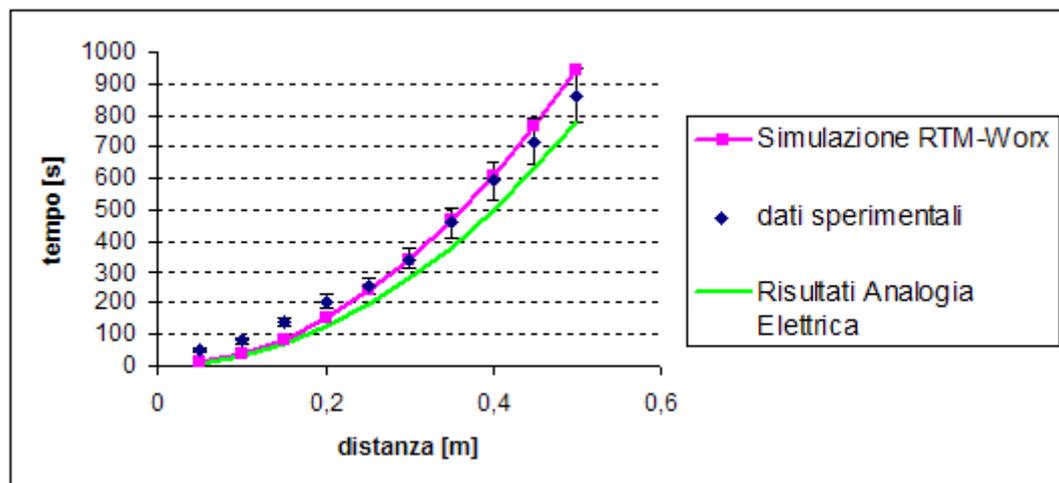


Figura 2.36 – Confronto temporale tra le previsioni teoriche e i dati sperimentali.

Si riporta per una analisi completa anche la curva dei tempi di impregnazione relativa ai tre laminati (allo scopo di ribadire un'ennesima volta il fenomeno della variabilità del processo nel diagramma 2.37).

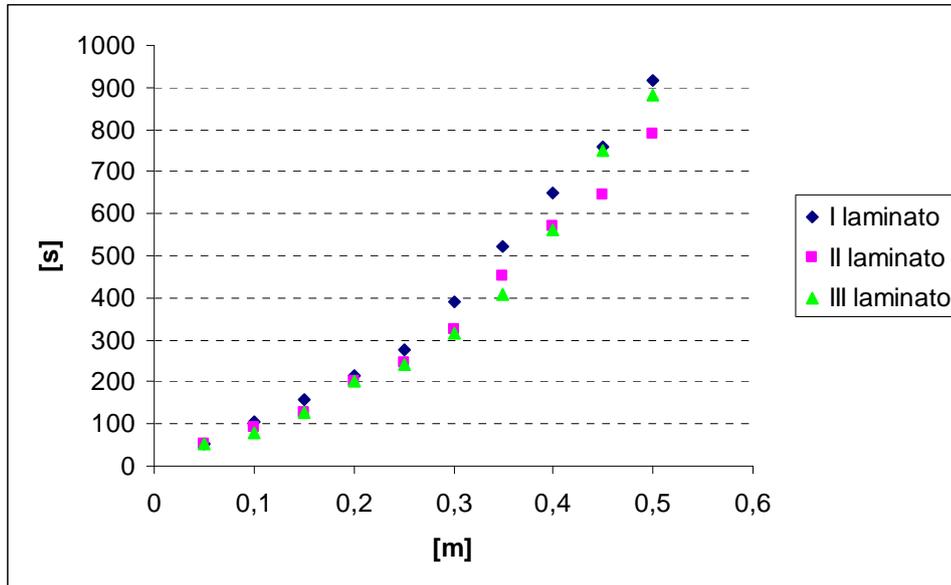


Figura 2.37 – Confronto tra i tempi sperimentali nei 3 laminati.

2.8.2.4 Laminato di lunghezza 1 metro e 8 strati

Nella figura 2.38 è riportato il laminato studiato. Come si vede dalla figura tale laminato ha l'immissione sul bordo destro e l'uscita su quello sinistro. Tale laminato presenta un sistema di distribuzione formato da due strati di rete.



Figura 2.38 – Laminato di lunghezza 1 metro e 8 strati.

Prima di impregnare questo laminato è stato necessario condurre uno studio sul suo tempo di impregnazione tramite l'ausilio dell'analogia elettrica e del programma di simulazione agli elementi finiti; infatti le sue dimensioni sono tali che per ottenere una completa impregnazione era necessario che la viscosità della resina (unico parametro che può essere influenzato dalle condizioni ambientali) fosse stata tale da garantire una completa impregnazione prima del raggiungimento del tempo di gelificazione. Dal preventivo studio effettuato si è capito che per completare la prova si potevano seguire

due diverse strade. La prima possibilità è quella di velocizzare il flusso di resina: questo può essere fatto semplicemente aggiungendo un terzo distributore sul rinforzo.

Il posizionamento di questo ulteriore distributore fa innalzare il valore della permeabilità calcolato con l’analogia elettrica e quindi abbassa il tempo di impregnazione. Tale metodo ha peraltro anche due effetti contrari: innanzitutto aumenta la resina da utilizzare per effettuare la prova. Questa parte in più di resina andrà però completamente persa perché verrà assorbita dal distributore. Inoltre l’aggiunta del terzo distributore farà sì che aumenterà la differenza tra l’avanzamento della resina all’interno del distributore e l’avanzamento della resina all’interno del rinforzo, comportando un raggiungimento del punto di uscita in tempi minori e quindi un ulteriore spreco di resina. Un’alternativa all’aggiunta di questo distributore è quella di cercare di mantenere costante e basso il valore della viscosità. Per mantenere tale valore basso basta effettuare la prova in un ambiente a temperatura controllata; per mantenerlo costante invece è sufficiente utilizzare più serbatoi di resina che all’occorrenza, cioè quando quello principale in cui è annegato il tubo di immissione è quasi vuoto, alimentano il serbatoio principale. Tale tecnica permette di traslare di volta in volta in avanti il gel-time e permette di effettuare la prova senza pericolo di un’incompleta impregnazione del laminato. Tale metodo permette inoltre di evitare lo spreco di resina, necessario invece con l’utilizzo del terzo distributore. I tempi di impregnazione relativi a questo laminato sono riportati nella tabella 5.9.

Distanza [mm]	Tempo d’impregnazione [s]	Distanza [mm]	Tempo d’impregnazione [s]
50	68	550	840
100	138	600	1014
150	160	650	1187
200	194	700	1339
250	225	750	1529
300	294	800	1800
350	399	850	2221
400	485	900	2444
450	611	950	3123
500	721	1000	3900

Tabella 2.9

Successivamente ai tempi di impregnazione sono stati calcolati, dopo la completa polimerizzazione e il distacco del laminato dallo stampo, gli spessori nei vari punti del laminato. Lo spessore medio calcolato è pari a 3,15mm

Noti i tempi di impregnazione è possibile calcolare la portata secondo l'analogia elettrica

$$Q = \frac{4,15}{10^8 x}$$

Mentre la funzione del tempo calcolato viene rappresentata dall'espressione:

$$t = 0,827 \cdot 10^4 \left(\frac{x^2}{2} \right)$$

I valori ottenuti ci permettono di tracciare il diagramma dei tempi in funzione della distanza (figura 2.39).

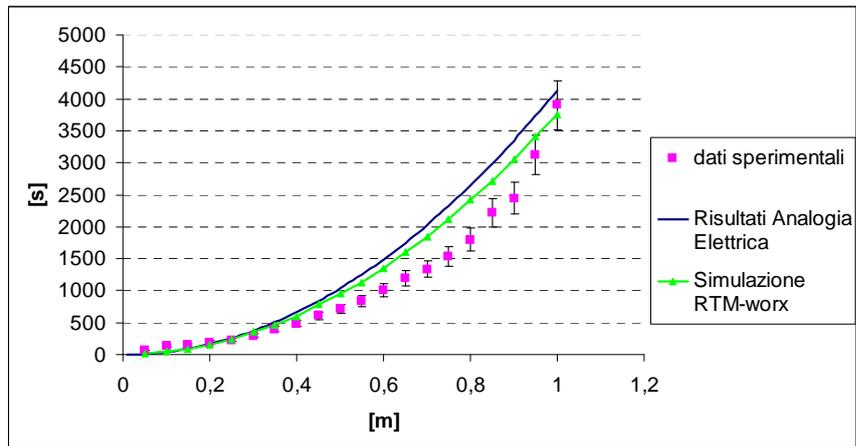


Figura 2.39 – Confronto tra i tempi previsionali e quelli sperimentali.

Viene anche riportata il grafico della differenza di avanzamento della resina tra distributore e fibre (diagramma 2.40).

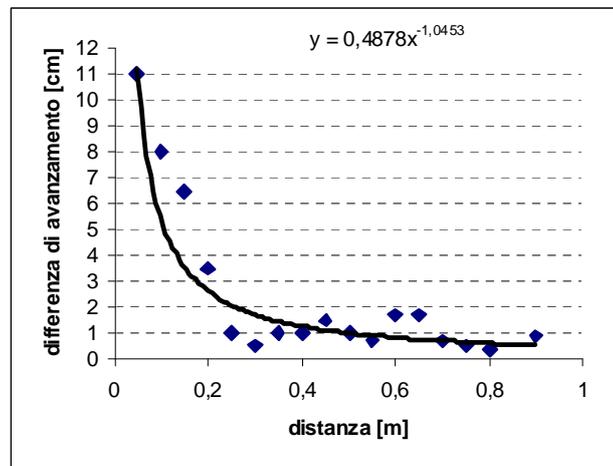


Figura 2.40 – Differenza di avanzamento della resina nel distributore e nel rinforzo.

Nel diagramma i punti rappresentano lo scostamento tra i due fronti di avanzamento, mentre la curva rappresenta la linea di tendenza dei punti. L'analisi della linea di tendenza ci porta a dire che la differenza tra l'avanzamento della resina nel distributore e quello nel rinforzo tende ad azzerarsi ancora per lunghezza infinita, infatti:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} 0,4878x^{-1,0453} = 0$$

2.7 Laminati con geometria complessa

Al fine di studiare l'avanzamento del fronte di flusso della resina in condizioni di allargamenti, restringimenti e cambi di direzione, sono stati realizzati laminati con i quali è stato possibile rilevare tali fenomeni.

2.9.1 Laminato con foro centrale a forma di rombo

Il primo laminato realizzato ha una sezione rettangolare di dimensioni 200 mmx700 mm ed un foro avente il baricentro coincidente con quello del rettangolo e con le diagonali (aventi le direzioni degli assi del laminato) di lunghezza pari a 500 mm e 60 mm.



Figura 2.41 – Laminato rettangolare con foro romboidale.

Tale laminato è stato realizzato al fine di osservare il comportamento del processo di impregnazione nel caso di variazioni graduali di sezione.

Lo studio dei tempi tramite l'analogia elettrica è stato effettuato per step: è stato suddiviso il laminato in varie sezioni di ugual lunghezza (Figura 2.42).

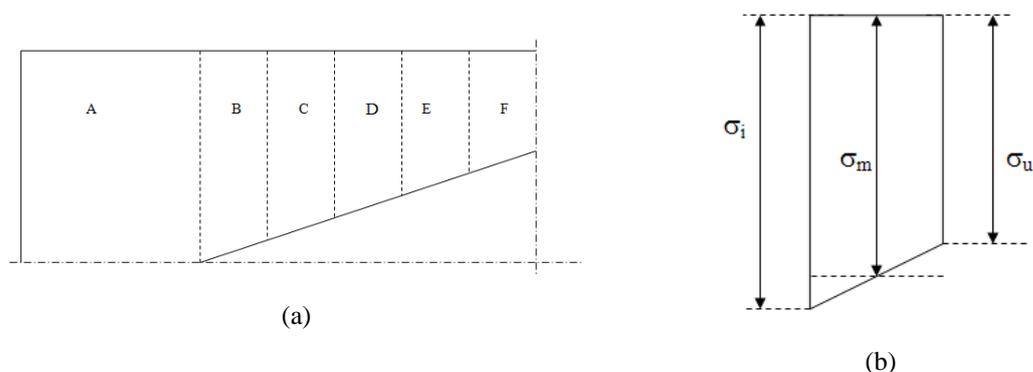


Figura 2.42 – Schema della suddivisione in zone (a); particolare della generica zona (b).

Per ogni trapezio è stata calcolata la sezione media. Ciò è stato reso possibile in quanto la variazione di sezione è costante e di soli 6 millimetri nei 50 mm di step considerati.

Considerando la figura 2.42b si ottiene che:

σ_i = sezione di ingresso del trapezio;

σ_u = sezione di uscita del trapezio;

σ_m = sezione media;

dove

$$\sigma_m = \frac{\sigma_i + \sigma_u}{2}$$

A questo punto vengono calcolati gli spessori in vari punti del laminato al fine di poter effettuare i calcoli di portata e tempo di impregnazione con l'analogia elettrica e con il programma FEM. Lo spessore medio rilevato è pari a 3,15mm. Partendo dalla sezione A si ottiene che

$$Q_A = \frac{1,40}{10^8 x}$$

Mentre il tempo viene rappresentato dall'espressione:

$$t = 1,10 \cdot 10^4 \left(\frac{x^2}{2} \right)$$

dopo questo primo step il flusso di resina entra nella zona B dove inizia il

restringimento della sezione. In tali condizioni il tempo di impregnazione della zona B

sarà pari a

$$t_B = \frac{V_B}{Q_A} = 62 \text{ s}$$

dove

$$V_B = \sigma_m \cdot S_L \cdot L$$

in cui

S_L è lo spessore del laminato;

L è la lunghezza del trapezio;

Q_A è la portata che proviene dalla zona A.

Da qui in poi il calcolo viene ripetuto considerando che la formula generale del tempo può in definitiva essere scritta come:

$$t_i = \frac{V_i}{Q_{i-1}}$$

Tale ragionamento è stato effettuato sia nella regione di restringimento del flusso che nella successiva regione di allargamento. Si consideri ora t_B : se viene paragonato t_A si nota che tra i due l'unica differenza risiede nel volume, maggiore nella zona A. Ciò significa che la velocità del fronte di resina aumenta passando dalla zona A alla zona B, e continua ad aumentare fino alla zona F. Da qui in poi avviene un rallentamento del fronte fino a tornare uniforme quando si chiude il foro. I tempi di impregnazione sono riportati in tabella 2.28.

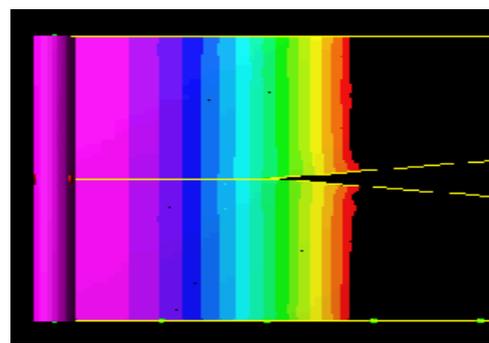
Distanza percorsa [mm]	Tempi di impregnazione lato destro (s)	Tempi di impregnazione lato sinistro (s)	Distanza percorsa [mm]	Tempi di impregnazione lato destro (s)	Tempi di impregnazione lato sinistro (s)
50	35	35	400	655	570
100	81	81	450	860	745
150	165	136	500	1178	970
200	265	213	550	1455	1232
250	368	314	600	1770	1530
300	429	394	650	2220	1860
350	540	483	700	2595	2400

Tabella 2.28

Si riportano in figura 2.43 una serie di immagini che paragonano l'andamento reale e quello ottenuto con la simulazione al fine di poterli comparare.



(a)



(b)

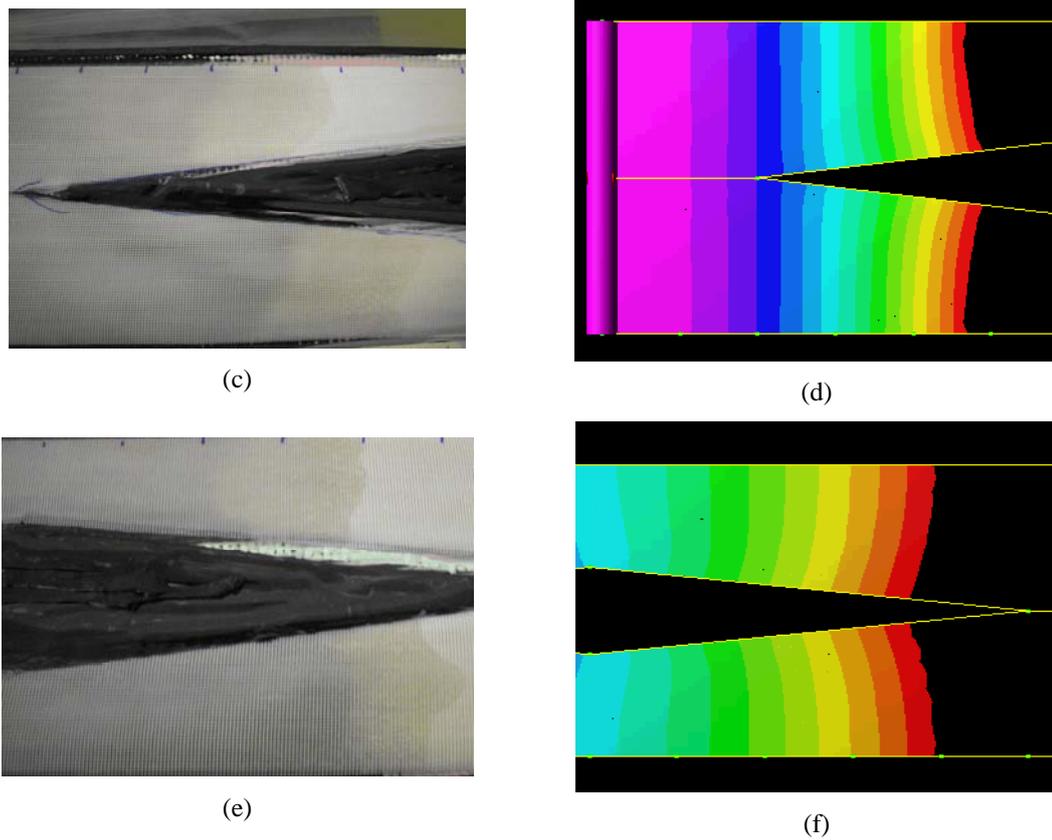


Figura 2.43 – Confronto tra l'avanzamento del flusso reale e quello simulato

Come è possibile vedere dai dati riportati nella tabella 5.12 e dalle immagini di figura 2.43, il fenomeno presenta sempre la sua caratteristica variabilità. Mediando tali tempi di impregnazione è possibile ottenere la curva dei tempi sperimentali e a questa è possibile affiancare quella dei tempi derivati dall'analogia elettrica e la curva ottenuta dall'analisi FEM (figura 2.44).

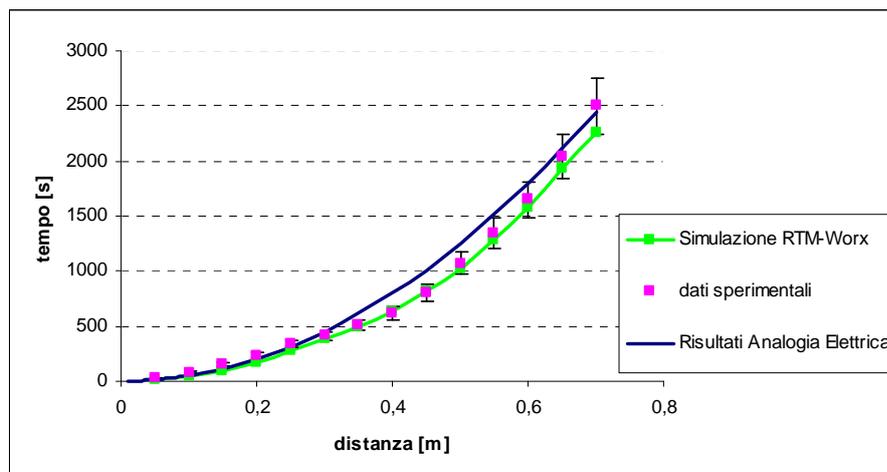


Figura 2.44– Confronto tra i tempi previsionali e quelli sperimentali.

2.9.2 Laminati con 3 fori rettangolari

A questo punto si vuole fissare l'attenzione su una serie di laminati che presentano più fori e che quindi presentano più deviazioni del flusso di resina. In particolare, utilizzando una configurazione non simmetrica è possibile confrontare diverse possibili soluzioni per lo schema di posizionamento dei punti di immissione e aspirazione (figure 2.45 e 2.46).



Figura 2.45



Figura 2.46

Lo studio dei laminati riportati in figura 2.45 e 2.46 ha avuto un duplice scopo:

1. l'analisi del flusso di resina in presenza di ostacoli che creano e una repentina e notevole riduzione di sezione e in presenza di deviazioni ad angolo retto;

2. L'ottimizzazione del punto di immissione della resina, scegliendo la sua posizione tra la zona A o la zona B di figura 2.47.

Questa tipologia di laminati è fondamentale per lo studio dell'impregnazione in zone in cui un ostacolo può creare problemi al flusso di resina.

La seconda questione è più importante in questa tipologia di profilati.

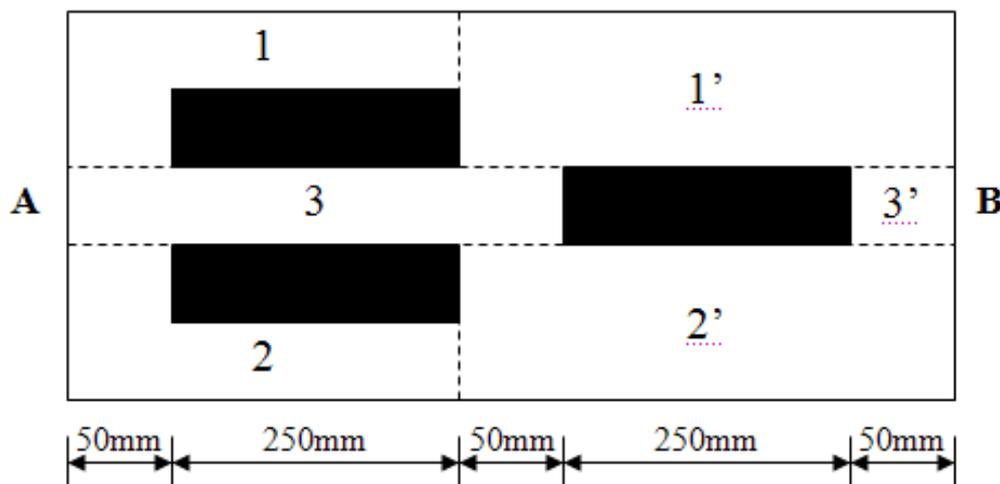


Figura 2.47 – Schema del laminato non simmetrico per la scelta del punto di immissione

Si consideri la figura 2.47 che rappresenta la geometria del laminato in questione e si supponga di iniziare l'impregnazione dalla zona A; il flusso di resina passa attraverso le zone 1,2,3, le quali presentano una sezione minore rispetto alle successive zone 1' e 2' a sezione maggiore. Se si suppone di infondere partendo da B si può notare invece l'effetto contrario, passando da una zona a sezione minore (dove è presente un solo ostacolo) ad una a sezione maggiore (dove sono presenti due ostacoli).

Si può quindi pensare in fase di progetto che dovendo infondere un laminato avente questa particolare geometria, e potendo scegliere da che punto far partire l'impregnazione convenga scegliere di partire dalla zona B.

In questo ragionamento non è entrato in gioco un fattore molto importante quale è la viscosità della resina, la quale, come ben sappiamo, tende, dopo che è rimasta in un primo tempo costante, ad aumentare, con ovvie conseguenze di aumento dei tempi di impregnazione.

Questo fenomeno favorisce ancora di più in fase di progetto la scelta di impregnare il laminato dalla zona B, in modo tale da ridurre il tempo di impregnazione, prevenendo l'aumento di viscosità della resina con una maggiore velocità della stessa. Questa teoria è stata verificata poi sperimentalmente effettuando entrambe le impregnazioni.

Distanza [mm]	Tempi medi zone esterne: 1-2; 1'-2' [s]	Tempi medi zone interne 3; 3' [s]
5	58	-
10	91	-
15	144	-
20	205	-
25	256	-
30	377	-
35	500	500
40	625	-
45	760	-
50	903	-
55	1055	-
60	1264	-
65	1455	1610

Tabella 2.29 – Tempi di impregnazione laminato con immissione da A

Distanza [mm]	Tempi medi zone esterne: 1'-2'; 1-2 [s]	Tempi medi zone interne 3'; 3 [s]
5	50	-
10	96	-
15	115	-
20	168	-
25	255	-
30	341	-
35	448	500
40	534	622
45	602	753
50	777	971
55	883	1138
60	1031	1293
65	1280	1540

Tabella 2.30 – Tempi di impregnazione laminato con immissione da B

Osservando i tempi sperimentali riportati nelle tabelle 2.29 e 2.30 notiamo il maggiore tempo di impregnazione del laminato A (1455 s) rispetto al laminato con immissione da B (1280 s). Tale differenza è esigua e a prima vista si potrebbe imputare tale differenza di tempi alla variabilità del processo. A rafforzare, però, la teoria suddetta c'è da aggiungere un altro fattore: la prima serie di test effettuati (quelli sul laminato A) presentava all'atto dell'infusione una viscosità minore (circa 0,5 Pa·s) rispetto alla seconda serie di test effettuati (quelli sul laminato B) in cui la temperatura ambiente era minore e tale da far salire la viscosità a valori maggiori (circa 0,65 Pa·s); ciò permette di dire che sicuramente la teoria sviluppata è realistica se, nonostante le condizioni peggiori il laminato B è più veloce. In figura 2.48 e 2.49 sono riportati i confronti temporali tra le previsioni teoriche e i dati sperimentali. Nei suddetti diagrammi non sono state riportate le analisi con l'analogia elettrica poiché essa nel caso di geometrie complesse è difficile da utilizzare richiedendo un'analisi che vanifica tutti i tentativi di rendere semplice tale modello. In tali casi risulta determinante l'utilizzo di un programma FEM.

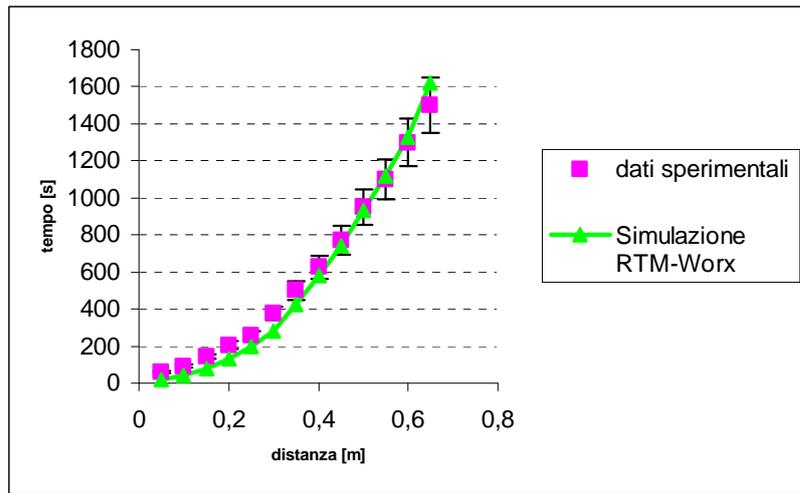


Figura 2.48 – Confronto dei tempi nel laminato con tre fori con immissione da A

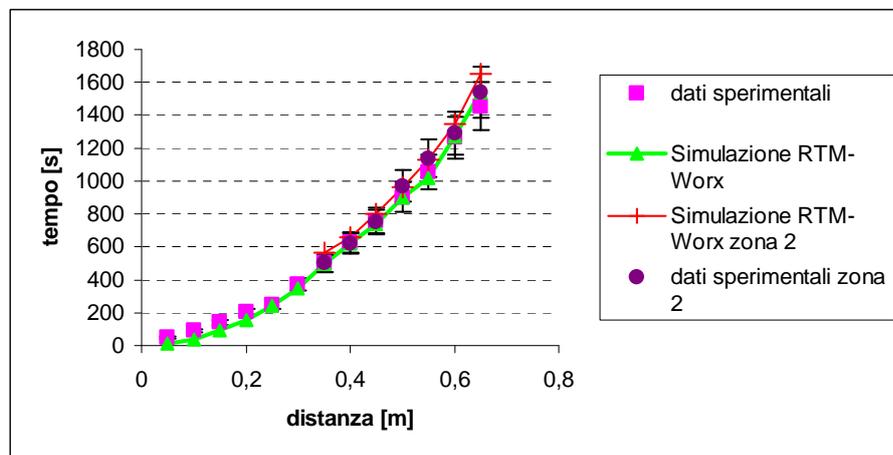
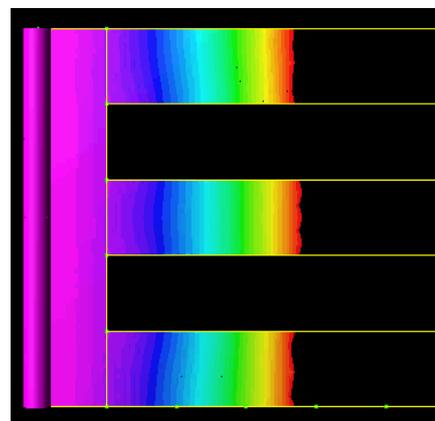
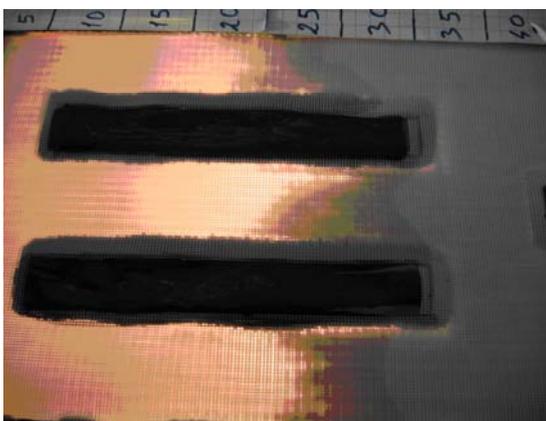


Figura 2.49 – Confronto dei tempi nel laminato con tre fori con immissione da B



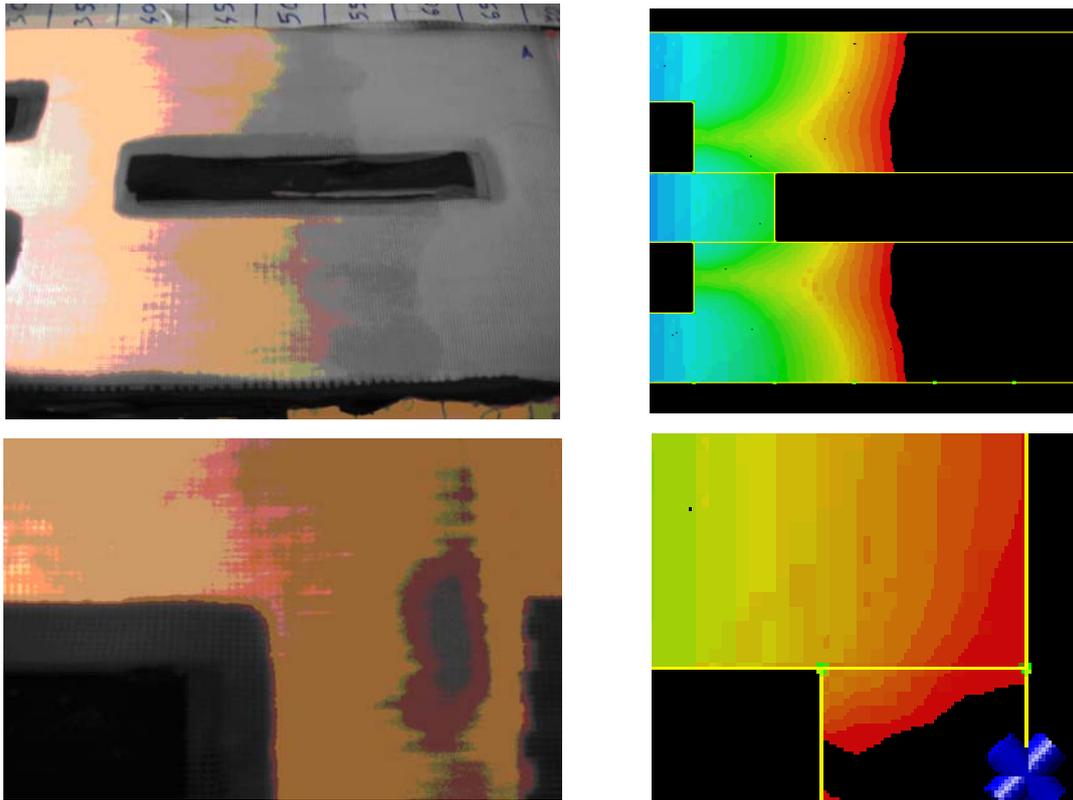


Figura 2.50 – Confronto grafico tra la sperimentazione e la simulazione FEM.

2.9.3 Laminati con un foro rettangolare posto sull'asse longitudinale

L'ultima tipologia di prove effettuate per la validazione del codice FEM ha riguardato laminati che presentano un foro rettangolare sul loro asse longitudinale.

Sono state effettuate in totale 3 varietà prove nelle quali i laminati avevano una larghezza complessiva pari a 200 mm, cui corrispondeva una larghezza del foro pari a 50 mm (25% della larghezza complessiva), 7,5cm (37,5% della larghezza complessiva), 10cm (50% della larghezza complessiva). Lo scopo di tali prove è stato quello di cercare di ricavare in funzione della percentuale di apertura del foro una relazione capace di far prevedere dopo quale distanza dal foro il fronte di flusso della resina torna ad essere uniforme, parametro che potrebbe in alcuni casi condizionare la scelta dei punti di immissione e di uscita della resina.



Figura 2.51 – Laminato di larghezza del foro 50 mm.



Figura 2.52 – Laminato di larghezza del foro 75 mm.



Figura 2.53 – Laminato di larghezza del foro 100 mm.

di seguito sono riportati i dati ottenuti per i vari laminati.

Le tabelle riportate in seguito indicheranno i valori mediati ai lati del laminato e in più quelli al centro di esso, fin quando il flusso non diventa uniforme. Il primo laminato presenta un foro largo 50 mm.

Distanza [m]	Tempi mediati zone esterne [s]	Tempi mediati zona interna [s]
0,05	37	
0,1	72	
0,15	124,5	
0,2	190	220
0,25	260	280
0,3	350	
0,35	478	
0,4	560	
0,45	667	
0,5	750	

Tabella 2.31

Il flusso di resina torna ad essere uniforme dopo circa 50 mm dal foro e ciò è evidenziato anche dalla differenza di soli 20s a 250 mm. Lo spessore medio trovato dalle misure effettuate è pari a 3,1mm. Di seguito (figura 2.54) è riportato il diagramma con i tre dati disponibili (prova sperimentale, analogia elettrica, simulazione FEM)

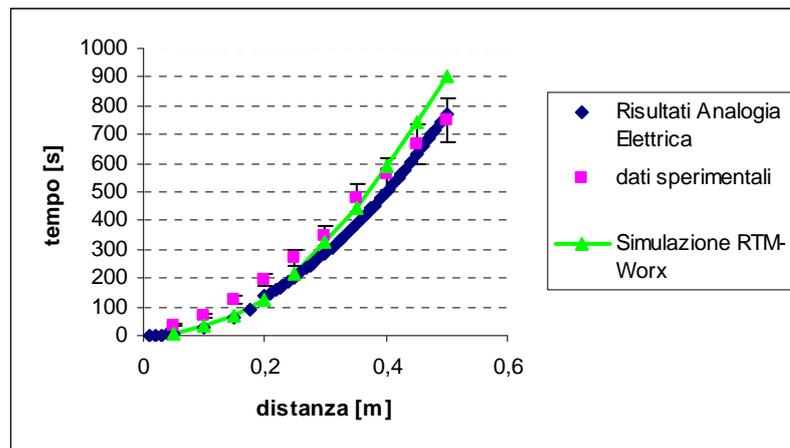


Figura 2.54 – Confronto tra i tempi derivati dalle previsioni teoriche e dai risultati sperimentali.

Si riportano di seguito foto delle fasi sperimentali e le immagini delle simulazioni (figura 2.55).

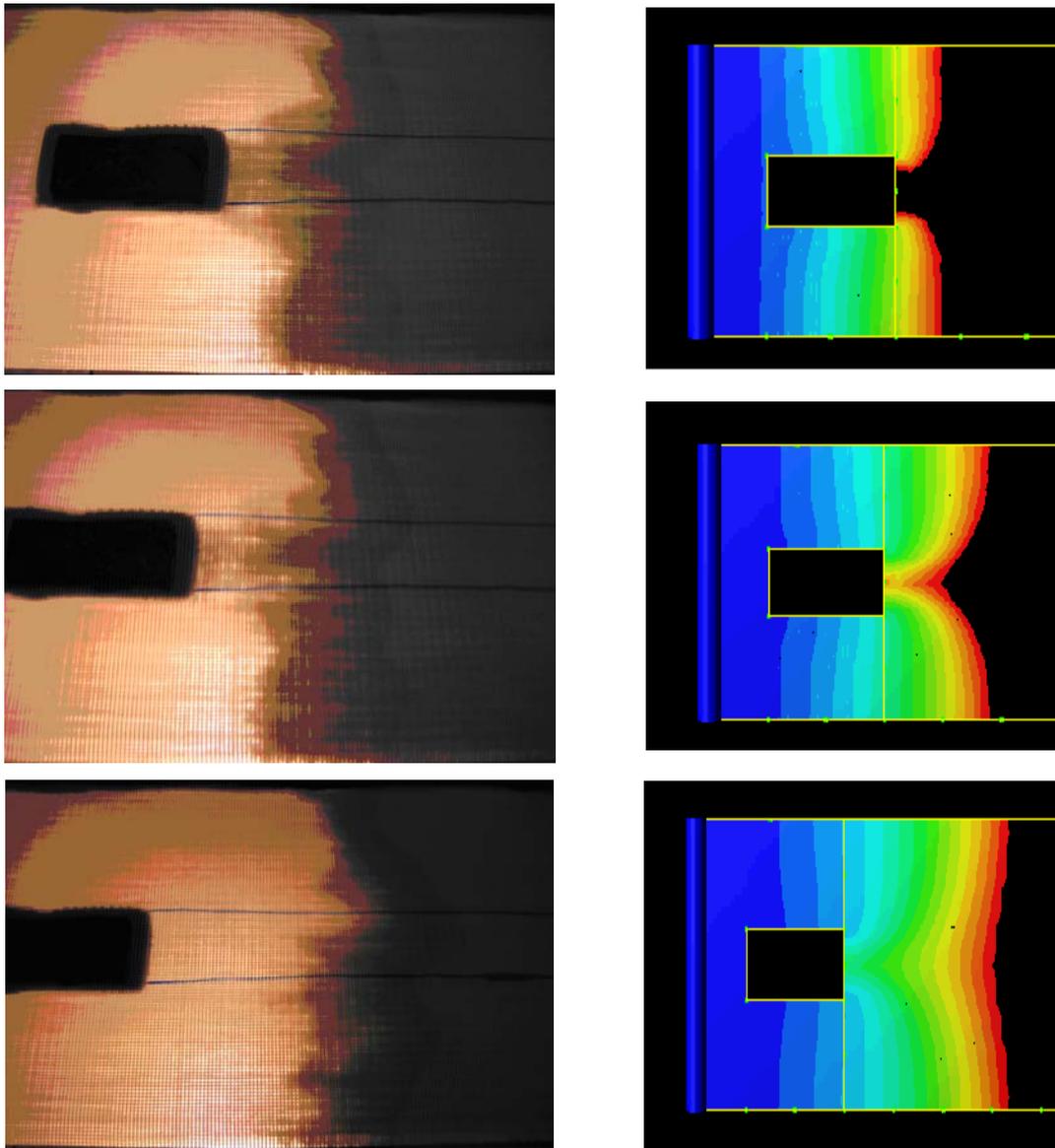


Figura 2.55 – Confronto tra i fronti di flusso della simulazione FEM con quelli reali.

Sia l'analogia elettrica che l'RTM presentano una buona corrispondenza con i dati sperimentali.

Successivamente è stata fatta la prova con il foro da 75 mm i cui tempi di impregnazione sono riportati in tabella 2.32 e si vede che il fronte torna uniforme dopo circa 100 mm.

Distanza [m]	Tempi esterni mediati [s]	Tempi interni mediati [s]
0,05	35	
0,1	60	
0,15	92	
0,2	140,5	169
0,25	226	251
0,3	337,5	358
0,35	477	
0,4	574	
0,45	675	
0,5	780	

Tabella 2.32

Lo spessore calcolato è pari a 3.0 mm. A questo punto è possibile tracciare il diagramma con le varie informazioni (figura 2.56)

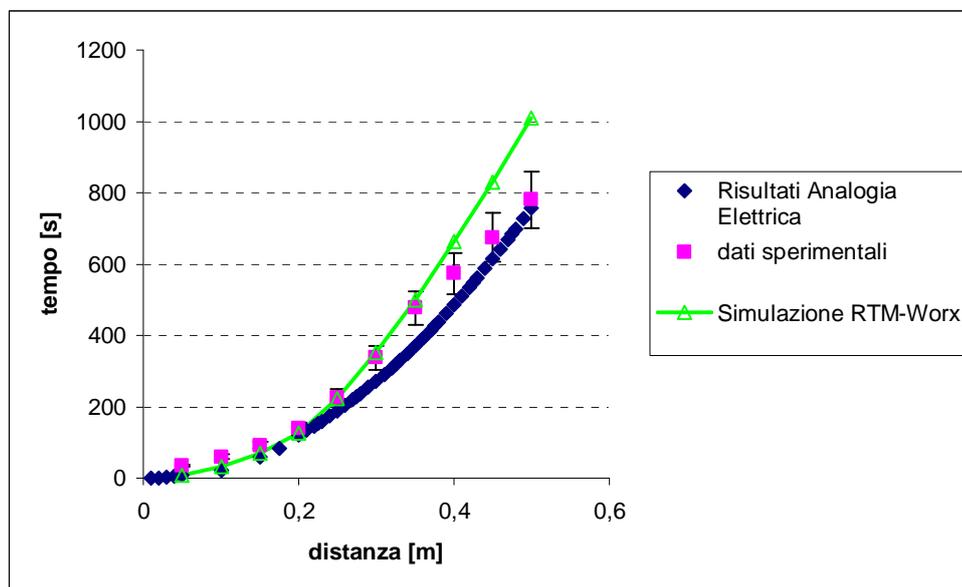


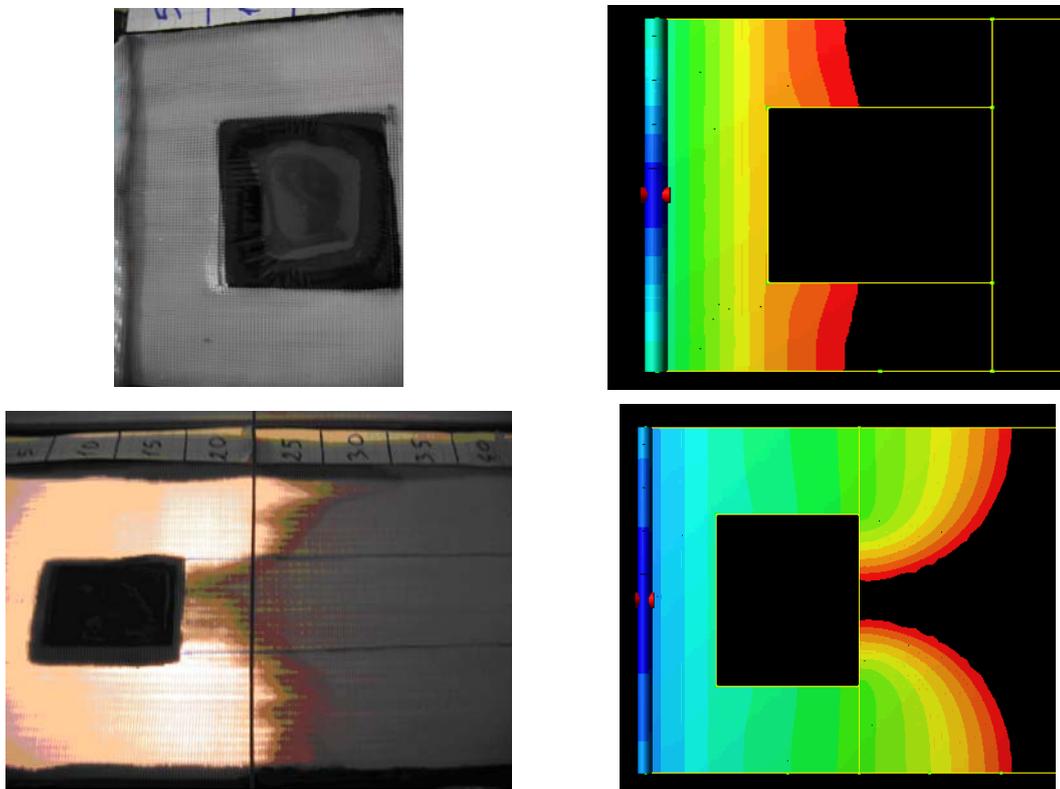
Figura 2.56– Confronto tra i tempi previsionali e quelli sperimentali.

Il laminato realizzato successivamente è stato quello con un foro da 100 mm.

Distanza [m]	Tempi esterni mediati [s]	Tempi interni mediati [s]
0,05	29	
0,1	56,5	
0,15	100,5	
0,2	173,5	210
0,25	287	336
0,3	419	433
0,35	556	
0,4	722	
0,45	862	
0,5	1036	

Tabella 4.33

Si riportano in figura 2.57 le immagini comparative del flusso di impregnazione simulato e reale.



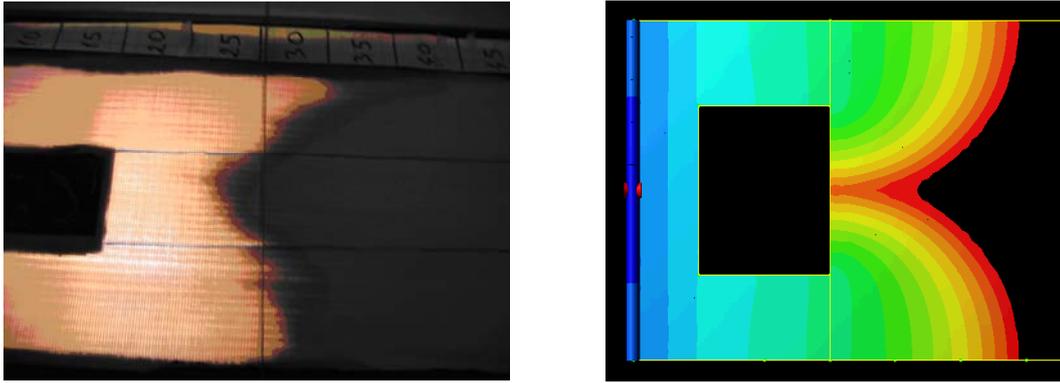


Figura 2.57 – Confronto tra i fronti di flusso della simulazione FEM con quelli reali.

Lo spessore medio calcolato è pari a 3,1mm. A questo punto è possibile ottenere tutte le curve da inserire nel diagramma di figura 2.58.

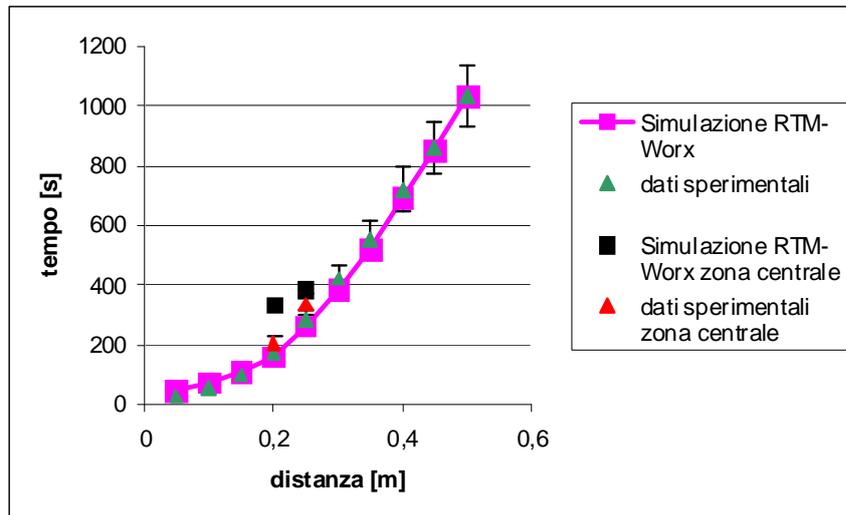


Figura 2.58 – Confronto dei tempi nel caso del foro da 100 mm nel laminato di larghezza 200 mm

In questo diagramma l’analogia elettrica non viene riportata non essendo di semplice applicazione. A questo punto è indispensabile l’utilizzo del simulatore FEM che invece continua a simulare l’impregnazione rientrando nel range di variabilità del 20%.

2.9.4 Relazione tra L , l , x

La corrispondenza ritrovata tra i dati sperimentali e le previsioni del codice FEM porta a dire che è possibile fidarsi di tale programma al fine di estrapolare un legame tra i parametri geometrici del laminato (larghezza del laminato, la larghezza del foro) e la distanza a cui il flusso, superato il foro, torna ad essere uniforme. La cosa più semplice per legare queste tre variabili è quella di creare dei diagrammi cartesiani in cui in

ascissa e in ordinata si riportano due di questi parametri, mentre il terzo parametro viene rappresentato all'interno del piano da una curva costruita per punti in cui il suo valore è costante.

Più precisamente è stato creato un diagramma cartesiano in cui sull'asse delle ascisse compare la larghezza del laminato, sull'asse delle ordinate compare la distanza dopo cui il flusso di resina torna ad essere uniforme, e i punti che si ottengono rappresentano la percentuale di apertura del foro, la quale è costante muovendosi lungo tali valori. A titolo di esempio si riportano le estrapolazioni effettuate nel caso di un foro con apertura del 25% e del 50%.

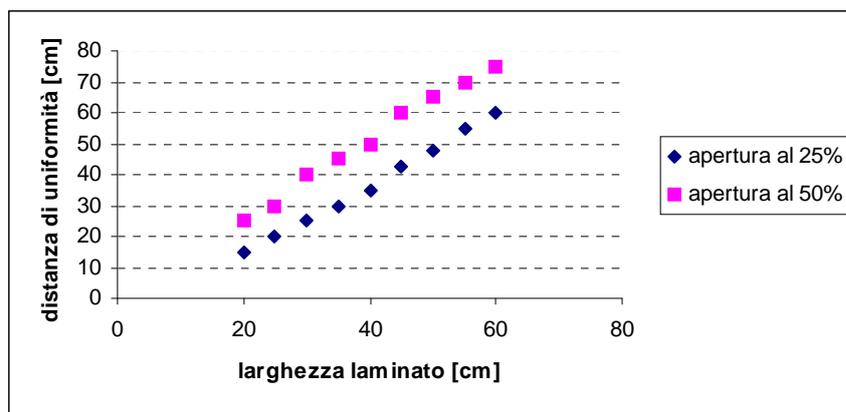


Figura 2.59 – Estrapolazioni derivanti dal codice FEM e riguardanti i laminati con foro da 50 e 100 mm.

Il diagramma di figura 2.59 è fatto per punti, dalla sua analisi sembra che l'andamento della chiusura del foro sia di tipo lineare. Nel diagramma di figura 2.60 sono riportate tre curve di inviluppo che rappresentano l'unione di questi punti.

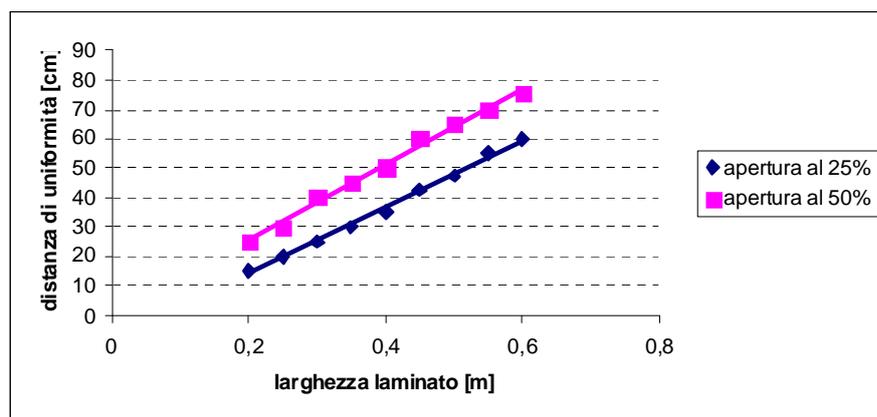


Figura 2.60 – Inviluppo dei punti di estrapolazione del codice FEM.

Dal diagramma è possibile concludere che tali dati vengono bene approssimati da rette, discostandosi queste per non più del 5%.

CAPITOLO III

Analisi e Fabbricazione di Componenti Aeronautiche

3.1 Studio e fabbricazione di una frame con sezione a C

Una tipica struttura aeronautica, come un tronco di fusoliera, è costituita da elementi in parete sottile, detti “gusci”, ai quali sono collegati altri componenti strutturali quali elementi d’irrigidimento (longitudinali e trasversali).

La struttura, che può essere schematizzata come in figura 3.1, è costituita da tre elementi fondamentali:

- elementi longitudinali (correnti), che reagiscono solo a sforzo normale; l’area di questi elementi è data dall’area del corrente o flangia corrispondente, più un’eventuale area di lamiera che partecipa alla resistenza della struttura;
- pannelli di lamiera che sono direttamente vincolati sui quattro bordi a due ordinate (centine) e due elementi longitudinali contigui; si suppone che il pannello lavori unicamente a taglio, cioè in campo di tensione tangenziale;
- elementi trasversali (ordinate o centine) disposti perpendicolarmente all’asse longitudinale della struttura, infinitamente rigidi per gli sforzi agenti nel proprio piano e completamente deformabili per gli sforzi normali al proprio piano.

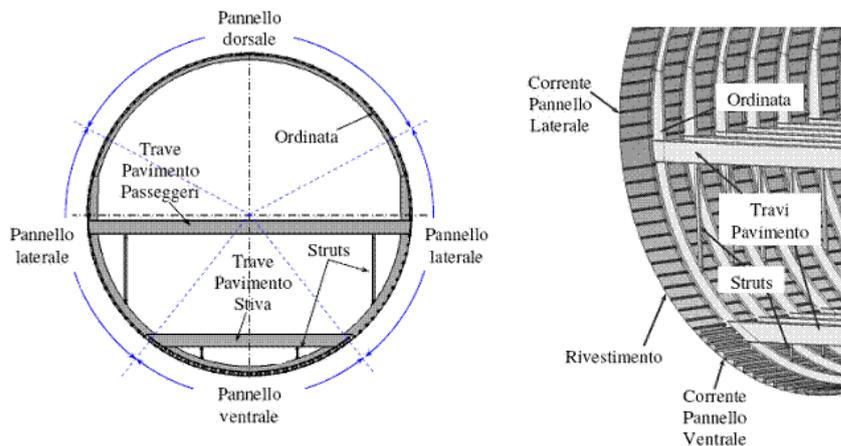


Figura 3.1 - Sezione trasversale di una fusoliera.

L’elemento preso in considerazione è una frame con sezione a C, di cui è possibile vedere un disegno tridimensionale e una sezione in figura 3.2.

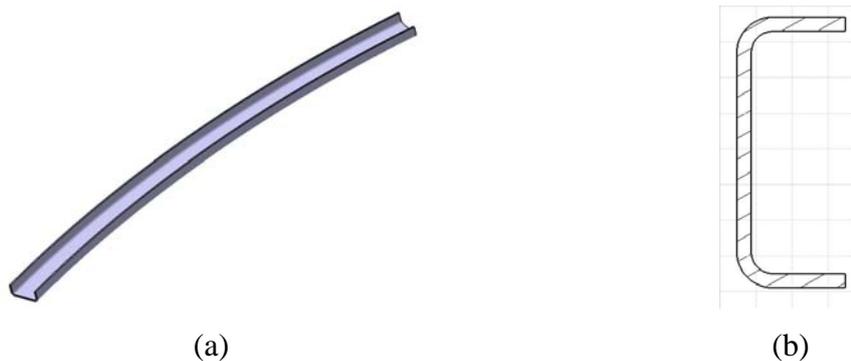


Figura 3.2 – (a) Disegno tridimensionale di una frame; (b) sezione.

Si sono quindi realizzati appositi stampi, in particolare uno stampo “femmina” (in cui si è prevista la possibilità di effettuare un riscaldamento mediante olio diatermico) ed uno stampo “maschio” (mandrino), di cui in figura 3.3 si riportano i disegni di progetto, al fine di valutare e confrontare i vantaggi, gli svantaggi ed i risultati ottenuti.

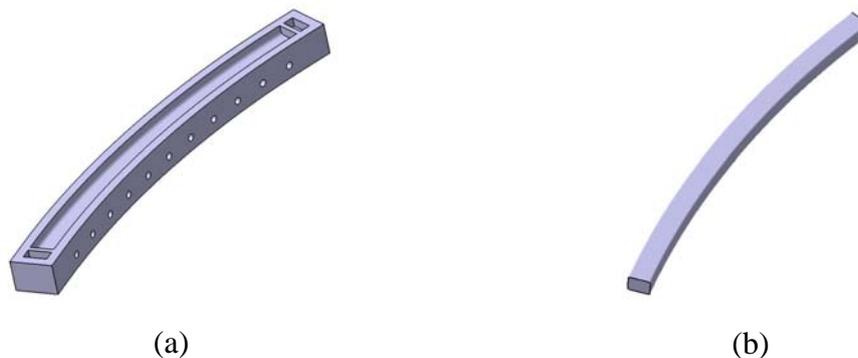


Figura 3.3 – Disegno tridimensionale dello stampo per una frame con sezione a C:
(a) femmina; (b) maschio (mandrino).

Lo studio FEM ha richiesto l’importazione e la “pulizia” delle superfici della frame (figura 3.4) e successivamente l’assegnazione delle diverse proprietà (spessore, permeabilità etc..).

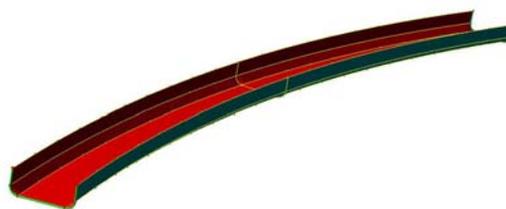


Figura 3.4 – Superfici della frame dopo l’importazione e la pulizia.

Si è quindi passati all’esecuzione della mesh (figura 3.5a e 3.5b) e successivamente sono stati impostati i punti di immissione e di aspirazione (figura 3.5c e 3.5d).

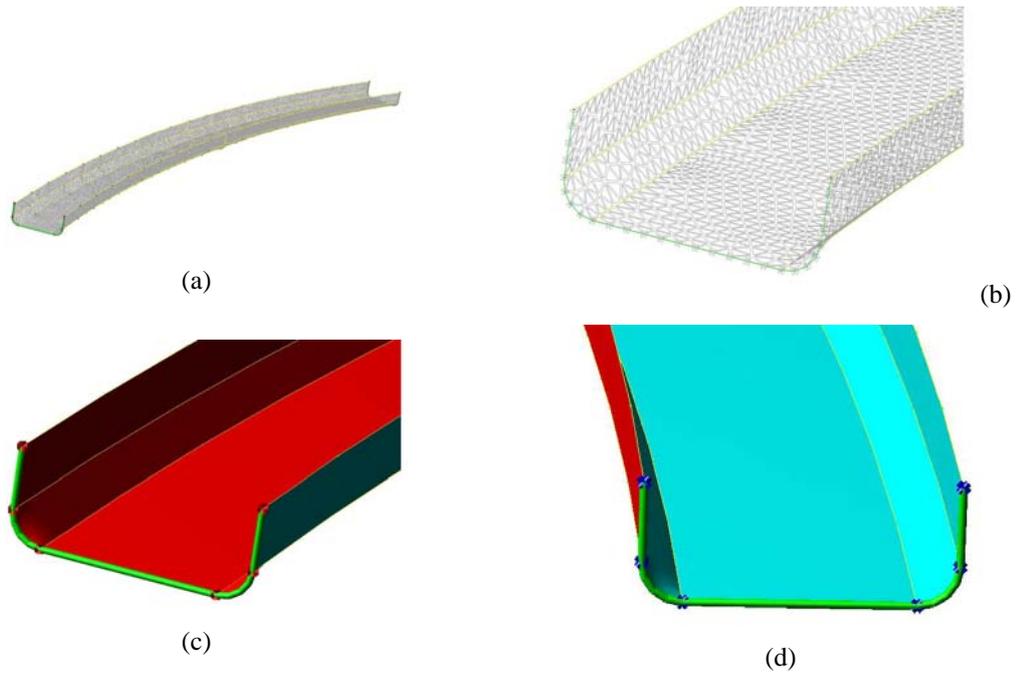


Figura 3.5 – Esecuzione della mesh (a); particolare della mesh (b).
Particolare dei punti di immissione (c) ed aspirazione (d).

Infine si è eseguita la simulazione e si sono osservate le fasi di impregnazione grazie al post-processor (figura 3.6).

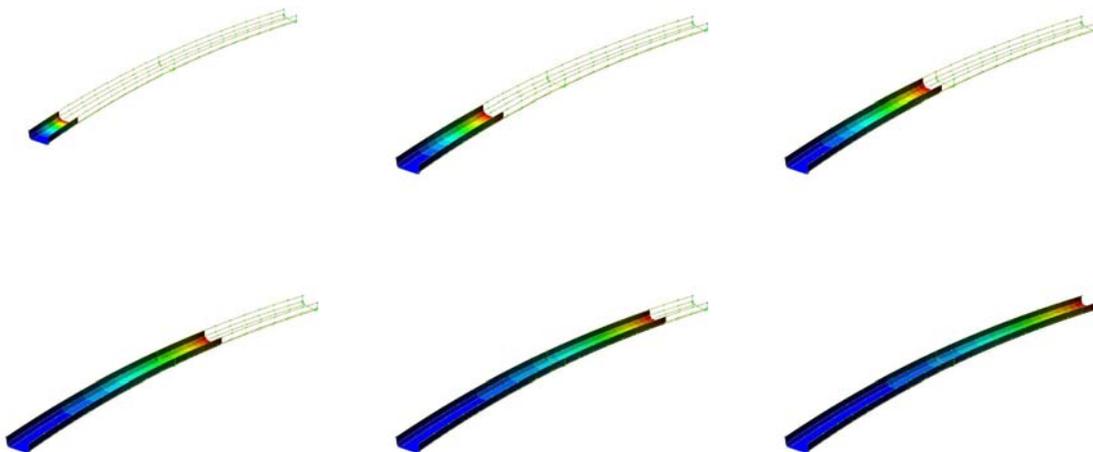


Figura 3.6 – Fasi della simulazione del processo di impregnazione.

L'analisi del vettore velocità (figura 3.7) non ha evidenziato alcuna zona di forte irregolarità del flusso, consentendo di ritenere applicabile la soluzione proposta.

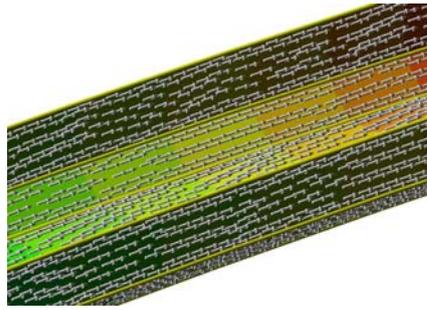
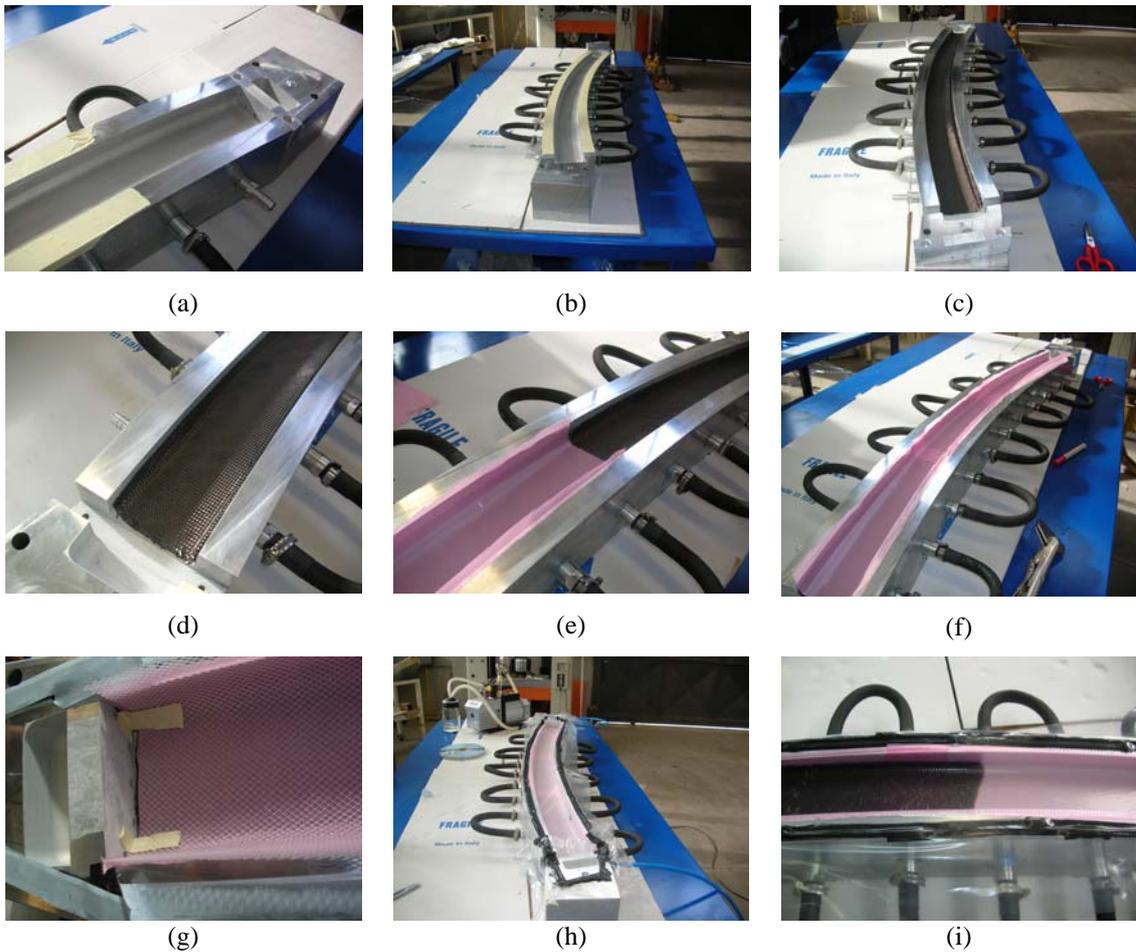


Figura 3.7 – Analisi del vettore velocità.

Si è quindi passati alla fase produttiva realizzando alcune frame su stampo “femmina” ed alcune su mandrino al fine di controllare la ripetibilità del processo. Le stratifiche utilizzate sono state:

- 12 strati di tessuto 200 gm^{-2} $[0-90/\pm 45]_{6s}$;
- 18 strati di tessuto 200 gm^{-2} $[(0-90/\pm 45)_4(0-90)]_s$;
- 18 strati di tessuto 200 gm^{-2} $[(\pm 45/0-90)_4(\pm 45)]_s$.

Nelle figure 3.8 e 3.9 si riportano le fasi di processo eseguite.



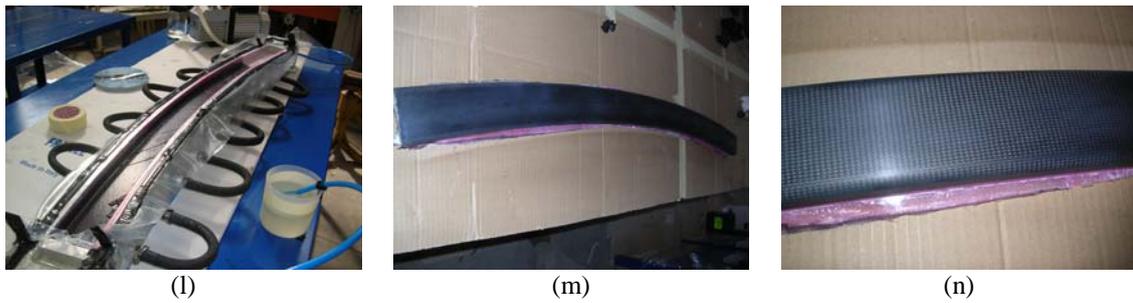


Figura 3.8 – Produzione frame su stampo femmina: (a) e (b) applicazione del distaccante; (c) e (d) posizionamento degli strati di fibra; (e) e (f) posizionamento del peel-ply; (g) posizionamento della rete; (h) chiusura del sacco; (i) e (l) impregnazione delle fibre; (m) e (n) estrazione della frame.

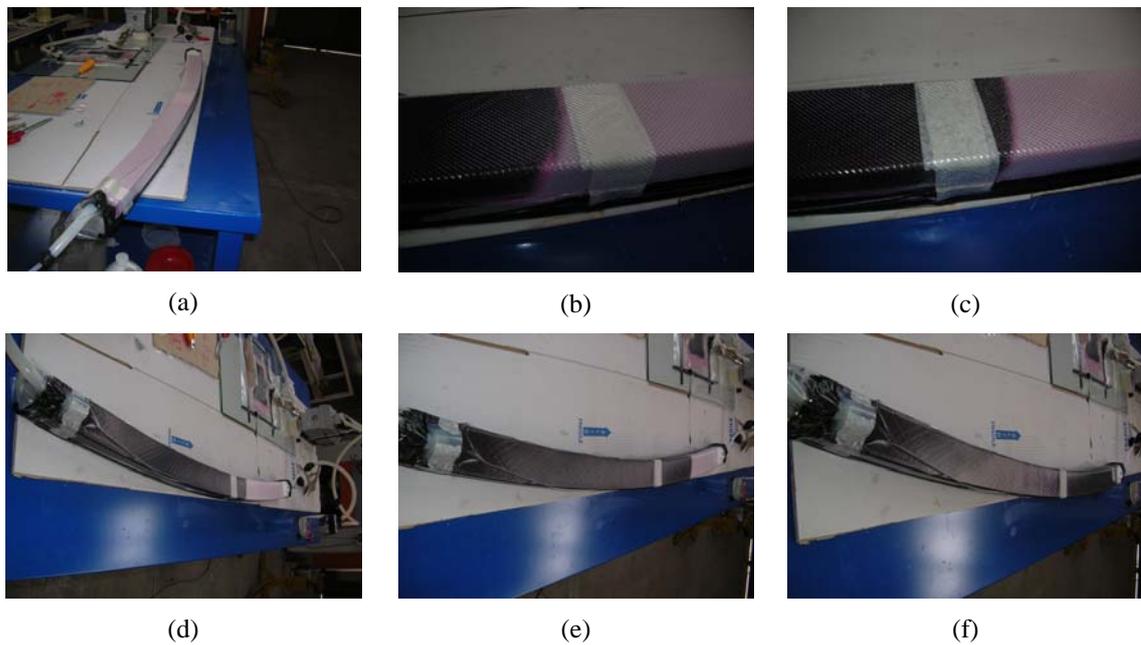


Figura 3.9 – Produzione frame su stampo maschio: (a) chiusura del sacco; (b), (c), (d), (e) e (f) impregnazione delle fibre.

In figura 3.10 si riportano le immagini di alcune frame prodotte.



Figura 3.10 – Esempi di frame prodotte: (a) stampo femmina; (b) stampo maschio.

I tempi medi di impregnazione “superficiale” (intesa come impregnazione degli strati superiori della frame, essendo lo stampo non trasparente e quindi impossibile verificare visivamente durante il processo l’impregnazione degli strati inferiori) sono stati di 45 minuti per lo stampo femmina e di 20 minuti per lo stampo maschio. Tale differenza è da attribuirsi principalmente a due fattori: lo stampo maschio prevedeva una lunghezza inferiore della frame ed inoltre nel caso dello stampo maschio è stato utilizzato come punto di immissione un distributore di tipo “omega” (figura 5.11) che consente una maggiore adduzione di resina.



Figura 3.11 – Distributore di tipo “omega”.

La chiusura dell’immissione è avvenuta dopo un tempo di 30 minuti (suggeriti dalle simulazioni FEM) per garantire la completa impregnazione della frame. La fase di cura ha previsto una fase di 2 ore, a temperatura ambiente, con i punti di aspirazione ancora aperti, ed una fase di 20 ore (richieste dal tipo di resina utilizzata), a temperatura ambiente, con i punti di aspirazione chiusi. La prima fase ha avuto lo scopo di sottrarre possibile resina in eccesso aumentando la percentuale di fibra.

Nel confronto si è notato una maggiore difficoltà, nel caso dello stampo femmina, nel mantenere costante lo spessore nell’angolo della frame a causa di un accumulo di resina locale dovuto ad una non perfetta sagomatura del sacco. Tale difficoltà è stata comunque superata come mostrato in figura 3.12.

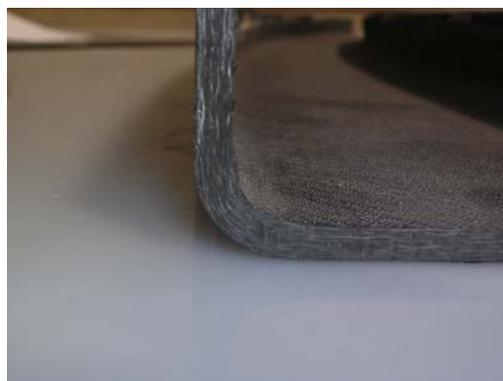


Figura 3.12 – Particolare dell’angolo della frame nel caso di stampo femmina.

3.2 Studio di un'ala anteriore

Si è presa in considerazione la produzione di una “ala anteriore”, di cui si mostra in figura 3.13 il profilo, mentre in figura 3.14 è riportata una sezione.

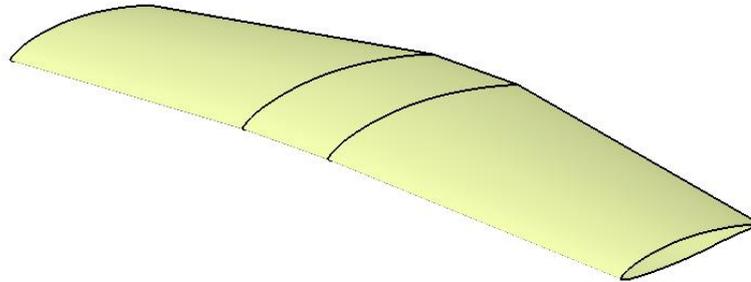


Figura 3.13 – Profilo ala anteriore.

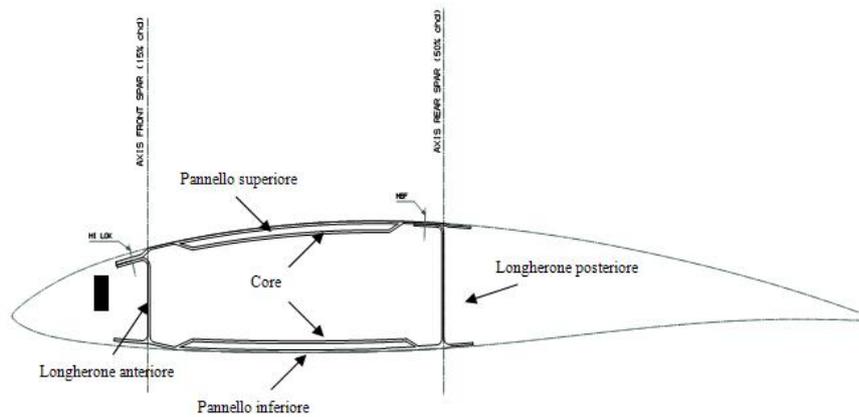


Figura 3.14 – Sezione ala anteriore.

La suddetta “ala anteriore” è costituita da due elementi, uno superiore (figura 3.15) ed uno inferiore (figura 3.16).

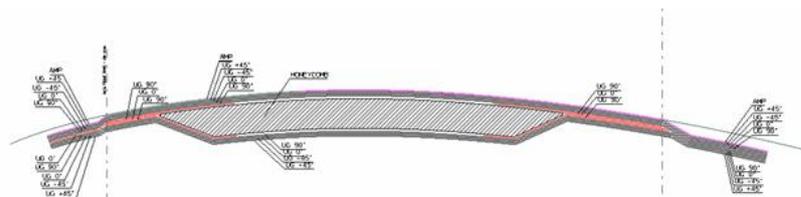


Figura 3.15 – Sezione ala anteriore: elemento superiore.

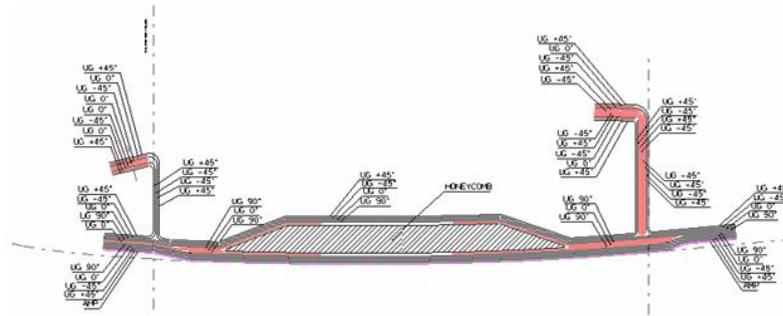


Figura 3.16 – Sezione ala anteriore – elemento inferiore.

Si è quindi sviluppato tramite il software CATIA V5 R17 una sezione dell'ala anteriore. Questa può essere considerata come un'unità ripetitiva lungo l'apertura alare e può rappresentare tutta l'ala nelle simulazioni. Ovviamente si è considerato una sezione per il pannello superiore ed una sezione per il pannello inferiore come mostrato in figura 3.17.

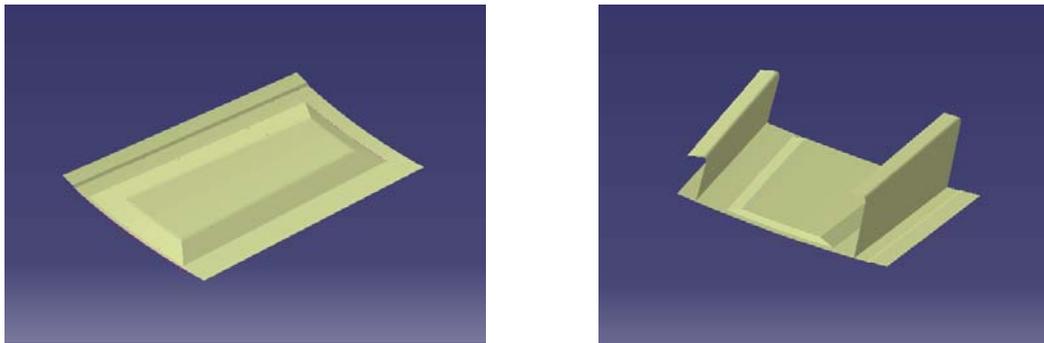


Figura 3.17 – (a) Pannello superiore; (b) pannello inferiore.

Questi modelli sono stati opportunamente modificati in RTM-Worx per determinare una meshatura ordinata e per poter separare la superficie totale in tanti domini con gli opportuni valori di permeabilità.

Si è quindi passati ad affrontare lo studio di simulazione del processo Resin Infusion utilizzando il software RTM-Worx per poter stimare i tempi d'impregnazione dei due pannelli e per verificare che la resina bagni le fibre lungo tutta la superficie del pezzo, assicurando così una qualità sia del processo che del prodotto. Nel corso delle simulazioni saranno provati diversi schemi di iniezione, variando il posizionamento dei punti d'ingresso e d'uscita della resina, e si valuteranno le differenze del processo di riempimento, apportate da queste scelte, per poter poi stabilire la configurazione più idonea che assicura una completa impregnazione delle fibre e che possa minimizzare la durata del processo tecnologico.

I pannelli costituenti l'ala anteriore non hanno spessore costante lungo la corda. Infatti il numero di lamine disposte varia sia per la presenza del core sia per rinforzare quelle zone maggiormente sollecitate. Non si può quindi considerare una permeabilità costante per tutta la superficie, anzi si deve suddividere questa in domini aventi lo stesso valore di permeabilità. Per calcolarla si è utilizzata la regola delle miscele. Anche se nei capitoli precedenti si è dimostrata la sua scarsa validità per il tipo di fibra utilizzata, ha comunque fornito dei valori che sono di un ordine di grandezza più basso di quelli sperimentali. Ciò significa che i tempi di impregnazione che si andranno a ricercare saranno sicuramente più alti di quelli reali dal momento che verranno utilizzati dei valori di permeabilità più bassi rispetto a quelli reali. Si sfrutterà quindi l'errore, generato dalla formula, per poter lavorare in sicurezza ricavando, quindi, dei tempi che saranno peggiorativi rispetto alla realtà. In base ai dati della resina RTM6, che richiede una pressione d'iniezione intorno ad una atmosfera ed una temperatura d'iniezione di 120° C, per tutte le simulazioni si sono considerate la pressione pari a 10^5 Pa e la viscosità pari a 0.05 Pa*s.

3.3 Simulazioni per il pannello superiore

L'unità ripetitiva del pannello superiore ha i due lati paralleli alla corda di 280 mm e 253 mm (il lato più grande è quello che guarda la fusoliera) mentre i due lati lungo l'apertura alare sono di 556 mm e 557 mm.

Le simulazioni effettuate partono dalla configurazione più semplice con un punto di iniezione ed uno di aspirazione posti sui lati trasversali alla corda, per poi sperimentare soluzioni diverse per determinare lo schema più idoneo che assicura un fronte di flusso omogeneo che, nel minor tempo possibile, possa impregnare completamente le fibre. Il valore massimo del tempo è stabilito dal gel time della resina, superato il quale non è possibile continuare l'impregnazione del prototipo. Tale tempo per la resina RTM6 è maggiore di 240 minuti alla temperatura di 120° C.

3.3.1 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 1

Sono stati considerati un punto d'iniezione della resina (punto rosso) ed uno di aspirazione (punto blu), posti nel punto medio dei due lati trasversali alla corda (figura 3.18).

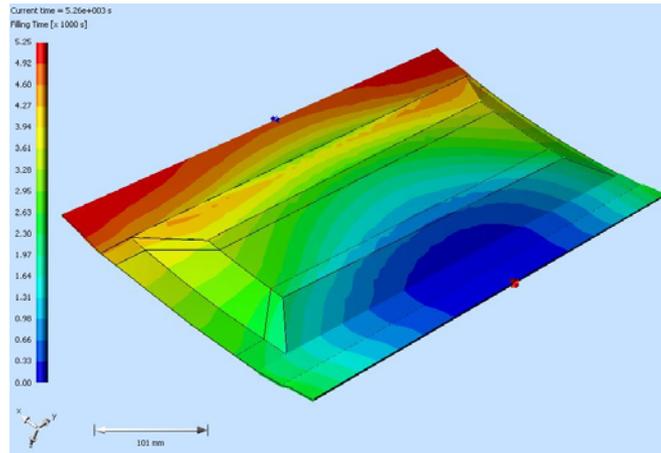


Figura 3.18 – Simulazione del processo di impregnazione del pannello superiore con un unico punto di immissione ed un unico punto di aspirazione.

Il tempo d'impregnazione è di circa 87 minuti e 30 secondi molto inferiore del gel time della resina. Nella figura 3.1 è rappresentata la scala dei tempi e si può notare come il fronte di flusso si propaga nella struttura. La zona verde ai margini del pezzo sottolinea che la resina impiegherà il 50% del tempo totale di riempimento per raggiungere tale zona. Ciò fa immaginare che la resina si muova molto lentamente in prossimità di queste aree. Dall'analisi dei vettori velocità (figura 3.19) è confermata tale ipotesi.

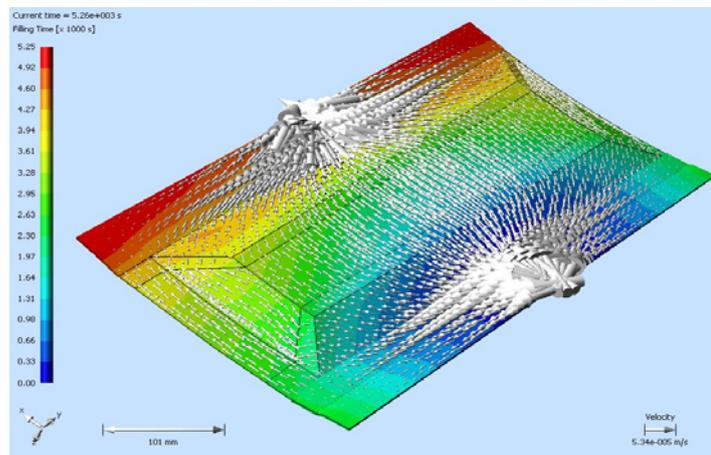


Figura 3.19 – Analisi del vettore velocità nel caso di una immissione ed una aspirazione puntuali.

Si può notare, infatti, che i vettori velocità sono di modulo molto grandi in prossimità dei punti d'iniezione e d'aspirazione della resina e molto piccoli nelle zone sottolineate in precedenza. In particolare, nei quattro spigoli del prototipo, i vettori velocità sono quasi nulli. In queste zone quindi non è assicurata la completa impregnazione delle fibre.

3.3.2 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 2

Verrà ora considerato lo schema con due punti d'iniezione posti all'estremità di un lato trasversale alla corda e uno d'aspirazione (figura 3.20).

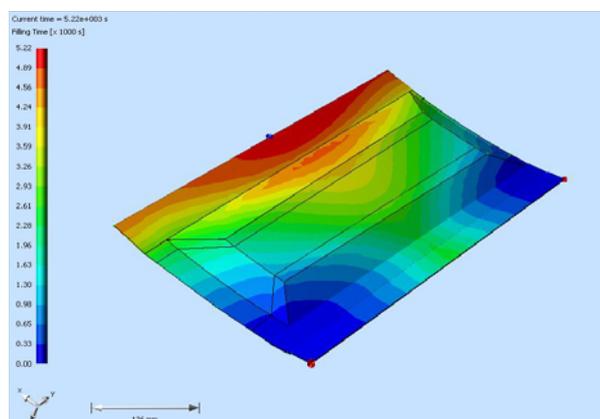


Figura 3.20 - Simulazione del processo di impregnazione del pannello superiore con due punti di immissione ed un unico punto di aspirazione.

Il tempo d'impregnazione è di circa 87 minuti. Rispetto al caso precedente, il tempo di riempimento è rimasto pressoché lo stesso. Il fronte di flusso invece, come prevedibile, è molto diverso. Anche in questo caso si possono avere delle zone asciutte. In particolare la zona verde al centro tra i due punti d'iniezione e gli spigoli superiori sul bordo d'uscita.

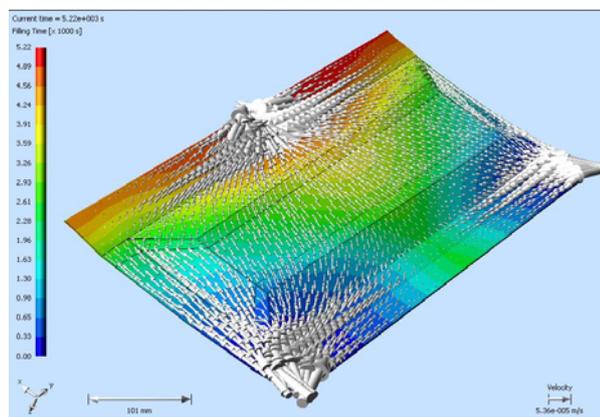


Figura 3.21 – Analisi del vettore velocità nel caso di due immissioni ed una aspirazione puntuali.

Come fatto in precedenza dall'analisi dei vettori velocità si potrà confermare l'ipotesi fatta, notando che il modulo di tali vettori è prossimo a zero (figura 3.21).

3.3.3 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 3

La configurazione proposta a questo punto è costituita da due punti d'iniezione e due punti d'aspirazione (figura 3.22).

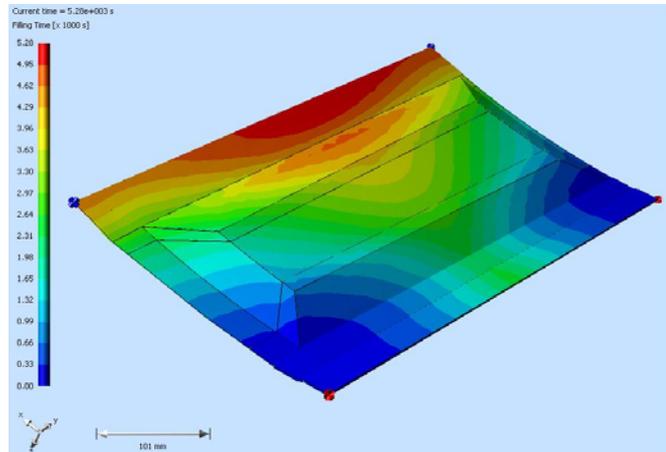


Figura 3.22 - Simulazione del processo di impregnazione del pannello superiore con due punti di immissione e due punti di aspirazione.

Il tempo d'impregnazione è di circa 88 minuti, quindi resta stabile rispetto alle prove precedenti.

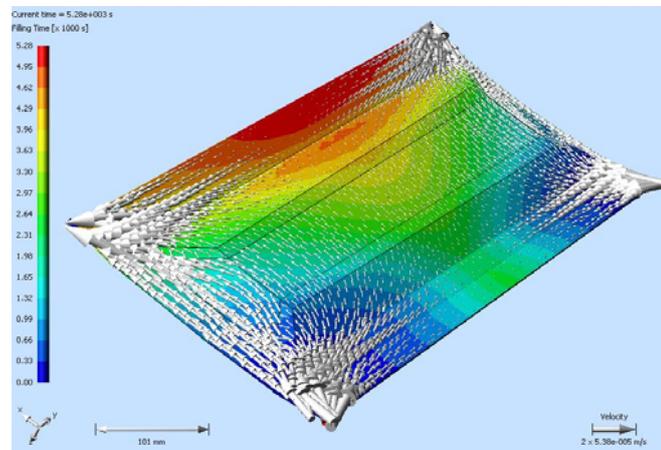


Figura 3.23 - Analisi del vettore velocità nel caso di due immissioni e due aspirazioni puntuali.

Dall'analisi dei vettori velocità (figura 3.23) si può affermare che questo è lo schema peggiore. Infatti posizionando due punti d'aspirazione, la resina tenderà a scorrere lungo i bordi esterni del pezzo lasciando le fibre della zona centrale asciutte.

3.3.4 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 4

Lo schema proposto è tre punti d'iniezione, due posti sull'estremità ed uno nel punto medio del lato inferiore trasversale alla corda, ed un punto d'aspirazione nel punto medio del lato superiore trasversale alla corda (figura 3.24).

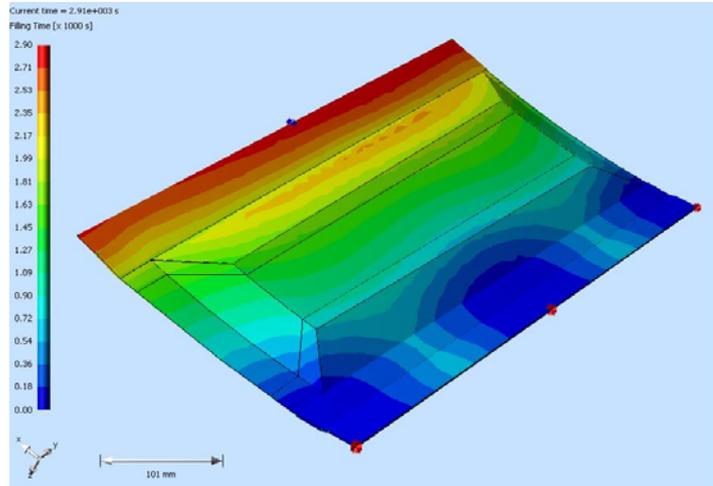


Figura 3.24 - Simulazione del processo di impregnazione del pannello superiore con tre punti di immissione ed un unico punto di aspirazione.

Questa volta il tempo d'impregnazione si è ridotto drasticamente ed è pari a 48 minuti e 30 secondi, cioè la metà dei tempi precedenti. Il fronte di flusso sembra essere abbastanza omogeneo. Per una conferma è necessario analizzare il campo vettoriale delle velocità (figura 3.25).

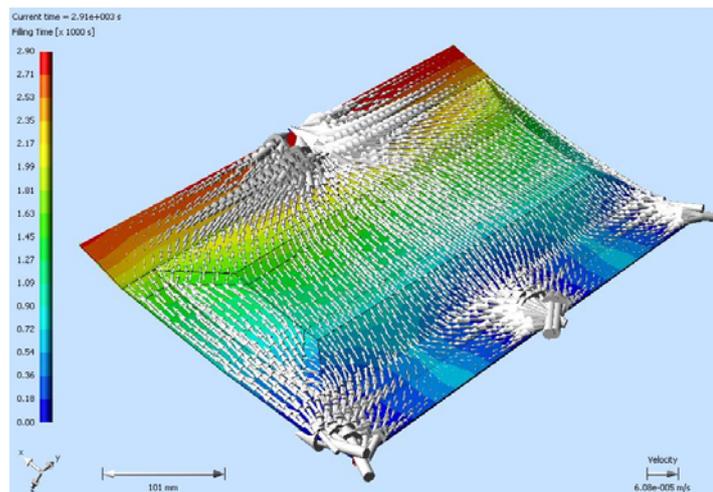


Figura 3.25 - Analisi del vettore velocità nel caso di tre immissioni ed una aspirazione puntuali.

I vettori velocità ancora una volta indicano delle zone asciutte avendo i vettori molto piccoli. Queste aree sono comprese tra i punti di iniezione e gli spigoli superiori sul lato

superiore contenente il punto d'uscita. Anche se si utilizzassero due punti d'uscita non si determinerebbero significative variazioni (figure 3.26 e 3.27).

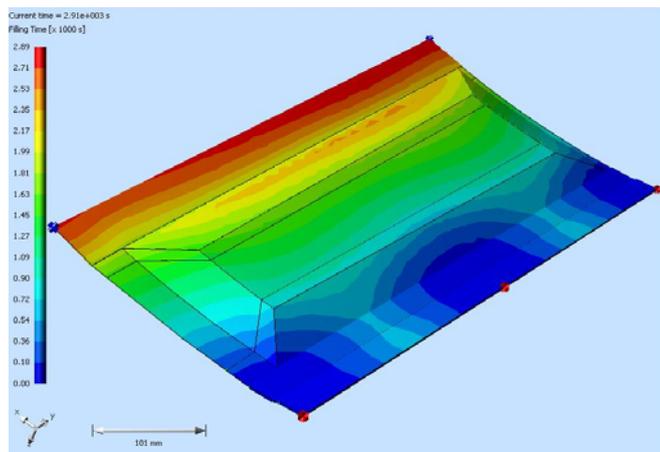


Figura 3.26 - Simulazione del processo di impregnazione del pannello superiore con tre punti di immissione e due punti di aspirazione.

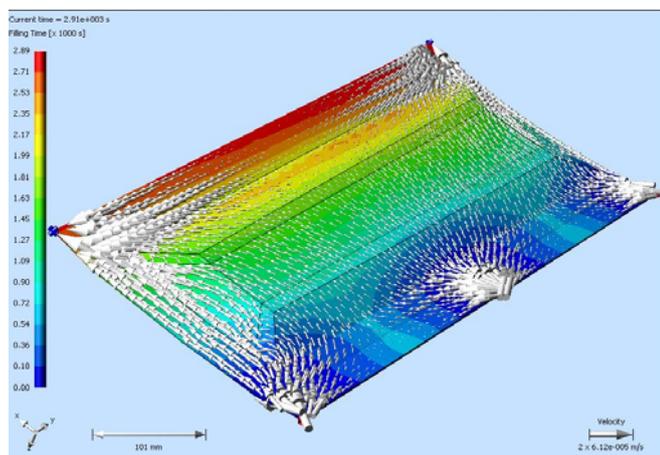


Figura 3.27 - Analisi del vettore velocità nel caso di tre immissioni e due aspirazioni puntuali.

Il tempo di riempimento non varia e restano comunque delle zone dubbie, nelle quali molto probabilmente non ci sarà un completo passaggio di resina, individuate tra i punti di ingresso ed i punti di uscita vicino rispettivamente al bordo inferiore ed il bordo superiore.

3.3.5 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 5

Visto che le zone asciutte per tutte le simulazione precedentemente svolte, si sono concentrate tra i punti d'iniezione e d'aspirazione e negli spigoli del prototipo, si vuole ora operare un nuovo schema con l'utilizzo di spirali per l'iniezione. Si ipotizza che al posto di punti d'iniezione ci sia un cilindro del diametro di 5 mm posto parallelamente all'asse longitudinale dell'ala, quindi parallelo al lato inferiore trasversale alla corda.

Uno stesso cilindro verrà posto sul lato superiore dove ci sarà il punto d'aspirazione. Si tiene a precisare che, comunque, si avrà un punto d'iniezione ed uno d'uscita, ma che saranno comunicanti con i cilindri. Così la resina avrà comunque un punto d'ingresso ma prima di incontrare le fibre troverà dinanzi a se un canale, il cilindro appunto, che ovviamente riempirà prima di procedere verso le fibre. In questo modo si assicura un ingresso della resina verso le fibre, non più puntuale ma su tutta la lunghezza della sezione d'ala che stiamo considerando. In figura 3.28 è mostrata un'immagine della suddetta simulazione.

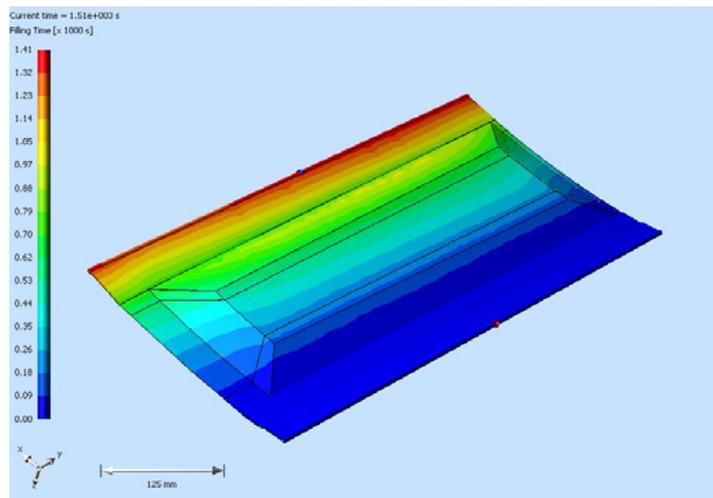


Figura 3.28 - Simulazione del processo di impregnazione del pannello superiore con una linea di immissione ed una linea di aspirazione.

Il tempo di riempimento è 25 minuti e 10 secondi. Questo schema ha ridotto ancora ulteriormente il tempo d'impregnazione ed è ora la metà della configurazione precedente ed addirittura un quarto di quella iniziale.

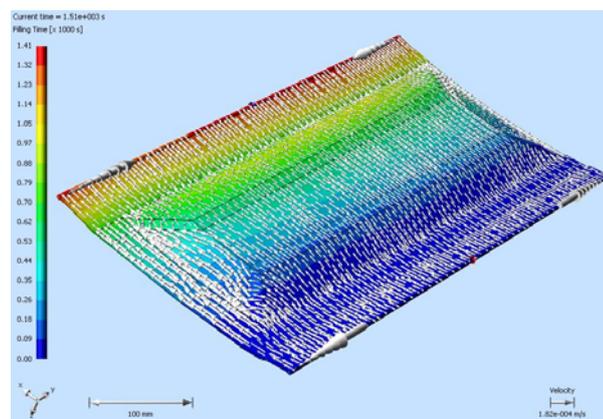


Figura 3.29 - Analisi del vettore velocità nel caso di una linea di immissione ed una linea di aspirazione.

Si può notare come il fronte di flusso sia diverso da quelli visti in precedenza, ed, in particolare, si presenta molto più omogeneo e lineare lungo tutto il percorso.

I vettori velocità confermano il buon risultato della simulazione (figura 3.29). Questi si presentano tutti, o quasi, paralleli alla corda dell'ala, ed hanno un modulo pressoché costante lungo tutto il percorso. Tutto ciò evidenzia un cammino costante e regolare del fronte di flusso della resina che andrà ad impregnare tutta la superficie di riferimento.

3.3.6 Simulazioni per il pannello superiore - Simulazione 6

A questo punto si svolgeranno altre due simulazioni con lo scopo di migliorare ulteriormente lo schema precedente. Si continuerà a considerare un cilindro d'ingresso ed uno d'uscita ma stavolta i punti d'iniezione di resina nel canale saranno due e posti sull'estremità dello stesso. Il punto d'aspirazione continuerà ad essere posto nel punto medio del bordo superiore (figura 3.30).

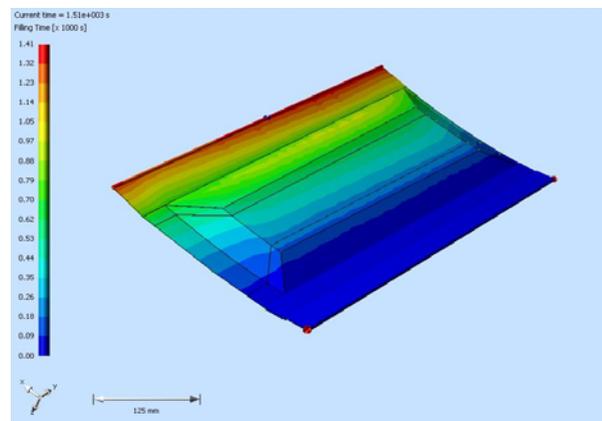


Figura 3.30 - Simulazione del processo di impregnazione del pannello superiore con una immissione lineare, supportata da due punti, una linea di aspirazione.

Il tempo d'impregnazione non è variato e i vettori velocità non subiscono particolari modifiche. Si è anche provato a mettere due punti d'aspirazione agli estremi della canalina. Questa modifica ha variato solo il tempo di riempimento riducendolo di altri 20 secondi lasciando inalterata la rappresentazione dei vettori velocità.

3.3.7 Simulazioni per il pannello superiore - Conclusione

Il primo schema d'iniezione prevede un punto d'ingresso ed uno d'uscita della resina posti nella mezzeria dei due bordi trasversali alla corda dell'ala. Si osserva che il fronte di flusso è divergente lasciando asciutte le zone ai lati del punto di ingresso e del punto di uscita della resina. Si è cercato di migliorare tale schema utilizzando più punti d'iniezione e d'aspirazione disposti sui bordi paralleli all'asse longitudinale dell'ala.

Tali configurazioni hanno modificato i tempi di riempimento riducendoli del 50% ma non hanno risolto il problema d'impregnazione delle fibre. Il fronte di flusso nei vari schemi è variato senza però assicurare un completo raggiungimento della resina in tutta la superficie considerata. Tutto ciò è stato confermato dall'analisi dei moduli dei vettori velocità che, nelle zone dubbie, si presentano pressoché nulli.

Si è risolto il problema considerando delle canaline d'iniezione e d'uscita in modo da evitare un ingresso puntuale della resina. In questo modo si ottiene un fronte di flusso omogeneo e costante, che impregnerà completamente il prototipo, ed un tempo di riempimento molto inferiore rispetto a quelli ottenuti negli schemi precedenti.

Si è cercato di migliorare ulteriormente tale schema ma si è ottenuto solo una riduzione ininfluyente del tempo. Inoltre se si pensa che questo processo deve essere svolto su tutta la lunghezza dell'ala che è di circa 3m e 22cm è opportuno considerare quegli schemi che offrono buoni risultati a condizione di una realizzazione tecnologica quanto più semplice ed economica possibile. E' quindi da scartare l'ipotesi migliorativa di utilizzare oltre alle canaline due punti di iniezione e due di aspirazione, perché complicherebbero troppo la realizzazione della tecnologia e la sua manutenzione.

Quindi lo schema migliore è quello dato dalla simulazione 5 che ha dato un tempo di riempimento pari a 25minuti e 10 secondi ed assicura una completa impregnazione delle fibre. Di seguito vengono proposte le varie fasi di riempimento dello schema considerato (figura 3.31).

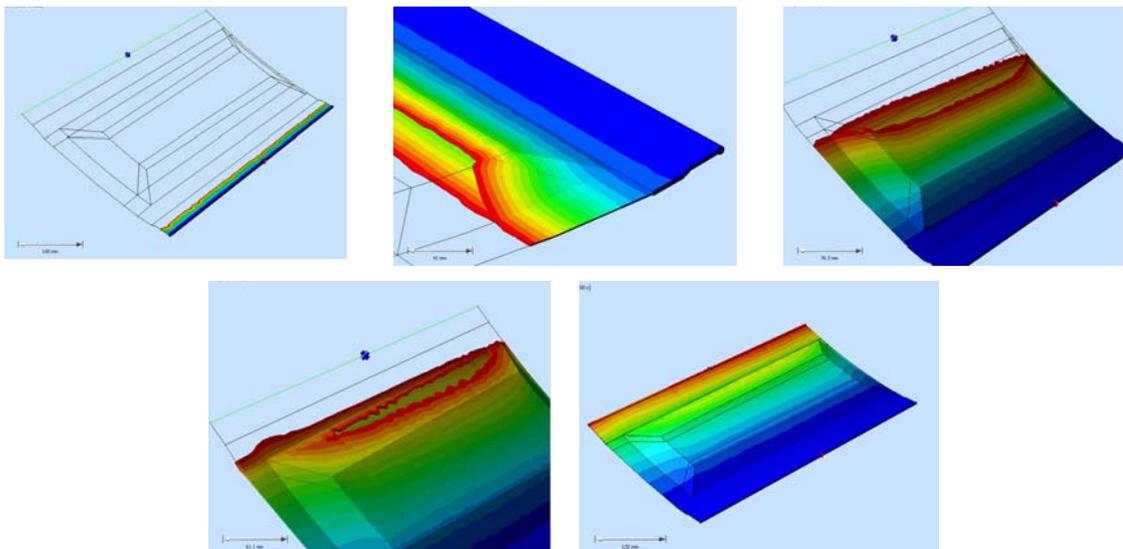


Figura 3.31 - Simulazione dello schema ritenuto migliore: una linea di immissione ed una linea di aspirazione.

Da questa sequenza si può notare come il fronte di flusso si separi quando incontra il core. I due profili del flusso non sono diversi tra loro e restano pressoché paralleli distanziandosi di non molto solo verso la fine del core. Quando i due fronti si incontrano sul gradino del core non avviene nessun fenomeno particolare: una volta ricongiunti il fronte unito proseguirà verso la canalina d'uscita. Come sempre queste considerazioni sono state confermate dai vettori velocità che non creano un andamento vorticoso sulla linea d'unione tra i due profili del flusso.

3.4 Simulazioni per il pannello inferiore

L'unità ripetitiva del pannello inferiore ha i due lati esterni, paralleli alla corda, di 303 mm e 274 mm (il lato più grande è quello che guarda la fusoliera) mentre i due lati, lungo l'apertura alare, sono di 571 mm e 572 mm. I due longheroni, integrati nella struttura, non hanno altezza costante lungo l'apertura alare, anzi si presenta con valori crescenti che vanno dalla corda più esterna dell'ala fino alla corda di fissaggio con la fusoliera. Nell'unità ripetitiva scelta si avrà, per la spalla anteriore, un'altezza minima pari a 47 mm ed una massima pari a 55 mm. La spalla posteriore avrà invece un'altezza variabile tra un minimo di 56 mm fino ad un massimo pari a 76 mm. Infine le aree di fissaggio tra pannello superiore ed inferiore sono sporgenti per 19,5 mm per la spalla anteriore e di 18 mm per quella posteriore.

Anche in questo caso, si partirà da uno schema di simulazione semplice per poter poi ricavare la configurazione migliore che assicura una completa impregnazione delle fibre.

Sfruttando l'esperienza fatta con le simulazione del pannello superiore, non si considereranno gli schemi senza cilindri d'iniezione. Infatti si ipotizza che se su una superficie relativamente semplice, quale è il pannello superiore, si siano avuti fenomeni di riempimento anomali che non garantivano una completa impregnazione delle fibre, si può preventivare che si verifichino gli stessi problemi anche per questa struttura, sicuramente molto più complessa.

3.4.1 Simulazioni per il pannello inferiore - Simulazione 1

Come prima configurazione, è stata scelta una spirale d'iniezione con un imbocco d'ingresso centrale per la resina ed una spirale d'aspirazione con un punto d'uscita posto nella mezzeria della spirale stessa (figura 3.32).

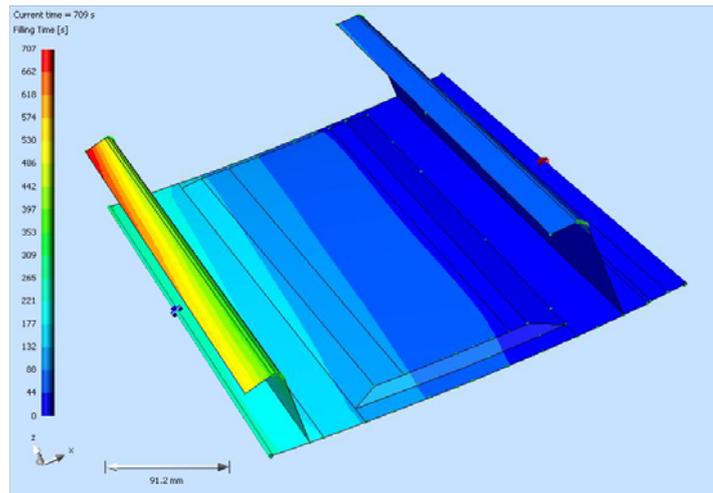


Figura 3.32 - Simulazione del processo di impregnazione del pannello superiore con una linea di immissione ed una linea di aspirazione.

Il tempo di riempimento è 11 minuti e 48 secondi ed è molto lontano dal gel time della resina. Dalla figura si nota che il fronte di flusso è lineare e non presenta particolari andamenti lungo il percorso compiuto. Vista però la complessità della geometria è ipotizzabile che la resina non sia riuscita ad impregnare completamente le due spalle e di conseguenza le due sporgenze. L'analisi dei vettori velocità potrà aiutare a chiarire l'osservazione.

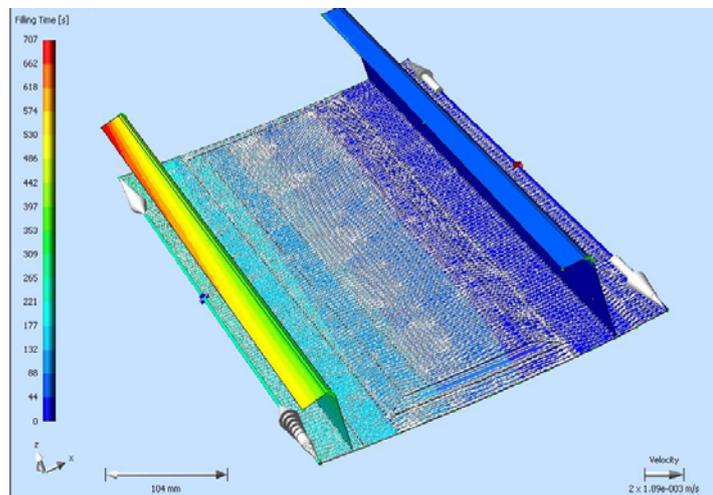


Figura 3.33 - Analisi del vettore velocità nel caso di una linea di immissione ed una linea di aspirazione.

Dalla figura si evince che i vettori velocità sono nulli sulla prima spalla, cioè posteriore, e di modulo molto piccolo sulla spalla anteriore.

Questo risultato è un po' ingannevole. Infatti anche se, a simulazione terminata, non ci sono i vettori velocità sui due longheroni, non vuol dire che la resina non sia riuscita a salire su questi ed ad impregnarne le fibre.

Se si visualizzano le fasi intermedie della simulazione, i vettori velocità vengono rappresentati su entrambe le spalle.

Dagl'ingrandimenti seguenti si possono evidenziare i vettori sul longherone anteriore e posteriore in due step intermedi della simulazione (figure 3.34 e 3.35).

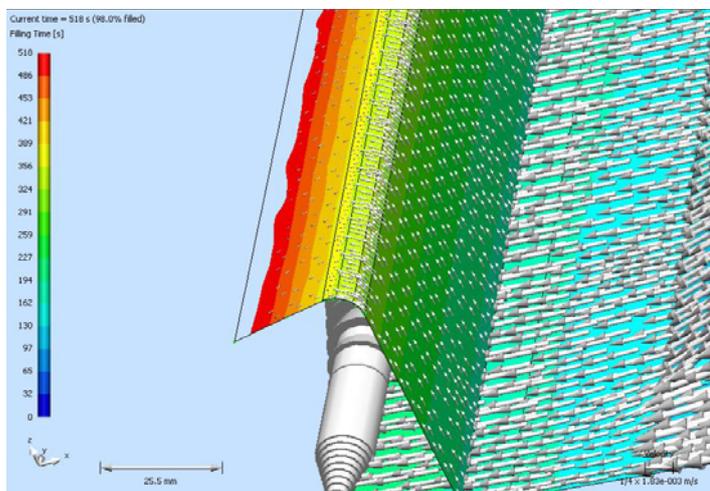


Figura 3.34 – Vettori velocità del longherone anteriore.

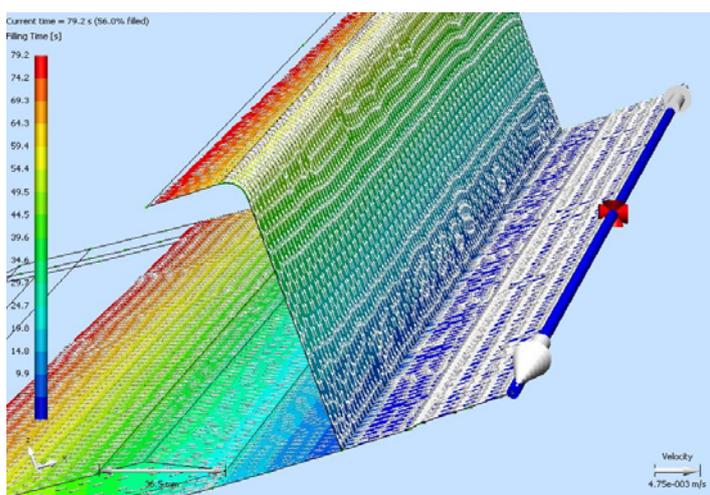


Figura 3.35 – Vettori velocità del longherone posteriore

Questi dati possono essere così interpretati: quando la resina incomincia ad entrare nella struttura compie il suo percorso regolarmente. Non solo andrà ad impregnare la fibre della base ma riuscirà anche a salire sulla spalle posteriore che è la prima che incontra. Si ricorda che le altezze in gioco non sono eccessive e nella fase iniziale d'impregnazione il gradiente di pressione di 10^5 Pa non subisce variazioni significative. E' quindi ipotizzabile che la resina riesca ad impregnare le fibre della prima spalla. Una volta compiuto il percorso sul primo longherone, la resina non avendo punti di uscita (si ricorda che l'unico punto d'aspirazione è posto sul secondo lato trasversale alla corda)

si ferma. Ecco perché i vettori velocità non vengono più rappresentati già dallo step successivo alla completa impregnazione del longherone posteriore, come si può notare nella figura seguente. In particolare, questo passaggio avviene al 63% del tempo di riempimento totale.

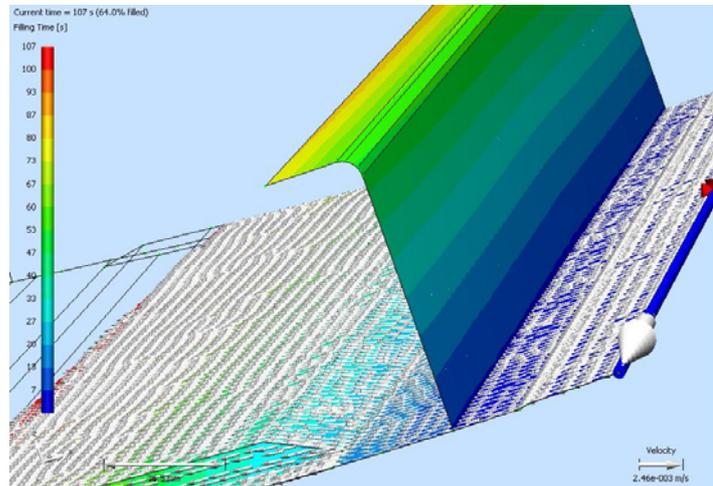


Figura 3.36 – Step successivo alla completa impregnazione del longherone posteriore: i vettori velocità sono nulli una volta impregnate le fibre.

Un discorso analogo lo si può fare per il longherone anteriore. In questo caso però, bisogna considerare che siamo verso la fine del processo ed inoltre la seconda spalla è posta molto vicino al punto d'uscita della resina. Infatti, se si osservano le figure 3.35 e 3.36 si può notare come i vettori velocità, visualizzati, siano molto minori rispetto a quelli rappresentanti la resina che scorre nella base. Ciò induce a pensare che la resina sia maggiormente attirata dal punto d'aspirazione, che è ora molto vicino rispetto al caso precedente. Quindi, sicuramente, si presenteranno delle zone asciutte sul longherone anteriore. Inoltre, il fronte di resina raggiunge la canalina d'uscita al 93% del tempo totale di riempimento: ciò vuol dire che mentre la resina sale lentamente sul longherone anteriore, parte di essa sta uscendo causando un inevitabile spreco di materiale.

3.4.2 Simulazioni per il pannello inferiore - Simulazione 2

A seguito delle considerazioni precedenti, si vuole utilizzare uno schema che possa garantire l'impregnazione del longherone anteriore. Si utilizzerà una canalina d'ingresso ed una d'aspirazione, posizionata sulla base del prototipo, ed un altro punto

d'aspirazione sulla sporgenza della seconda spalla, posizionato nella mezzeria (figura 3.37).

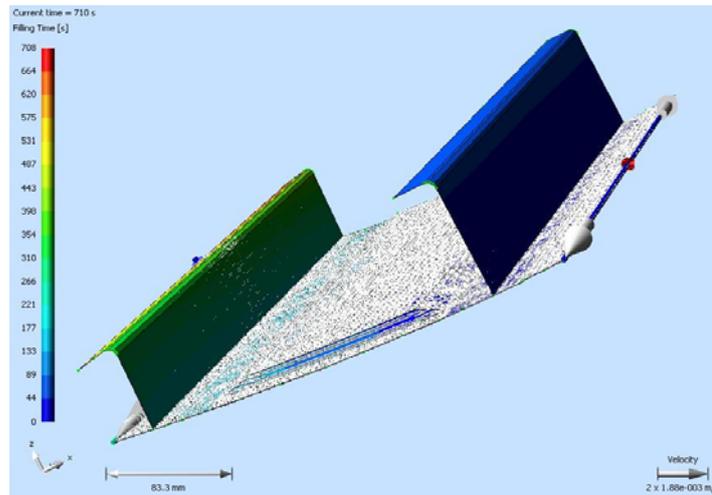


Figura 3.37 - Analisi del vettore velocità nel caso di una linea di immissione, una di aspirazione ed un punto di aspirazione su una spalla.

Il tempo di riempimento non è variato. Nella figura sono già mostrati i vettori velocità. Dall'ingrandimento di figura 3.38, si può notare che la soluzione di un punto d'aspirazione, senza l'utilizzo del cilindretto, continua a determinare problemi di impregnazione delle fibre: infatti i vettori testimoniano un'aspirazione prevalentemente centrale della resina lasciando i bordi del longherone e, successivamente quelli della sporgenza, asciutti.

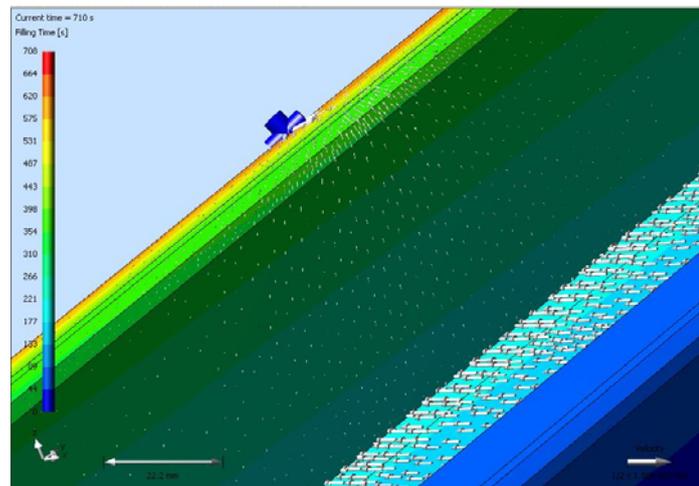


Figura 3.38 – Particolare dell'analisi del vettore velocità nel caso di una linea di immissione, una di aspirazione ed un punto di aspirazione su una spalla.

Inoltre, se si pensa all'ala anteriore nella sua lunghezza totale, sicuramente si verranno a determinare delle zone asciutte nelle aree più distanti dai punti d'aspirazione. Questa soluzione è quindi da scartare.

3.4.3 Simulazioni per il pannello inferiore - Simulazione 3

Lo schema è costituito da tre cilindretti, uno per l'iniezione della resina e due per l'aspirazione, di cui uno posto sulla base ed uno sulla sporgenza del longherone anteriore. I punti d'iniezione e d'aspirazione, per tutte e tre le canaline saranno posti nella mezzeria (figura 3.39).

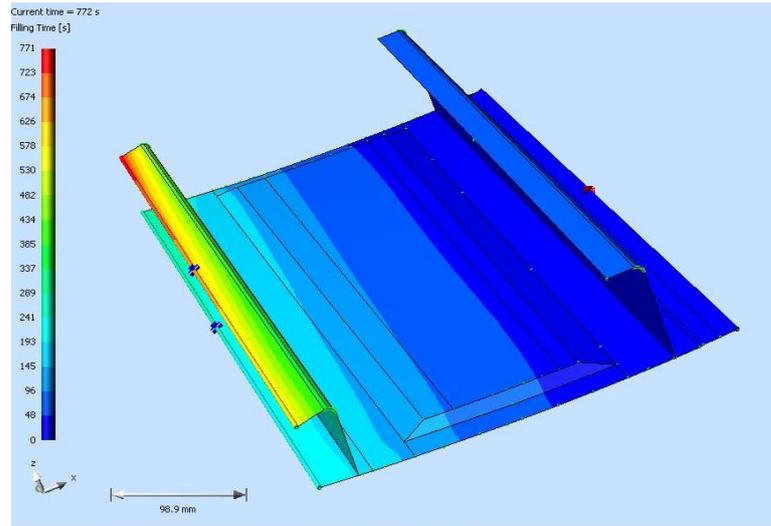


Figura 3.39 – Simulazione del processo di impregnazione del pannello superiore con una linea di immissione e due linee di aspirazione.

Il tempo di riempimento è di 12 minuti e 48 secondi. Anche se il tempo è aumentato di qualche minuto, questo dato non determina più preoccupazione perché siamo molto lontani dal gel time della resina che si ricorda essere superiore a 240 minuti alla temperatura di 120° C.

Ciò che ora deve essere maggiormente analizzato è la verifica della completa impregnazione delle fibre del longherone anteriore. In figura 3.40 sono rappresentati i vettori velocità durante l'impregnazione e poi la loro disposizione a processo terminato.

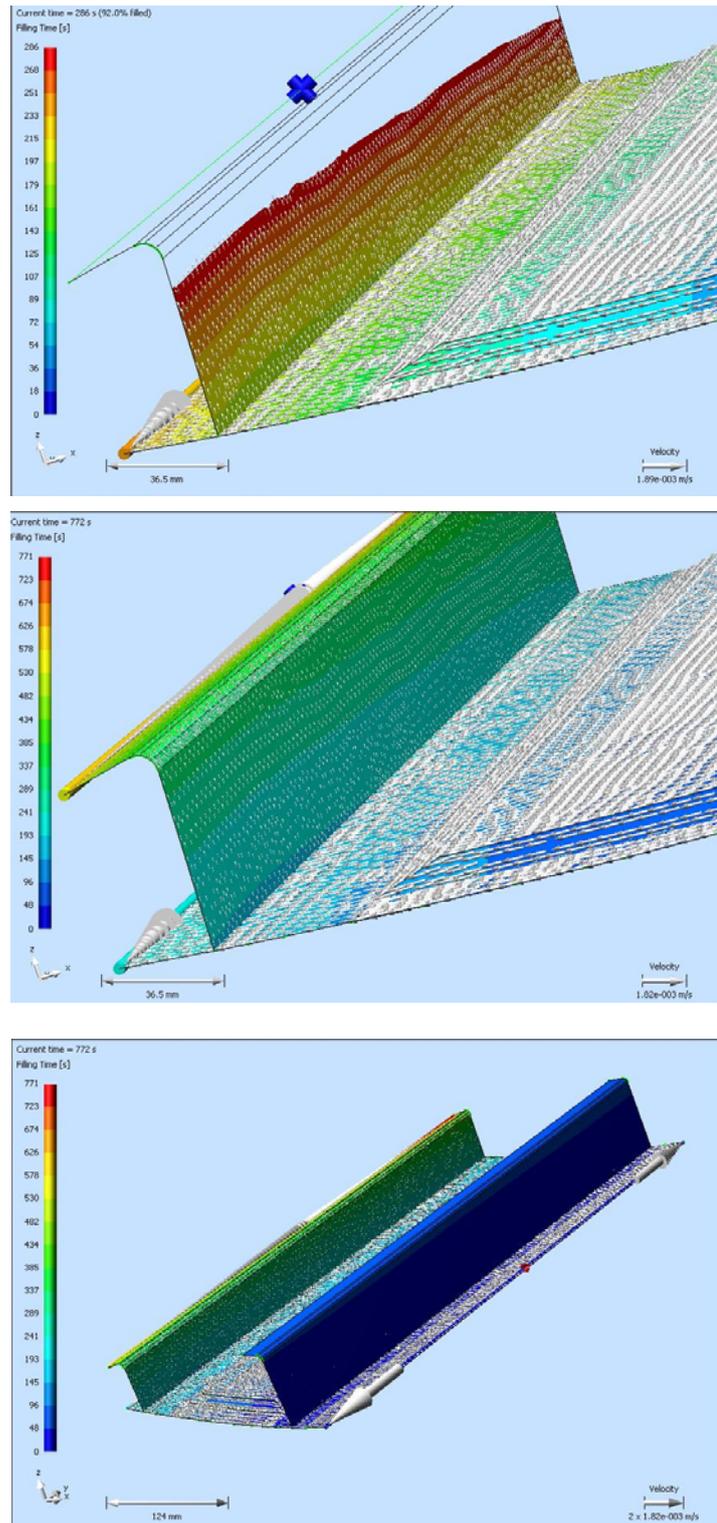


Figura 3.40 – Analisi del vettore velocità.

Si può osservare come i vettori velocità siano pressoché costanti ed omogenei su tutta la spalla anteriore. La resina quindi avverte il richiamo della spirale d'aspirazione ed andrà ad impregnare completamente le fibre del longherone e della consecutiva sporgenza.

3.4.4 Simulazioni per il pannello inferiore - Simulazione 4

Data la complessità della struttura, e ricordando, in previsione di realizzazione dell'ala anteriore, che il processo si deve sviluppare su tutta la sua lunghezza, si vuole adottare uno schema che dia una indubbia certezza del riempimento totale di tutto il volume considerato.

Per questa ragione si è ipotizzato uno schema con una canalina d'iniezione e tre canaline d'aspirazione. Queste ultime saranno poste rispettivamente, sulla sporgenza del longherone posteriore, sulla sporgenza del longherone anteriore e sul bordo della base trasversale alla corda.

Dai dati ricavati dalle simulazioni precedenti, si è notato che l'impregnazione completa del longherone posteriore avviene intorno al 63% del tempo di riempimento totale, mentre dall'altro lato, la resina raggiunge prima il bordo d'uscita della base intorno al 98% del riempimento totale per poi finire il percorso d'impregnazione delle fibre con quelle della sporgenza anteriore.

Si è pensato quindi, per evitare inutili sprechi di resina, di determinare una chiusura differenziata dei condotti d'aspirazione. Così, la prima canalina, per motivi di sicurezza, sarà chiusa non al 63% ma al 68% del tempo totale d'impregnazione, in modo da essere certi che la resina abbia raggiunto tutte le fibre. Le altre due spirali, invece saranno chiuse quella della base al 98% anziché al 93% e quella sulla sporgenza anteriore a processo terminato. Si ribadisce che è meglio perdere un po' di resina che rischiare una non completa impregnazione delle fibre per una chiusura anticipata della spirale d'aspirazione, per questo si preferisce chiudere i punti d'aspirazione uno step dopo quello indicato dal simulatore. In figura 3.41 sono mostrate le varie fasi di impregnazione con evidenziati i vettori velocità.

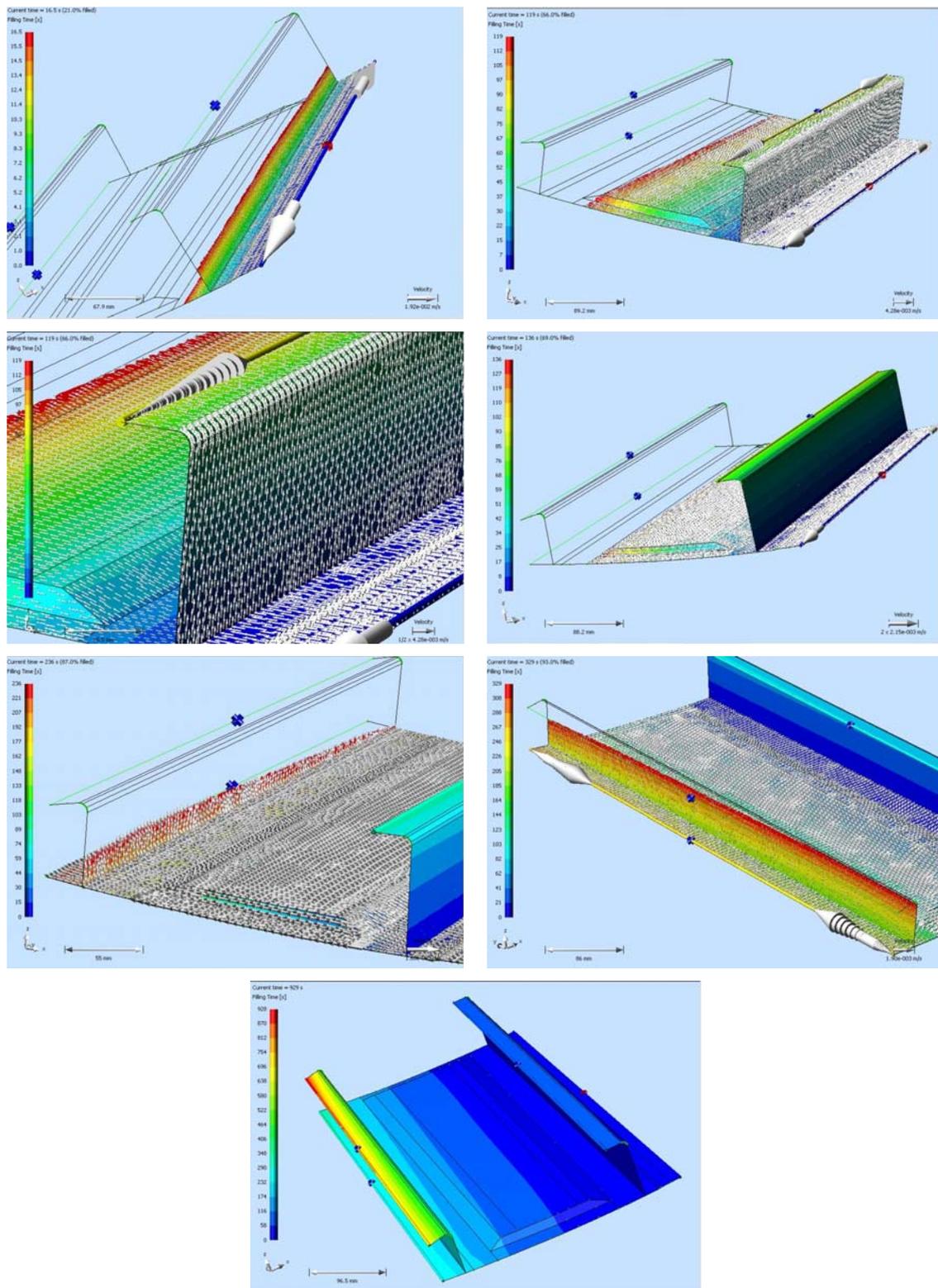


Figura 3.41 – Analisi del vettore velocità e simulazione del processo di impregnazione del pannello superiore con una linea di immissione e tre linee di aspirazione.

Il tempo d'impregnazione è 13 minuti e resta un tempo ottimo. Le fibre saranno tutte bagnate dalla resina come evidenziato dai vettori velocità.

3.4.5 Simulazioni per il pannello inferiore - Conclusione

Per la simulazione di processo del pannello inferiore, si è partiti dalla configurazione più semplice con una spirale d'iniezione ed una d'aspirazione.

I tempi di riempimento sono risultati subito ottimi, potendo così focalizzare lo studio sulla garanzia di una completa impregnazione delle fibre in tutto il volume considerato. Forti dubbi circa l'impregnazione delle fibre, si è avuta per il longherone anteriore. Stando molto vicino al punto d'aspirazione, si è dimostrato tramite l'analisi dei vettori velocità, che la resina sente principalmente il richiamo della bocca d'uscita, salendo così con grande difficoltà sulla seconda spalla.

Il longherone posteriore sfruttando la massima depressione che c'è nella struttura, perchè molto vicino al punto d'iniezione, non desta particolare preoccupazione.

Si è così, migliorato lo schema aggiungendo un'altra spirale posta sulla sporgenza del longherone anteriore. I risultati sono stati confortanti.

Si potrebbe, a questo punto, ipotizzare che questa sia la soluzione migliore, ma pensando che la geometria di riferimento è un'unità ripetitiva di un complessivo di lunghezza pari a 3m e 30 cm, si vuole operare un'ulteriore modifica che assicura una indubbia impregnazione di tutta la struttura.

Allora si è aggiunta una terza spirale sulla sporgenza del longherone posteriore, e conoscendo i tempi di riempimento in ogni singola fase del processo, si è stabilita una chiusura di questa canalina d'aspirazione al 68% del tempo totale di riempimento.

Questo è sicuramente lo schema preferibile, perché consente di assicurare senza dubbio, una completa impregnazione delle fibre di tutto il pannello inferiore dell'ala anteriore.

3.5 Progettazione degli stampi per il profilo alare

Al fine di realizzare un dimostratore per il profilo alare simulato mediante RTM-Worx si è resa necessaria la progettazione e la realizzazione di appositi stampi, le cui superfici di riferimento sono state ricavate dai disegni tridimensionali dei particolari da realizzare.

Inizialmente si sono progettati gli stampi relativi alla sezione del profilo e solo successivamente quelli relativi al profilo completo.

In figura 3.42 si riportano le superfici di riferimento per gli stampi ricavate dagli elementi solidi da realizzare.

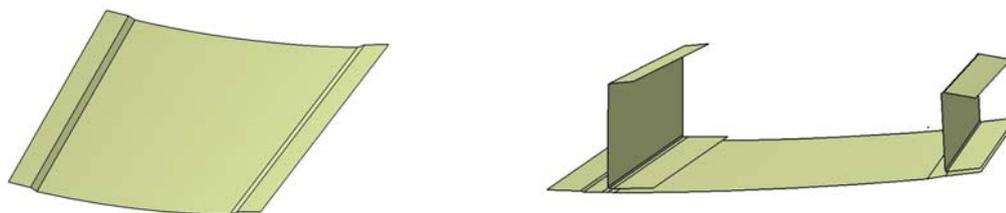


Figura 3.42 – Superfici di riferimento per lo stampo dell'elemento superiore (a) e inferiore (b) del profilo.

Successivamente sono stati ricavati i solidi degli stampi, tenendo conto della necessità di piani di appoggio di contorno richiesti dalla tecnologia di infusione.

In figura 3.43 si riportano le prime versioni degli stampi, in cui il sistema di riscaldamento era affidato a un flusso di olio diatermico che attraversava appositi fori realizzati nello stampo. In particolare si sottolinea la necessità di realizzare, per l'elemento inferiore del profilo, due controstampi a causa della presenza

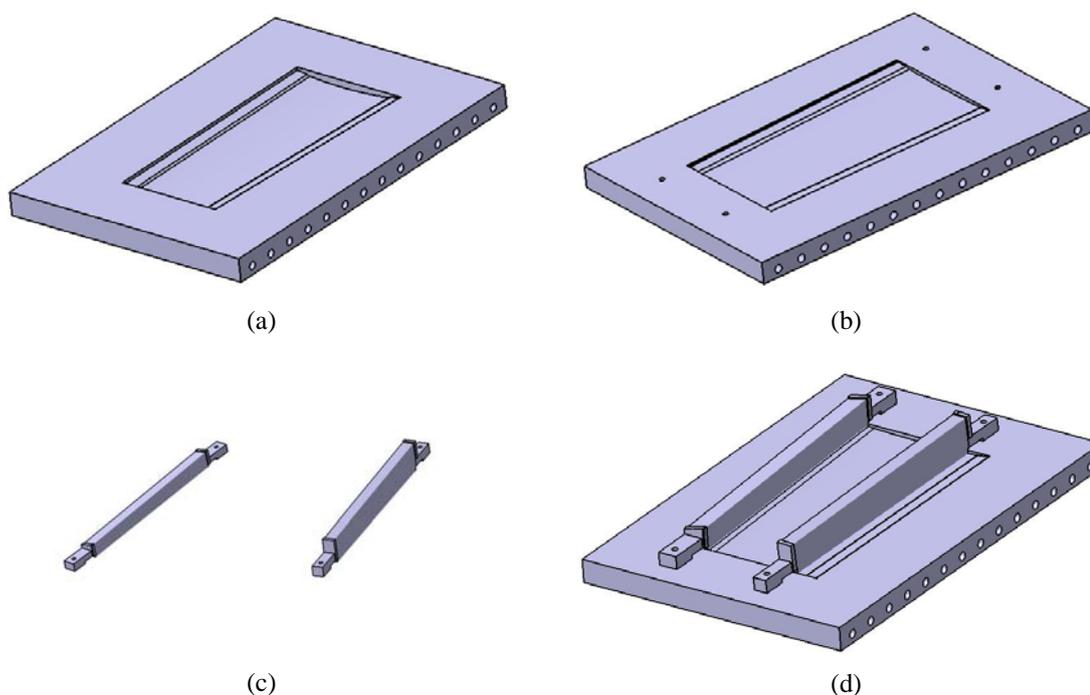


Figura 3.43 – Stampi per il particolare del profilo alare: (a) Stampo elemento superiore del profilo; (b) stampo elemento inferiore del profilo; (c) controstampi per l'elemento inferiore del profilo; (d) assemblaggio stampo e controstampi per l'elemento inferiore del profilo.

La larghezza degli stampi (600 mm) non ha reso possibile la realizzazione dei fori, si è dunque optato per un riscaldamento dei due stampi mediante resistenze elettriche fissate nella parte inferiore degli stessi. In figura 3.44 si riportano i disegni definitivi degli stampi.

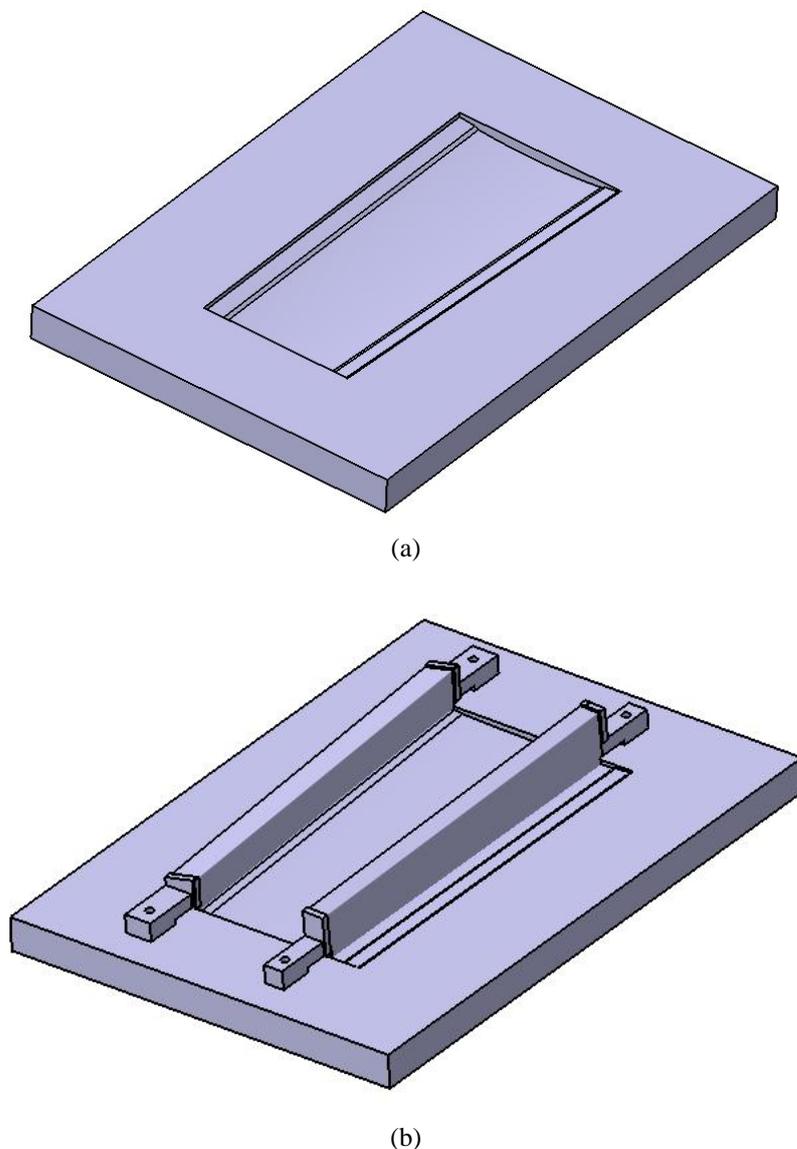


Figura 3.44 – Stampi per il particolare del profilo alare: (a) Stampo elemento superiore del profilo; (b) assemblaggio stampo e controstampi per l'elemento inferiore del profilo.

3.6 Realizzazione delle parti del profilo alare.

Si è quindi passati alla realizzazione dei dimostratori, utilizzando una resina SX10 epossidica bicomponente, e un rinforzo in fibra di carbonio di tipo tessuto 0/90 da 200 g/m² ed un rinforzo in fibra di carbonio di tipo unidirezionale da 290 g/m². In figura 3.45 si riporta la stratifica dell'elemento superiore del dimostratore e in figura 3.46 sono riportate alcune fasi del processo di impregnazione.

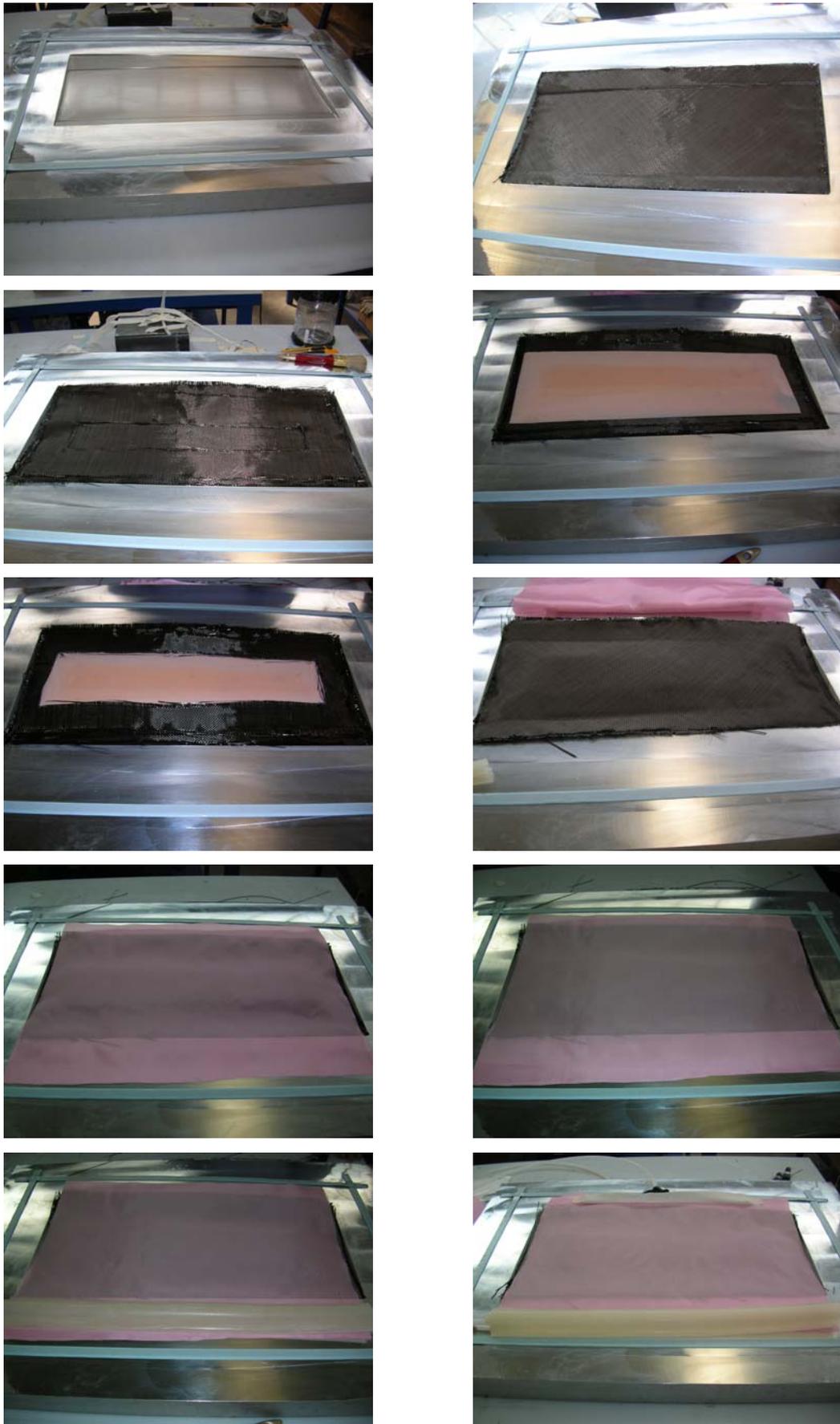


Figura 3.45 – Stratificazione elemento superiore.

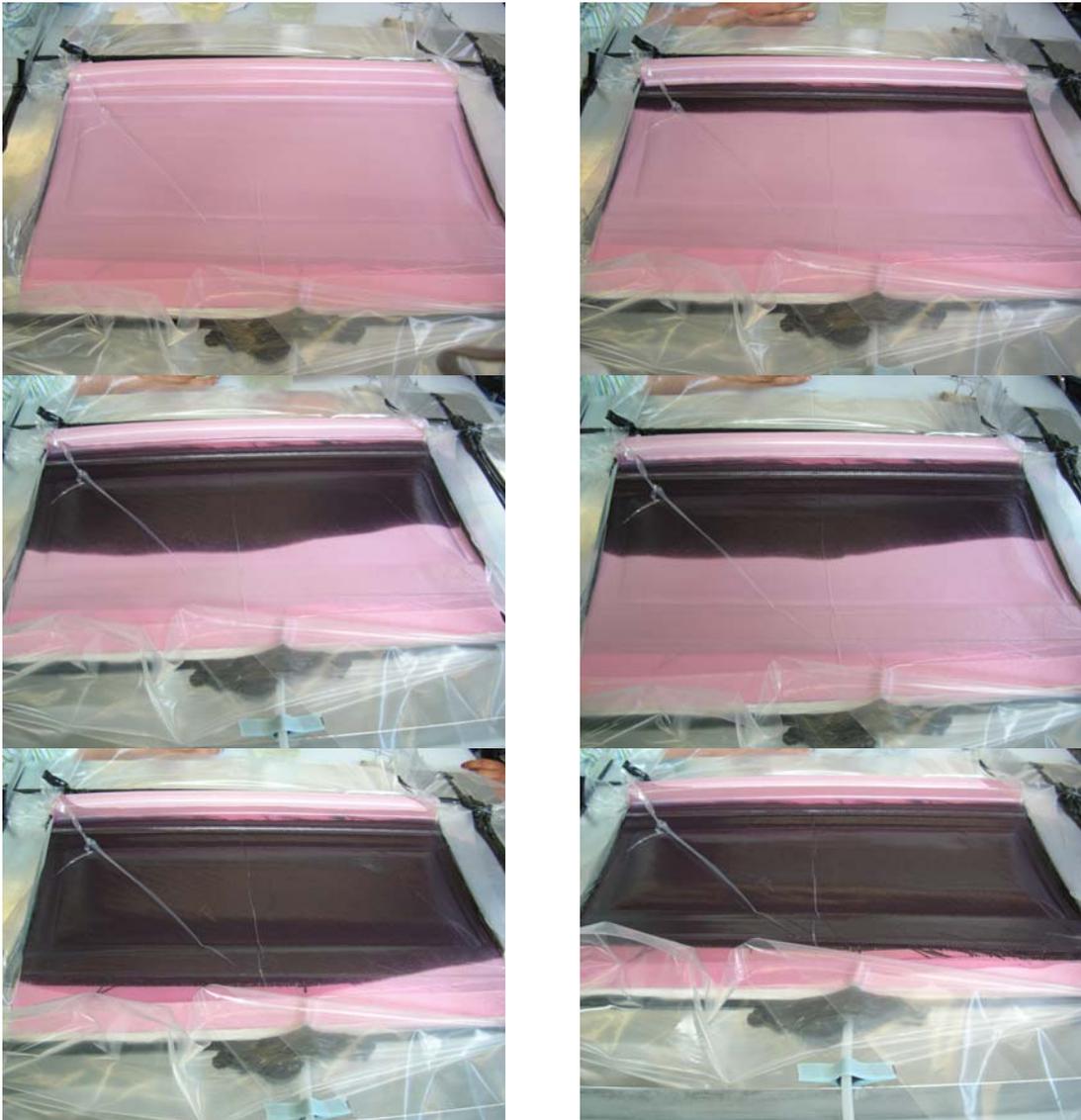


Figura 3.46 – Processo di impregnazione dell'elemento superiore.

In figura 3.47 si riporta l'elemento superiore del dimostratore dopo l'estrazione dallo stampo.



Figura 3.47 – Elemento superiore.

In figura 3.48 si riportano le immagini della stratifica e dell'impregnazione dell'elemento inferiore del dimostratore.



Figura 3.48 – Stratifica e processo di impregnazione dell'elemento superiore.

In figura 3.49 si riportano le immagini dell'elemento inferiore del dimostratore dopo l'estrazione dallo stampo, mentre in figura 3.50 si riporta l'immagini del dimostratore dopo l'assemblaggio.



Figura 3.49 – Elemento inferiore.



Figura 3.50 – Assemblaggio componenti.

Conclusioni

Il presente lavoro ha avuto l'obiettivo di studiare e ottimizzare la produzione di strutture complesse di tipo aeronautico da realizzare in materiale composito mediante processi di tipo infusion, tra cui si è concentrata l'attenzione sulla tecnologia *RIFT (Resin Infusion under Flexible Tool)*.

Strumento fondamentale per il raggiungimento del suddetto obiettivo è stata la validazione di un codice FEM, in grado di simulare l'infusione della resina in geometrie di qualsiasi complessità calcolando i tempi di completamento del processo, l'RTM-Worx della Polyworx, a supporto del quale si è svolta un'estesa campagna di prove sperimentali, volte sia alle richieste di input del programma stesso sia al confronto delle simulazioni con i dati sperimentali.

Completata in modo positivo la fase di validazione, grazie a prove eseguite su forme semplici e complesse, si è posta l'attenzione su due strutture di natura aeronautica: una C-frame (elemento strutturale del tronco di fusoliera) ed il cassone di un profilo alare da realizzare in due componenti. I suddetti processi sono stati studiati ed ottimizzati al fine di ottenere il risultato desiderato riducendo i tempi e quindi i costi di fabbricazione.

Il primo passo in entrambi i casi è stata la progettazione e la realizzazione di opportuni stampi che potessero consentire di realizzare le componenti scelte. Nel caso della C-Frame si è fatto uso sia di uno stampo femmina che di uno stampo maschio, mentre nel caso del cassone alare si è fatto uso di uno stampo modulare.

Il passo finale è stata quindi l'effettiva produzione di alcuni esemplari dei suddetti componenti ottenendo in entrambi i casi un riscontro positivo nel confronto tra le simulazioni effettuate e i risultati sperimentali ottenuti, confermando ulteriormente la validità degli strumenti teorici utilizzati, tra cui va ricordata l'analogia elettrica (teoria in grado di fornire un valore equivalente di permeabilità di un qualunque stratificato e una relazione temporale per la previsione dei tempi di impregnazione dei processi di infusione).

Bibliografia

- [1] Marco Method, US Patent No. 24956240, 24 January 1950
- [2] Group Lotus Cae Ltd. "Vacuum Moulding Patent" GB Patent No.1432333, 30 March 1972
- [3] Gotch, T.M. "Improved Production Process For Manufacture of GRP on British Rail", Reinforced Plastics Conference, BPF RPG, Brighton, November 1980, Paper 7, pp2531
- [4] Gotch, T.M. "Development and Potential of Vacuum Impregnation Techniques for GPR Manufacture", I 2th Reinforced Plastics Congress, BTF RPG, Brighton November 1980 Paper 7, pp 25-31
- [5] Gotch, T.M. "Low Investment Alternatives to Hand Lay GRP Production". Hands Off GRP 11 Conf., Plastics and Rubber Institute, May 1985 pp. 1/1-1/11
- [6] Allen, R., Best P.F. and Short, D. "Vacuum Injection Moulding of High Volume Fraction Fiber Composites", I 3th Reinforced Plastics Congress, BPF RPG Brighton November 1982, Paper 49 pp207-209
- [7] Le Comte, A. "Method and apparatus for producing a thin waile article of syntetic resin, in particular a large size veicle", US Patent No. 4359437, 16 November 1982
- [8] Editorial," Injection Moulding for Large Craft", Ship and Boat Internation, January/February 1986, pp. 43-44
- [9] Tengier, H. Vakuum-Injektionsverfahren, 1. Kunststoffe 1985, 75(2), 73-72
- [10] Adams, A.A. and Roberts, J.H. „A General Outline of the Main Characteristics and Prime Uses of Vacuum Injection Moulding System", Ha ds Off GRP LI Conf. Plastics and Rubber Institute , May 19, pp 5/1-5/3
- [11] Editorial, 30 Yeais experiences of composite cars at Lotus, Reinforced Plastics 35 (2), 34-37
- [12] Ciba-Geigy, Piblication, Vacuum Injection Process Ciba -Geigy Aileron Publication No.28626/d,f, e 880 729/40 (Printed Switzerland)
- [13] Hayward, J.S. and Harris, B. Processing factors affecting the quality of resin transfer moulded composites, Plastics & Rubber Proccsing & Applications, 1989, 11(4), 191-198
- [14] Hayward, J.S and Harris, B. The effect of the vacuum assistance in resin transfer moulding, Composites Manufacturing 1990, 1(3), 161-166.
- [16] Boey, F.Y.C. Reducing the void content and its variabiliy in polimeric fiber reinforced composites test speciment using a vacuum injection moulding process, Polymer Testing 1990 , 9, 363-377.
- [17] Hudson A. Taking control of styrene emission.Comp Technol 1996; (September/October): 32.
- [18] South Coast Air Quality Management District Rule Developement Division. Proposed Rule 1162-Polyester Resin Operations, 23 January 1987
- [19] Ashbee K. Fiber reinforced composites Lancaster P.A.: Technomic Publishing company 1989.
- [20] Hudson A. Vacuum Assisted RTM increasingly popular. Comp. Technol 1996; (March/April): 24.
- [21] Seeman, W.H. "Vacuum-forming method and apparatus for vacuum forming fiber reinforced composites", European Patent Applications No. EP 0525263A1, filed 1 August 1991

- [22] Seeman, W.H. "Vacuum-forming method and apparatus for vacuum forming fiber reinforced composites", UK Patent application No GB 2257938A, filed 25 July 1991
- [23] Seeman, W.H. "Plastic transfer moulding techniques for the production fiberreinforced structures", US patent No 4902215, filed 30 March 1989
- [24] Modini ,G. Infusione sottovuoto per scafi . Materie plastiche ed elastomeri. NAUTICA.
- [25] Johnson C.F. Resin Transfer Moulding. In: Mallik P.K., Newmann S., Editors. Composites Materials technology-processes and properties, New York: Hanser Publishers, 1990
- [26] Lee , Gucery, S. Liquid composite moulding. In: Gutowsky T. Editors. Engineering analysis of composites manufacturing, Cambridge, M.A. : MIT Press, 1995.
- [27] Mallik P.K., Newmann S. Composites Materials technology New York: Hanser Publishers, 1990.
- [28] Young WB, Rupel K, Han K, Lee LJ, Liou MJ. Analysis of resin injection moulding in molds with preplaced fiber mats. II Numerical simulation and experiments of mold filling. Polym Comp 1991;12(1): 30
- [29] Lin R, Lee L.J. , Liou M. No-isothermal mold filling and curing simulations in thin cavities with preplaced fiber mats. Int Polym Process VI 1991; 40:356
- [30] Trevino L, Rupel K, Young WB, Liou MJ, Lee LJ. Analysis of resin injection moulding in moulds with preplaced fiber mats.I. Permeability and compressibility measurements. Polym Comp 1991;12:30
- [31] ari MJ,Imbert -, Lin MY, Lavine AS, HahmHT. Analysis of resin transfer moulding with high permeability layers. Trans. Of the ASME, J. Manufact Sci Eng. 1998; 120(3):609-16
- [32] Han K, Lee LJ, Liou MJ, Fiber mat deformations in liquid composite moulding. Modelling. Polym Comp 1993;14(2):144
- [33] Han K, Wu CK, Lee LJ, Characterization and simulations of resin transfer moulding-race tracking and dry spot formation, SDM/AMS Conference, Detroit, 11-20 November 1993
- [34] Beawers GS, Joseph D. Boundary conditions at naturally permeable wall. J. Fluid Mech 1967;30 (1) :197-207
- [35] Sun X, Li S, Lee LJ. Mould filling analysis in vacuum-assisted resin transfer moulding. Part II: SCRIMP based on grooves. Polym Comp 1998;19 (6)
- [36] Ni J, Li S, Sun X, Lee LJ. Mold Filling analysis in vacuum –assisted resin transfer moulding. Part I:SCRIMP based on a high – permeable medium. Polym Comp 1998; 19(6)
- [37] Marsh ,G. Putting SCRIMP in context. Reinforced plastic. Jenuary 1997 . pp22-26
- [38] Lazarus, P. Infusion, Professional Boat Builder 1994,30,42,55
- [39] Pfund, B. Resin Infusion in the US marine industry, Reinforced Plastics December 1994,32,34
- [40] Seeman, W. "Unitary vacuum bag and process for making the same", World Patent No. W094/2078, filed 7 February 1994
- [41] Seeman, W. "Unitary vacuum bag for forming fiber reinforced composite articles" US Patent No.531646, filed 18February 1993
- [42] Semibi, S., Klang, E.C. , Sadier, R. L. Avva, V.S. "Resin transfer moulding (RTM) Experiment with Vacuum Assisted Methods", Proceedings of the Ninth

- International Conference on Composite Materials (ICCM/9), Madrid, 12 –16 July 1993, Vol. Iii,pp.529 –544
- [43] Barnes, F. “Composites Reinforcement of Steel Structural Members”, Proceedings of Institute of Mechanical Engineers seminar, London, 17 November 1994,pp.5
- [44] Barnes, F. “Composites Reinforcement of Steel Structural Members”, SAMPE UK Club Presentation , 25 November 1994
- [45] Barnes, F. And Galbraith, D. “The Development of Process Methods for in –situ Composite Reinforcement of existing steel structures”, Proceedings of the 16th International SAMPE Conference, Salzburg, 30 May – I June 1995, pp. 293 – 304
- [46] Lazarus, P. Infusion, Professional Boat Builder 1995, 31, 28 – 34
- [47] Paddle Lite, Martin Tooling & Laminates Inc. RR 2 Box 106, Freeport, ME 04032 USA
- [48] Quick Draw VARTM, Sunrez Corp/SCS, 392 Coogan Way, El Cajon, CA 92020, USA
- [49] Resin Injection Re – circulation Method (RIRM), Structural Composites Inc. , 7705 technology Dr., West Melbourne. Florida USA
- [50] Griffin, P.R. and Grove, S. M. Measurement of Permeability of the fiber reinforcement – a review (in preparation).
- [51] Advani, S.G. and Brusckke, M. V. Resin Transfer Moulding Phenomena in Polymer Composities, in “Flow & Rheology in Polymer Composities Manufacturing”, Chapt. 12, Elsevier, Amsterdam, 1994, pp.465 – 515
- [52] Summerscales, J. A model for the effect of fiber clustering on the flow rate in the resin transfer moulding, Composities Manufacturing 1993,4 (1), 27-31
- [53] Summerscales, J., Griffin, p. R., Grave, S. M. and Guild, F. J. Quantitative microstructural examination of RTM fabrics designad for enhanced flow, Composite Structures 1995, 32 (1 – 4), 519 – 529
- [54] Judd, N.C. and Wright, W.W. Voids and their effects or the machanical properties of composites – an appraisal 1, SAMPE J: January/February 1978, 10 – 14
- [55] Guid, F.J.and Summerscales, J. Microstructural image analysis applied to fibre composite materials – a review, Composites 1993 24 (5), 383-394
- [56] Basford, D.M., Griffin, Pr., Grave, S.M. and Summerscales, J. Research report: the relationship between mechanical performance and microstructure in composite fabricated with flow enhancing fibres, Composites 1995, 26 (9), 675 – 679
- [57] H. Darcy. 1856. Les Fontaines Publique de la Ville de Dijon. Paris: Dalmont.
- [58] Tucker CL, III. Governing equations for resin transfer molding. In: Advani SG, editor. Flow and rheology in polymer composites manufacturing. New York: Elsevier Science, 1994.
- [59] Tucker III CL. Fundamentals of computer modelling for polymer processing, Munich: Hanser Publishers, 1989.
- [60] William JG, Morris CEM, Ennis BC. Liquid Flow through aligned fiber beds. Polym Engng Sci 1974;14(6):413.
- [61] Carman P. C.. Fluid Flow Through Granular Beds, Transactions of the Institute of Chemical Engineers 1, 1937, 150 – 166.
- [62] Carman P. C.. Some Physical Aspects of Water Flow in Porous Media, Discussions of the Faraday Society (3), 1948, 72 – 77.

- [63] Dullien F. A. L.. Porous Media–Fluid Transport and Pore Structure, 2nd edn, Academic Press, California, 1992.
- [64] P. C. Carman. 1937. Fluid Flow through Granular Beds, *Trans. Int. Chem. Eng.*, 15:150 – 166.
- [65] Sullivan R. R. and Hertel K. L.. The Flow of Air through Porous Media, *Journal of Applied Physics* 11, 1940, 761 – 765.
- [66] Gutowski T. G., Cai Z., Bauer S., Bouche D., Kingery J. and Wineman S.. Consolidation Experiments for Laminate Composites, *Journal of Composite Materials* 21, 1987, 650 – 669.
- [67] Adams K. L., Miller B. and Rebenfeld L.. Forced In–Plane Flow of an Epoxy Resin in Fibrous Networks. *Polymer Engineering and Science* 26(20), 1986, 1434 – 1441.
- [68] Batch G. L., Chen Y. T. and Macosko C. W.. Capillary Impregnation of Aligned Fibrous Beds: Experiments and Model, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 15, 1996, 1027 – 1051.
- [69] Lam R. C. and Kardos J. L.. The Permeability and Compressibility of Aligned and Crossplied Carbon Fiber Beds During Processing of Composites, *Polymer Engineering and Science* 31, 1991, 1064.
- [70] Dullien F. A. L.. Porous Media–Fluid Transport and Pore Structure, 2nd edn, Academic Press, California, 1992.
- [71] Gauvin G., Kerachni A. and Fisa B.. Compaction and Permeability of Multilayers of Mats, ANTEC 1993, pp. 841 – 843.
- [72] Batch G. L. and Cumiskey S.. Multilayer Compaction and Flow in Composites Processing, 45th Annual Conference, Composites Institute, 1990.
- [73] Kim Y. R., McCarthy S. P. and Fanucci J. P.. Compressibility and Relaxation of Fiber Reinforcements During Composite Processing, SPE Annual Technical Conference, 1990, 1252 – 1256.
- [74] Gutowski T. G.. A Resin Flow/Fiber Deformation Model for Composites, SAMPE Quarterly, 1985, 58.
- [75] Gutowski T. G., T. Morigaki and Z. Cai. The Consolidation of Laminate Composites, *The Journal of Composite Materials*, 21:172 – 188 (1987).
- [76] J. G. Williams, C. E. M. Morris and B. C. Ennis. 1974. Liquid Flow through Aligned Fiber Beds, *Polymer Engineering and Science*, 14:413 – 419.
- [77] Gutowski TG, Morigaki T, Cai Z. The Consolidation of Laminate Composites. *J Compos Mater* 1987;21:172–88.
- [78] Sozer EM, Chen B, Graham PJ, Chou T-W, Advani SG. Characterization and Prediction of Compaction Force and Preform Permeability of Woven Fabrics During The Resin Transfer Molding Process. *Proceedings of The Fifth International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, 25–36, Plymouth, U.K., 12–14 July 1999.
- [79] Chen B, Chou T-W. Compaction of Woven-Fabric Preforms in Liquid Composite Molding Processes: Single-Layer Deformation. *Compos Sci Technol* 1999;59:1519–26.
- [80] Chen B, Cheng AH-D, Chou T-W. A Nonlinear Compaction Model for Fibrous Preforms. *Compos Part A: Appl Sci Manufact* 2001;32: 701–7.
- [81] Baoxing C, Eric J. L, Tsu-Wei C. Experimental and Theoretical Studies of Fabric Compaction Behavior In Resin Transfer Molding. *Materials Science And Engineering A*, 317, 1–2, 31 October 2001 pp. 188–96.

- [82] Robitaille F, Gauvin R. Compaction Of Textile Reinforcements for Composites Manufacturing I: Review Of Experimental Results. *Polym Compos* 1998;19(2):198–216.
- [83] Saunders RA, Lekakou C, Badermg. Compression in The Processing of Polymer Composites. 1. A Mechanical And Microstructural Study of Different glass Fabrics and resins. *Compos Sci Technol* 1999;59:983–93.
- [84] Luo Y, Verpoest I. Compressibility and Relaxation of a New Sandwich Textile Preform For Liquid Composite Molding. *Polym Compos* 1999; 20(2):179–91.
- [85] Van Wyk CM. Note on The Compressibility of Wool. *J Textile Inst* 1946;37:285–92.
- [86] Sozer EM, Chen B, Graham PJ, Chou T-W, Advani SG. Characterization and Prediction of Compaction Force and Preform Permeability of Woven Fabrics During The Resin Transfer Molding Process. *Proceedings of The Fifth International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, 25–36, Plymouth, U.K., 12–14 July 1999.
- [87] Chen B, Chou T-W. Compaction of Woven-Fabric Preforms in Liquid Composite Molding Processes: Single-Layer Deformation. *Compos Sci Technol* 1999;59:1519–26.
- [88] Chen B, Cheng AH-D, Chou T-W. A Nonlinear Compaction Model for Fibrous Preforms. *Compos Part A: Appl Sci Manufact* 2001;32: 701–7.
- [89] Baoxing C, Eric J. L, Tsu-Wei C. Experimental and Theoretical Studies of Fabric Compaction Behavior In Resin Transfer Molding. *Materials Science And Engineering A*, 317, 1–2, 31 October 2001 pp. 188–96.
- [90] Gutowski TG, Cai Z, Kingery J, Wineman SJ. Resin Flow/Fiber Deformation Experiments. *Sampe Q* 1986;17(4):54–8.
- [91] Gutowski T. G.. A Resin Flow/Fiber Deformation Model for Composites, *SAMPE Quarterly*, 1985, 58.
- [92] Songani and Yao, Transport process in random arrays of cylinders, *II Viscous Flow* , 1998,31 (9), 2433 – 2444.
- [93] Bruscke M.V. A predictive model for permeability and non isothermal flow of viscous and shear-thinning fluids in an isotropic fibrous media. PhD Dissertation, University of Delaware, 1992.
- [94] Chan A W , Morgan RJ. Sequential multiple port injection for resin transfer moulding of polymer composites,. *SAMPE Quarterly*; 1992 October: 45 –9
- [95] Chan AW, Morgan RJ. Tow impregnation during resin transfer moulding of bi – directional non woven fabrics. *Polymer Composites* 1993; 14(4): 335 – 40
- [96] Shih C-H, L. J. Lee Effect of fiber architecture on permeability in liquid composite moulding. *Polymer Composites* 1998; 19(5):626-39.
- [97] Patel N, Rohatgi V, Lee LJ. Microscale flow behaviour and void formation mechanics during impregnation through a unidirectional stitched fibreglass mat. *Polym Engng Sci* 1995;35(10):837–51.
- [98] Ludstrom TS. Void Formation and Transport in RTM. Technical Report, Swedish Institute of Composites; 1993.
- [99] Peterson RC, Robertson RE. Mechanism affecting void distribution and elimination in resin transfer molding. In *Proceedings of the Eighth Advanced Composites Conference*, Chicago, Illinois, USA; 1992. p. 2–5.
- [100] R. S. Parnas, A. J. Salem, T. A. K. Sadiq, H. P. Wang and S. G. Advani. *Compos. Structures*, 27, 93 (1994).
- [101] R. S. Parnas and F. R. Phelan. *SAMPE Q.*, 22, 53 (1991).

- [102] J. Chen, D. Backes and K. Jayaraman. In Report on the Workshop on Manufacturing Polymer Composites by Liquid Molding, p. 192. R. S. Parnas, A. J. Salem, K. N. Kendall and M. V. Brusckke. eds., National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5373 (1994).
- [103] J. Happel and H. Brenner, Low Reynolds Number Hydrodynamics, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1983).
- [104] K. L. Adams and L. Rebenfeld. Textile Res. J., 57, 647 (1987).
- [105] K. L. Adams, B. Miller and L. Rebenfeld. Polym. Eng. Sci., 26, 1434 (1986).
- [106] C. A. Fracchia, MS thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign (1990).
- [107] J. G. Williams, C. E. M. Morris and B. C. Ennis. Polym. Eng. Sci. 14, 413 (1974).
- [108] J. A. Molnar, L. Trevino and L. J. Lee. 44th Ann. Conference, Composites Institute, The Society of Plastics Industry Inc., Session 20-A, pp. 1 – 10 (1989).
- [109] L. Trevino, K. Rupel, W. B. Young, M. J. Liou and L. J. Lee. Polym. Compos. 12, 20 (1991).
- [110] G. Q. Martin and J. S. Son, in Proc. ASM / ESD Second Conference on Advanced Composites, ASM International, Materials Park, Ohio (1986).
- [111] Pamas RS, Salem AJ, Sadiq TA, Wang HP, Advani SG. Interaction between micro and macroscopic flow in RTM preforms. Composite Structures 1994; 27 (1/2): 93-107.
- [112] Pamas RS, Phelan Jr. FR. The effect of heterogeneous porous media on mold filling in RTM. Sampe Quarterly 1991; January:53-60.
- [113] Lundstrom TS, Geban BR. Influence from different process parameters on void formation in RTM. Polymer Composites 1993; 15:25-33
- [114] Patel N, Lee U. Effects of fiber mat architecture :on void formation and removal in liquid composite moulding. Polymer Composites 1995; 16:386-99
- [115] Papathanasiou TD. A structure orientated micromechanical model for viscous flow through square arrays of fibres. Composites Science and Technology 1996;56:1055-69
- [116] Binétruy C, Hilaire B., Pabiot J. The interactions between flows occurring inside and outside fabric tows during RTM. Composite Science and Technology 1997;57:587-96
- [117] Gebart BR. Permeability of unidirectional reinforcements for RTM. Journal of Composite Materials 1992;26:1100-33
- [118] Phelan Jr FR, Spaid MAA. Modeling of unsaturated flow dynamics in composite processing. Fifth International Conference on Automated Composites. Glasgow. UK,1997
- [119] Kolodziej JA, Dziecilak R, Konczak Z. Permeability tensor for heterogeneous porous medium of fibre type. Transport in Porous Media 1998;32:1-99
- [120] Beavers GS, Sparow EM, Magnuson RA. Experiments on coupled parallel flows in a channel and a bounding porous medium. Journal of Basic Engineering, 92D 1970:843-8
- [121] Gupte SK, Advani SG. Flow near a permeable boundary of an aligned fiber preform: An experimental investigation using laser Doppler anemometry. Polymer Composites 1997; 18(1):114-24
- [122] Sadiq T., Advani S., Parnas R., Experimental investigation of transverse flow through aligned cylinders. International Journal of Multiphase Flow 1995;21(5):755-74.
- [123] Larson RE, Higdon JLL. Microscopic flow near the surface of two-dimensional porous media. Journal of Fluid Mechanics 1986;166:449-72.

- [124] Parnas RS, Salem AJ, SadiqTAK, Wang H-P, Advani SG. The inter – action between micro and macroscopic flow in RTM preforms. *Composite Structures* 1994;27:93-107.
- [125] Skartsis L., Khomarni B., Kardos JL. A semi analytical one dimensional model for viscoelastic impregnation of fibrous media. *Journal of Advanced Materials* 1994;25(3):38-44.
- [126] Cai Z. Analysis of the non-viscous flow effect in liquid moulding process. *Journal of Composite Materials* 1995;29(2):257-78.
- [127] Lekakou C., Bader MG. Mathematical modelling of macro and micro infiltration in resin transfer moulding (RTM). *Composites:.. Part A* 1998; 29A:29-37.
- [128] Steenkarner DA, Wilkins DJ, Karbhari VM. Influence of test fluid on fabric permeability measurements and implications for processing of liquid moulded composites. *Journal of Materials Science Letters* 1993;12-971-3.
- [129] Griffin PR, Grove SM, Russel P, Short D, Summerscales J, Guild FJ, Taylor E. The Effect of reinforcement architecture on the long-range flow in fibrous reinforcements. *Composites Manufacturing* 1995;6:221-35.
- [130] Molnar JA, Trevino L, Lee U. Liquid flow in moulds with prelocated fibre mats. *Polymer Composites* 1989; 10(6):414-23.
- [131] Patel N., Rohatgi V., Lee U. Micro-scale flow behaviour and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fibreglass mat. *Polymer Engineering and Science* 1995; 35(10):837-51.1
- [132] Van der Marck SC, Matsuura T., Glas J. Viscous and capillary pressures during drainage: Network simulations and experiments. *Physical Review E* 1997; 56(5):5675-87.
- [133] Constantinides GN. Payatakes AC. Network simulation of steady – state two-phase flow in consolidated porous media. *The American Institute of Chemical Engineers Journal* 1996;42 (2):369-82.
- [134] Lin C-Y, Slattery JC. Three-dimensional, randomised, network model for two-phase flow through porous media. *The American Institute of Chemical Engineers Journal* 1982; 28 (2):311-24.
- [135] Rudd C D, Long A.C., Kendall K.N., Mangin C-G.E., *Liquid moulding technologies. 1997: Woodhead Publishing Limited.*
- [136] Parnas R.S., Howard J.G., Luce T.L., Advani S.G. Permeability characterization. Part I: A Proposed standard reference fabric for permeability. *Polymer Composites*, 1995.16:p.429-445.
- [137] Diallo M.L., Gauvin R., Trough F. Key factors affecting the permeability measurement in continuous fibre reinforcements in ICCM-II 1997.
- [138] Lekakou C., Johari M.A.K., Norman D., Bader M.G., Measurement techniques and effects on in plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding. *Composites: Part A*, 1996.27 A: p.401-408.
- [139] Ahn S.H., Lee W. I., Springer G.S., Measurements of the Three Dimensional Permeability of Fibre Preforms Using embedded Fibre Optic Sensors. *Journal of Composite Materials*, 1995.29 (6):p. 714-733.
- [140] Gebart B.R., Lidstrom P. Measurement of in plane permeability of anisotropic fiber reinforcements. *Polymer Composites*, 1996.17 (1):p.43-51.
- [141] Bates P. J., Taylor D. and Gunningham M. F.. Compaction and Transverse Permeability of Glass Roving, *Applied Composite Materials* 8, 2001, 136 – 178.
- [142] Von Horten, K. Production by RTM, in composites materials in maritime structure. Chapter 4, ed R.A. Svenai Cambridge University, 1993, pp. 86-126.

- [143] Brinkaman, H.C., A calculation of the viscous force in a flowing fluid on a dense swarm of particles. *Applied Science Research*, 1947. pp.27-34.
- [144] Happel, J., Vscous flow relative to arrays of cilinders. *A.I.Ch.E. Journal*, 1959.pp. 174-177.
- [145] Sparrow, E.M., Loeffler, A.L., Longitudinal laminar flow between cylinders arranged in regular array. *A.I.Ch.E. journal*, 1959. 5(3): pp.325-330.
- [146] Speilman, L., Goren, S.L., Model for predicting pressure drop and filtration efficiency in fibrous media. *Enviromental Science and Techology*, 1968.3: pp. 279-287 .
- [147] Lundgren, T.S., Slow flow through stationary random beds and suspension of spheres. *Journal of fluid mechanics*, 1971. 51 : pp. 273-299.
- [148] Drummond, J.E., Tahir,M.I., Laminar viscous flow through regular arrays of parallel solid cylinders. *International Journal of Multiphase Flow*, 1984. 10(5): pp. 515-540.
- [149] Gebart, B.R., Permeability of unidirectional reinforcements for RTM. *Journal of Composite Materials*, 1992.26: pp. 1100-1133 .
- [150] Lundstrom,T.S., Gebart,B.R., Effect of pertubation of fibre architecture on permeability inside fibre tows. *Journal of composite materials*, 1995.29 . pp. 424-443.
- [151] Higdon,J.J.L., Ford, G.D., Permeabilityof three-dimensional models of fibrous porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996.308: pp.341-361.
- [152] Howells, I.D., Drag on fixed beds of fibres in slow flow . *Journal of Fluid Mechanics*, 1998.355 : pp. 163-192.
- [153] Rohatgi, V., Patel, N., James, L., Experimental investigation of flow induced micro voids during impregnation of unidirectional stiched fibre glass mat . *Polimer Composites* 1996, 17(2): pp.161-170.
- [154] Chen, Y.F., Stelson K.A., Voller V.R., Prediction of filling time and vent locations for resin transfer mould. *Journal of Composite Materials* 1997 , 31(11):1141-61.
- [155] Bickert S., Sozer EM, Simacek P., Graham P., Advani SG. Fabric structure and mould curvature effects on preform permeability and mould filling in the RTM process, part I: experiments. *Composites A: Applied Science and Manufacturing* 200:4 (31): 423-38.
- [156] Long AC , Rudd CD. Simulation of reinforcement deformation during the production of preforms for liquid moulding processes. *Proceedings of the Institution of Mechani al Engineers B: Journal of Engineering Manufacture* 1994; 208 (4): 269-78
- [157] Tbirion JM, Girardy H, Waldvogel U. New developments in resin transfer moulding of high-performance compisite parts *Materials information translations service series C: engineered materials. Composites (Paris)* 1988; 28 (3):81-4.
- [158] Griffin PR, Grove SM, Russel P, Short D. Guild FJ, Taylor E. The effect of reinforcement architecture on the long range flow in fibrous reinforcements. *Composites Manufacturing*1995;6 (3/4): 221-35.
- [159] Griffin PR, Grove SM, Guild FJ. Russel P. Summerscales J. The effect of microstructure on flow promotion in RTM reinforcement fabrics. *Journal of Microscopy* 1995; 177 (3): 207-17.
- [160] Guild FJ, Pearce NRL, Griffin PR. Summerscales J. Optimisation of reinforcement fabrics for the resin transfer moulding of high fibre volume

- fraction composites. Proceedings of the Seventh European Conference Composite Materials, London, 14-16 May 1996, p. 273-8.
- [161] Pearce NRL. Griffin PR, Summerscales J, Guild FJ. Optimisation of reinforcement fabrics for the resin transfer moulding of high fibre volume fraction composites. Proceedings of the 17th International Conference, SAMPE European Otapter. Basel CH, 28-30 May 1996, p. 225-36
- [162] Guild FJ. Davy PJ. Hogg PJ. A model for unidirectional composites in longitudinal tension and compression. *Composites Science and Technology* 1989; 36 8(1): 7-26
- [163] Basford m. Griffin PR. Grove SM. Summerscales J. Research report: relationship between mechanical performance and microstructure in composites fabricated with flow-enhancing fabrics. *Composites* 1995; 26 (9):615-9
- [164] Summerscales J. Green d, Guild FJ. Effect of processing dwell-time on the microstructure of a fibre-reinforced composite. *Journal of Microscopy* 1993; 169 (2):73-82.
- [165] Pearce NRL. Guild FJ, Summerscales J. An investigation into the effects of fabric architecture on the processing and properties of fibre reinforced composites produced by RTM - *Composites Part A* 1998; 29A (1/2):19-27.
- [166] Pearce NRL. Guild FJ, Summerscales J. A study of the effects of convergent flow front on the properties of fibre-reinforced composites produced by RTM - *Composites Part A*
- [167] Pearce NRL, Summerscales J. Guild FJ - The use of automated image analysis for the investigation of fabric architecture on the processing and properties of fibre-reinforced composites produced by RTM. *Composites Part A* 1998; 29A (7):829-37
- [168] Pearce NRL. Summerscales J., Guild FJ - The modification of fabric architecture to improve the processing of continuous fibre reinforcement composites manufactured by RTM. Seventh International Conference on Fibre-Reinforced Composites (FRC '98), University of Newcastle upon Tyne, 15-17 April 1998, verbal presentation only.
- [169] Pearce NRL. Guild FJ, Summerscales J - The effect of flow-enhancement flows on the mechanical properties of composites produced by the RTM process. Fifth International Conference on Deformation: Fracture of Composites, Institute of Materials, London 18-19 May 1999, p. 101-10.
- [170] Curtis P. CRAG test methods for the measurement of the engineering properties of fibre reinforced plastics. Royal Aero-space Establishment Technical Report 88012, Farnborough, February 1988.
- [171] Lundstrom, Void formation in RTM. In proceedings of SPI Composite Institute 47th Annual Conference, 1992, New York
- [172] S. and C. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fibre reinforced plastics, 1975, 8 (3), pp. 137-145
- [173] Curtis. CRAG test methods for the determination of the engineering properties of fibre reinforced plastics. Royal Aerospace Establishment Technical Report, 88012, February, 1988.
- [174] Bickerton S, Sozer EM, Simacek P, Advani SG. Fabric Structure and Mold Curvature Effects on Preform Permeability and Mold Filling in the RTM Process. Part II. Predictions and Comparisons with Experiments. *Composites, Part A* 2000; 31:439 – 58.

- [175] Smith P, Rudd CD, Long AC. The effect of shear deformation on the processing and mechanical properties of aligned reinforcements. *Compos Sci Technol* 1997;57:327–44.
- [176] Lai CL, Young WB. Model resin Permeation of fibre reinforcements after shear deformation. *Polym Compos* 1997;18(5):642–8.
- [177] Slade J, Sozer EM, Advani SG. Fluid Impregnation of Deformed Preforms. *J Reinf Plast Compos* 2000;19(7):552 – 68.
- [178] Heardman E, Lekakou C, Bader MG. In-plane permeability of sheared fabrics. *Composites, Part A* 2001;32:933–40.
- [179] Belov EB, Lomov SV, Verpoest I, Peters T, Roose D, Hoes K, Sol H, Parnas RS. Modelling of permeability of textile reinforcements: Lattice Boltzmann method. IN: *Proceedings of the 10th European Conference on Composite Materials*. Brugge; 2002.
- [180] Berker B, Sun JQ. Permeability estimation in resin transfer molding. *J Mater Process Manfact Sci* 1998;6:205–11.
- [181] Simacek P, Advani SG. Permeability estimation in resin transfer molding. *J Mater Process Manfact Sci* 1998;6:205–11.
- [182] Long AC, Souter BJ, Robitaille F. Mechanical modeling of in-plane shear and draping for woven and non crimp fabrics. *J thermoplast Compos Mater* 2001;14(4):316–26.
- [183] Potter KD. The influence of accurate stretch data for reinforcements on the production of complex structural mouldings. Part 1: deformation of aligned sheets and fabrics. *Composites* 1979;10(3):161–7.
- [184] Basset RJ, Postle R. Fabric mechanical and physical properties. *Int J Clothing Sci Technol* 1990;2(1):26–31.
- [185] Van der Weeën F. Algorithms for draping fabrics on doubly curved surfaces. *Int J Numer Methods Engng* 1991;31:1415–26.
- [186] Long AC, Rudd CD. A Simulation of Reinforcement Deformation During the Production of Preforms for liquid moulding processes. *Proc Inst Mech Engineers, Part B: J Engng Manufact* 1994;208(B4):269 – 78.
- [187] Breen DE, House DH, Wozny MJ. A Particle-based Model for Simulating the Draping Behaviour of Woven Cloth. *Textile Res J* 1994; 64(1):663 – 85.
- [188] Shanahan WJ, Lloid DW, Hearle JWS. Characterizing the Elastic Behaviour of Textile Fabrics in Complex Deformations. *Textile Res J* 1978; 48(9):495 – 505.
- [189] Collier JR, Collier BJ, O’Toole G, Sargand SM. Drape Prediction by Means of Finite-Element Analysis. *J Textile Inst* 1991; 82(1):96 – 107.
- [190] Kang TJ, Yu WR. Drape Simulation of Woven Fabric by Using the Finite-Element Method. *J Textile Inst* 1995; 86(4):635 – 48.
- [191] Lloyd DW. The analysis of complex fabric deformations. In: *Mechanics of flexible fibre assemblies*, Alphen: Sijthoff and Noordhoff;1980.
- [192] A. Endruweit and P. Ermanni. The In-Plane Permeability of Sheared Textiles. Experimental Observations and a Predictive Conversion Model; Centre of Structure Technologies, Switzerland. *Composites: Paart A* 35 (2004) 439 – 451.
- [193] Adams KL, Russel WB, Rebenfeld L. Radial penetration of a viscous liquid into a planar anisotropic porous medium. *Int J Multiphase Flow* 1988;14(2):203–15.
- [194] Chan AW, Hwang ST. Anisotropic in-plane permeability of fabris media. *Polym Engng Sci* 1991;31(6):1233–9.
- [195] Lundström TS, Stenberg R, Bergström R, Partanen H, Birkeland PA. In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study. *Composites, Part A* 2000;31:29–43.

- [196] Luo Y, Verpoest I, Hoes K, Vanheule M, Sol H, Cardon A. Permeability measurement of textile reinforcement with several test fluids. *Composites, Part A* 2001;32:1497–504.
- [197] M. V. Brushke. A Predictive Model for Permeability and Non-Isothermal Flow of Viscous and Shear-Thinning Fluids in Anisotropic Fibrous Media. PhD Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, 1992.
- [198] K. L. Adams and L. Rebenfeld. Permeability Characteristics of Multilayer Fiber Reinforcements: I. Experimental Observations. *Polym. Comp.*, 12 (1991) 179 – 185.
- [199] M. V. Brushke, T. L. Luce and S. G. Advani. Effective In-Plane Permeability of Multi-Layered RTM performs. *Proc. 7th Tech. Conf. on Composites Materials*, American Society for Composites, 1992, pp. 103-12.
- [200] T. L. Luce, S. G. Advani, J. G. Howard and R. S. Parnas. Permeability Characterization: 2. Flow Behaviour in Multiple-Layer Preforms. *Polym. Comp.* 16 (1996) 446 – 458.
- [201] R. S. Parnas, J. G. Howard, T. L. Luce and S. G. Advani. Permeability Characterization: I. A Proposed Standard Reference Material for Permeability. *Polym. Comp.* 16 (1996) 429 – 445.
- [202] T. A. K. Sadiq, S. G. Advani and R. S. Parnas. Experimental Investigation of Transverse Flow Through Aligned Cylinders. *Int. J. Multiphase Flow*, 21 (1995) 755 – 774.
- [203] K. L. Adams and L. Rebenfeld. Permeability Characteristics of Multilayer Fiber Reinforcements: II. Theoretical Model. *Polym. Comp.*, 12 (1991) 186 – 190.
- [204] M. V. Brushke and S. G. Advani. Flow of Generalized Newtonian Fluids Across a Periodic Array of Cylinders. *J. Rheol.*, 37 (1993) 479 – 498.
- [205] Veronica M. A. Calado & Suresh G. Advani. Effective Average Permeability of Multy-Layer Preforms in Resin Transfer Molding, Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, Newark, Delaware 1996. *Composites Science and Technology* 56 (1996) 519 – 531.
- [206] Kerang Han, Shunliang Jiang, Chuck Zhang and Ben Wang. Flow Modelling and Simulation of SCRIMP for Composites Manufacturing. University of Dayton Research Institute, Dayton, USA. Department of Industrial Engineering, Florida, USA. 1999. *Composites: Part A* 31 (2000) 79 – 86.
- [207] P. Lindstöm. SICOMP Technical Report 92-013, Swedish Institute of Composites (1992).
- [208] R. S. Parnas and A. J. Salem. *Polym. Compos.*, 14, 383 (1993).
- [209] K. L. Adams, B. Miller and L. Rebenfeld. Forced In-Plane Flow of an Epoxy Resin in Fibrous Networks. *Polymer Engineering and Science* 1986;26(20):1434 – 1441.
- [210] E. J. Carter, A. W. Fell and J. Summerscale. A Simplified Model to Calculate the Permeability Tensor
- [211] A. W. Chan and S-T Hwang. Anisotropic In-Plane Permeability of Fabric Media. *Polymer Engineering and Science* 1991;31(16):1233 – 1239.
- [212] D. E. Hirt, K. L. Adams, R. K. Prud'Homme and L. Rebenfeld. In-Plane Radial Fluid Flow Characterization of Fibrous Materials. *Journal of Thermal Insulation* 1987;10:153 – 172.
- [213] R. S. Parnas and A. J. Salem. A Comparison of the Unidirectional and Radial In-Plane Flow of Fluids Through Woven Composite Reinforcements. *Polymer Composites* 1993;14(5): 383 – 394.

-
- [214] C. D. Rudd, D. J. Morris, J. P. Chick and N. A. Warrior. Material Characterization for SRIM, 4th International Conference on Automated Composites (ICAC '95), Nottingham, UK, Vol. 1, 1995, p. 211 – 218.
- [215] J. R. Weitzenböck, R. A. Shenoi, P.A. Wilson. Radial Flow Permeability Measurement. Part A: Theory, 30 (1999) 781 – 796. Department of Ship Science, University Southampton, Highfield, Southampton.
- [216] K. L. Adams and L. Rebenfeld. Polym. Compos., 12, 179 (1991).
- [217] K. L. Adams and L. Rebenfeld. Polym. Compos., 12, 186 (1991).
- [218] R. C. Lam and J. L. Kardos. Polym. Eng. Sci., 31, 1064 (1991).
- [219] R. S. Parnas and Y. Cohen. Chem. Eng. Comm., 53, 3 (1987).
- [220] J. C. Slattery. AIChE J., 15, 866 (1969)
- [221] Y. R. Kim, S. P. McCarthy, J. P. Fanucci, S. C. Nolet and C. Koppernaes, SAMPE Q. 22, 16 (1991).
- [222] Hoes K, Dinescu D, Sol H, Vanheule M, Parnas RS, Luo Y, Verpoest I. New Set-Up for Measurement of Permeability Properties of Fibrous Reinforcements for RTM. Composites Part A 2002; 33(7):959–69.
- [223] Adams KL, Miller B, Rebenfeld L. Forced In-Plane Flow of An Epoxy Resin In Fibrous Networks. Polym Eng Sci 1986;26(20):1434–41.
- [224] Adams KL, Rebenfeld L. In-Plane Flow of Fluids in Fabrics: Structure/Flow Characterization. Text Res J 1987;57:647–54.
- [225] Adams KL, Russel WB, Rebenfeld L. Radial Penetration of a Viscous Liquid Into a Planar Anisotropic Porous Medium. Int J Multiphase Flow 1988;14(2):203–15.
- [226] Morano U. “Analisi dei Parametri Tecnologici in un Processo RIFT” (2005).