

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II**



**Dipartimento di Chimica, dei Materiali e della
Produzione Industriale**

*Dottorato di ricerca in Tecnologie e Sistemi di
Produzione – 25° ciclo*

Indirizzo: Materiali, processi e sistemi innovativi

**Implementazione in MATLAB di un codice per la
simulazione numerica del processo RTM**

**Coordinatore
Prof. ing. Luigi Carrino**

**Dottorando
Ing. De Lumè Antonello**

**Tutor
Prof. ing. Antonio Langella**

SOMMARIO

PAGINA:

INTRODUZIONE

ASPETTI GENERALI

1

FORMATURA DEI MATERIALI COMPOSITI

9

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

20

LA SIMULAZIONE NUMERICA

48

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO

MATEMATICO

72

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

86

CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

L'impiego della tecnologia RTM è in forte crescita e rappresenta una delle più promettenti tecnologie nei settori automotive e aeronautico, grazie alla possibilità di produrre strutture in composito ad elevate prestazioni e dalla forma complessa. Sulla base del Resin Transfer Moulding è stata sviluppata, successivamente, la tecnologia R.I.F.T. (Resin Infusion under Flexible Tool) la quale si differenzia dal Resin Transfer Moulding per l'utilizzo di un controstampo costituito da un sacco polimerico e dall'ausilio del vuoto per effettuare l'iniezione della resina nella preforma. Questa tecnologia è stata messa a punto per la produzione di elementi in composito di grandi dimensioni ed è oggi utilizzata principalmente per la produzione di scafi di imbarcazioni in un unico pezzo con una sola iniezione. Un ulteriore motivo fondamentale che ha portato ad una notevole diffusione di tale tecnologia è legato alle emissioni di stirene, nocivo per la salute, durante la polimerizzazione della resina poliestere che, per il suo basso costo, è quella maggiormente utilizzata per la produzione di compositi. Nella produzione di elementi in composito con il Resin Infusion under Flexible Tool i gas emessi durante la polimerizzazione sono convogliati nei condotti di aspirazione e, successivamente, trattati. Per questo motivo il processo R.I.F.T. è utilizzato in alcuni paesi dell'Unione Europea anche per la produzione di elementi di dimensioni ridotte che, normalmente erano prodotti con tecnologie di tipo manuale.

Il meccanismo di impregnazione del rinforzo, nei processi R.T.M. e R.I.F.T., prevede che la resina scorra nella preforma per effetto sia della pressione di iniezione che della pressione atmosferica. In entrambi i processi, un parametro fondamentale è rappresentato proprio dalla permeabilità del rinforzo e cioè dalla facilità con la quale si possono impregnare le fibre dell'elemento che si vuole realizzare; è importante aumentare il valore di tale parametro cercando di comprendere quali sono i meccanismi che intervengono nel fenomeno di impregnazione delle fibre con i processi R.T.M. e R.I.F.T..

Tuttavia entrambe le tecnologie richiedono la definizione di numerosi aspetti del processo, tra cui la produzione della preforma e il posizionamento di inlet ed outlet. La definizione di parametri e condizioni, che caratterizzano i diversi step del processo, non è intuitiva e può richiedere numerosi esperimenti, con conseguente significativo dispendio economico. A tale scopo, recentemente, sono stati sviluppati software di analisi agli elementi che simulano il riempimento dello stampo in condizioni differenti. Nella definizione delle condizioni di processo della tecnologia RTM e RIFT un ruolo chiave è svolto dal posizionamento sullo stampo degli inlet e degli outlet. Tale scelta influenza il processo di impregnazione della

preforma e, quindi, il contenuto di vuoti, determinando la qualità e le proprietà del pezzo finito. A tal proposito in letteratura sono riportate numerose metodologie sviluppate per individuare l'ottimale configurazione di inlet/outlet. Tali metodologie assumono un'importanza rilevante se si considera che la scelta della configurazione di inlet ed outlet oltre ad influenzare il processo di impregnazione risulta avere un impatto significativo sull'efficienza del processo e sui costi di produzione.

Data l'importanza dei software di simulazione questo lavoro si pone come obiettivo la stesura in MATLAB di un codice che simuli l'impregnazione dello stampo. Da questo punto di vista il software generato si affianca a quelli già esistenti commercio, ma tuttavia si presenta come un codice totalmente aperto. Questo significa che può prevedere anche l'inserimento di variabili o modelli fisici che ne migliorano i risultati, cosa che nei software commerciali non è sempre possibile, o quanto meno non senza un notevole dispendio di risorse economiche, essendo questi ultimi prevalentemente chiusi e quindi non modificabili a proprio piacimento da parte degli operatori.

Aspetti generali

I materiali compositi sono il risultato di una combinazione tridimensionale di almeno due materiali tra loro chimicamente differenti, la matrice ed il rinforzo, macroscopicamente separati da una superficie detta interfaccia.

La matrice è in forma continua ed ha il compito di sostenere, proteggere e tenere unite le fibre costituenti il rinforzo, trasmette loro il carico e determina la forma del componente.

Il rinforzo è spesso in forma fibrosa, ma si utilizzano anche rinforzi particellari; ad esso è demandato il compito di sostenere il carico.

Nella figura 2 sono riportate le sezioni longitudinale e trasversale di un tipico composito.

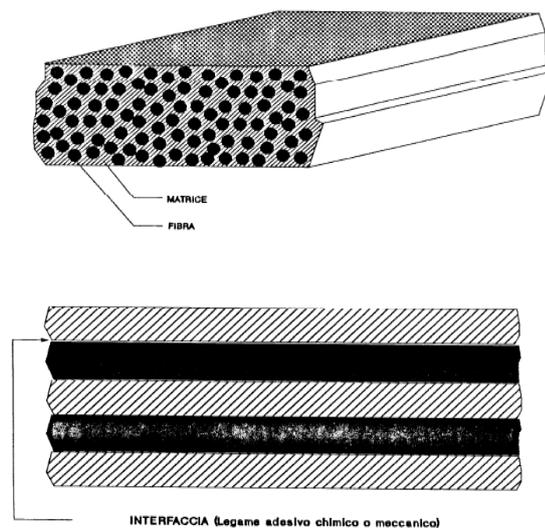


Figura 2 – Sezione trasversale e longitudinale di un composito.

La combinazione così ottenuta vanta proprietà non riscontrabili nei singoli materiali che la compongono. Le elevate caratteristiche meccaniche specifiche comportano innanzitutto una diminuzione degli ingombri ed una radicale riduzione del peso delle strutture, parametro di primaria importanza nei campi di applicazione aeronautica, nautica, automobilistica e del trasporto in generale, dove un minor peso è sinonimo di minori consumi e quindi di una maggiore autonomia.

ASPETTI GENERALI

Il concetto fondamentale alla base dei materiali compositi è quello di sfruttare le elevate proprietà meccaniche delle fibre inserite nella matrice, data l'impossibilità di utilizzarle direttamente nelle applicazioni ingegneristiche a causa delle loro piccole dimensioni lungo le sezioni trasversali. La possibilità di disporre fibre o tessuti di rinforzo nella matrice polimerica secondo direzioni prestabilite, in modo da privilegiare le caratteristiche di rigidità e resistenza nelle direzioni medesime, costituisce un'opportunità unica nella progettazione e realizzazione di una struttura.

In base alla diversa disposizione delle fibre si ottengono materiali con una anisotropia più o meno accentuata e proprio questa particolare proprietà costituisce un nuovo modo di affrontare il problema della progettazione rispetto ai materiali tradizionali che, invece, possono considerarsi macroscopicamente isotropi a seconda delle proprietà che si richiedono al manufatto.

In generale, i materiali compositi potrebbero essere realizzati adoperando una gran varietà di possibili costituenti, ma in realtà il campo dei materiali effettivamente impiegati è limitato sia da considerazioni di carattere tecnologico (la possibilità pratica di costruire un dato materiale) sia da considerazioni di tipo economico (la convenienza di realizzarli ad un determinato costo).

Una classificazione delle fibre e delle matrici comunemente utilizzate ed una idea di quali sono le combinazioni possibili è presentata in figura 3.

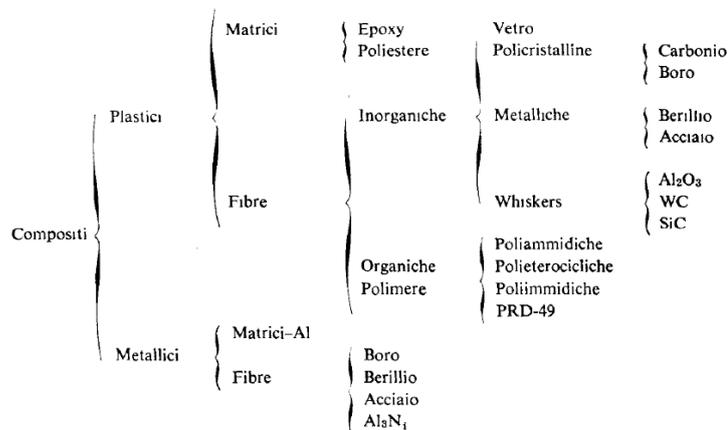


Figura 3 – Classificazione di fibre e matrici.

Di seguito viene presentato un breve scenario dei materiali costituenti più diffusi.

Fibre e matrici

Le *fibre* sono il principale costituente di un materiale composito fibro- rinforzato. Esse occupano la più grande frazione di volume in un laminato composito e assorbono la maggior porzione di carico agente sulla struttura. Generalmente le fibre sono costituite di materiale inorganico ed il loro compito principale è quello di aumentare la resistenza, la rigidità e la tenacità della matrice.

Le fibre più diffuse in assoluto ed anche le prime ad essere state utilizzate in campo industriale sono le fibre di vetro, delle quali vi sono diverse tipologie (E, R, S). Queste presentano ottime proprietà meccaniche ed una notevole resistenza ambientale anche se la loro elevata competitività deriva sostanzialmente dal loro basso costo. Le fibre di vetro sono costituite per il 50-70% da SiO_2 e per la restante parte da Al_2O_3 , CaO e Fe_2O_3 . I principali ostacoli che limitano l'utilizzo di queste fibre sono il basso modulo elastico e la loro elevata densità. Negli ultimi anni si sono diffuse, soprattutto in campo aeronautico, le fibre in carbonio e le fibre aramidiche (meglio conosciute con il nome Kevlar[®]) le quali, sebbene molto promettenti, presentano delle difficoltà che ancora oggi ne limitano la loro diffusione.

Sono, naturalmente, in fase sperimentale molti tipi di fibre, ma solo poche di esse hanno costi accettabili.

La principale caratteristica delle fibre di rinforzo è quella di possedere valori di resistenza a rottura anche di due ordini di grandezza più elevati rispetto a quelli dei materiali tradizionali. Esse unitamente 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.

In tabella 1 sono riportate le caratteristiche meccaniche e termiche di alcune tra le fibre più utilizzate.

ASPETTI GENERALI

Materiale	Densità	Modulo elastico	Resistenza a trazione	Coeff. di dilatazione termica	Modulo specifico	Resistenza specifica
	ρ	E	σ	β	E/ ρ	σ/ ρ
	[g/cm ³]	[GPa]	[GPa]	10 ⁻⁶ /°C		
Acciaio	7.80	210.0	1.250	12.0	26.9	0.160
Alluminio	2.70	70.0	0.450	24	25.9	0.167
Vetro E	2.60	72.4	3.447	5.0	27.8	1.326
Vetro C	2.49	86.2	2.068	5.0	34.6	0.831
Vetro S	2.55	86.9	4.585	5.6	34.1	1.798
Carbonio HS	1.75	227.0	3.102	-0.4	129.7	1.773
Carbonio HM	1.81	358.0	2.482	-0.4	197.8	1.371
Kevlar	1.44	62.0	2.758	-2.0	43.1	1.915
Boro	2.50	400.0	3.450	1.5	160.0	1.380

Tabella 1 – Caratteristiche meccaniche e termiche di alcune tipologie di fibre

È possibile notare la differenza percentuale che esiste tra i materiali compositi e quelli tradizionali: ad esempio se consideriamo l'alluminio, esso presenta un rapporto σ_r/ρ pari a 0,167, ma tale valore non è paragonabile a quello del Vetro C, che presenta il valore di resistenza specifica più basso di tutti (0,831) e neppure a quello del Kevlar (1,915). Il rapporto tra la sollecitazione massima a rottura e il peso specifico indica la possibilità di utilizzare il materiale in strutture leggere e resistenti.

Per evidenziare ulteriormente le caratteristiche di resistenza meccanica si riporta il diagramma *sforzo a trazione – deformazione* (σ, ϵ) delle varie fibre (figura 4), che rende possibile un confronto immediato del loro diverso comportamento.

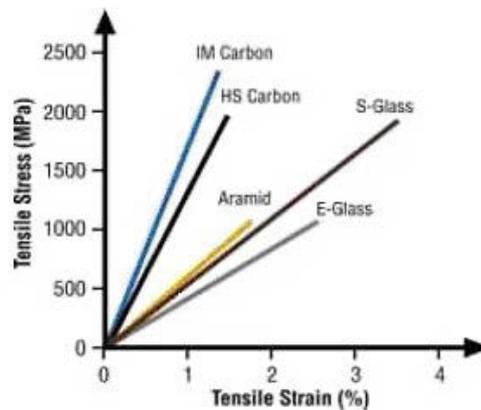


Figura 4 – Diagramma σ - ϵ per le varie tipologie di fibre.

Le fibre usate come rinforzo nei materiali compositi possono trovarsi sotto varie forme, sostanzialmente sono classificate in:

- unidirezionali (fibre disposte lungo una sola direzione del piano);
- tessuto (fibre disposte lungo due direzioni del piano);
- chopped strand (“fibre tagliate”).

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).

Per quanto concerne le *matrici*, la loro funzione è quella di dare una forma ben determinata e stabile al manufatto, di trasmettere il carico alle fibre, di tenerle unite e di proteggere queste ultime dall’ambiente in cui viene adoperato il materiale composito.

Le principali proprietà che le matrici devono possedere sono le seguenti:

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

Come le fibre anche le matrici possono essere di diversa natura: plastica, metallica o ceramica, da qui il nome di compositi plastici, metallici e ceramici.

ASPETTI GENERALI

La scelta del tipo di matrice da utilizzare è legata essenzialmente alla temperatura di esercizio del manufatto da realizzare; infatti è necessario che a tale temperatura la matrice resti solida così da poter trasmettere gli sforzi alle fibre di rinforzo. In particolare a basse temperature (fino a 250 °C circa) si potranno utilizzare compositi plastici, mentre a temperature più elevate è possibile impiegare compositi metallici fino a che non si raggiungono temperature di 1000 °C e oltre per le quali si è costretti ad utilizzare compositi ceramici.

I principali materiali usati come matrici dei plastici rinforzati sono polimeri classificabili in due categorie:

- termoplastici;
- termoindurenti.

Le matrici termoplastiche sono solide a temperatura ambiente e possono essere portate allo stato liquido mediante un opportuno trattamento termico.

La forma raggiunta a tale temperatura viene, poi, mantenuta durante il successivo raffreddamento. Il processo è reversibile in quanto con esso non si va ad alterare la composizione chimica della resina che quindi può essere riutilizzata.

Le matrici termoindurenti sono resine che vengono manipolate allo stato liquido e che induriscono con una reazione esotermica, non reversibile.

Queste resine, dopo la polimerizzazione, non possono essere più riportate allo stato liquido, infatti l'eventuale aumento di temperatura entro un campo ben definito non comporta variazioni sostanziali delle proprietà, oltre una certa soglia invece, causa la totale degradazione del materiale. Tale caratteristica deriva dalla formazione a livello molecolare, dopo il primo riscaldamento, di un reticolo tridimensionale tenuto insieme da forti legami covalenti che rendono irreversibile il processo. In condizioni liquide le resine non hanno ancora subito la reticolazione ed affinché essa abbia inizio, si aggiungono al polimero degli opportuni agenti che prendono il nome rispettivamente di catalizzatori, nel caso di matrici poliestere, o di indurenti negli altri casi, a seconda se essi partecipano o meno alle reazioni che favoriscono la polimerizzazione. Si riportano in tabella 2 alcune caratteristiche delle più diffuse matrici termoindurenti.

ASPETTI GENERALI

Tipo di matrice	Densità	Resistenza a trazione	Resistenza a compressione	E	Temperatura massima
	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	°C
Poliestere	1220	70	150	4900	80
Epossidiche	1200	70	200	800	200
Fenoliche	1390	45	200	7500	oltre 200
Siliconiche	1900	25	105	5000	oltre 200

Tabella 2 – Proprietà delle matrici termoindurenti.

Tecnologie di fabbricazione

Il grande sviluppo e l'interesse suscitato dai materiali compositi, ha fatto sì che anche le tecnologie di produzione siano oggetto di notevoli studi. Esse sono molteplici e la loro scelta viene effettuata sulla base di forma, dimensione, costo e al fine di migliorare i tempi di produzione e la qualità di questi materiali.

Una prima classificazione di tali tecniche produttive è quella che le divide in tecnologia a stampo chiuso e aperto, a seconda che queste si avvalgono o meno dell'utilizzo di stampo e controstampo.

La *tecnologia a stampo aperto* consente l'ottenimento di una sola superficie a finitura controllata dei particolari. Il motivo del largo impiego di queste tecniche è da ricercare proprio nel risparmio connesso all'utilizzo di un solo stampo e alle difficoltà di movimentazione relative alle tecniche a stampo chiuso.

Le principali tecniche di produzione a stampo aperto sono le seguenti:

- deposizione manuale (*hand lay-up*);
- deposizione per taglio e spruzzo (*spray-up*);

ASPETTI GENERALI

- avvolgimento continuo di fibre (*filament winding*);
- formatura con sacco a vuoto (*vacuum bag*);
- formatura in autoclave.

La *tecnologia a stampo chiuso*, diversamente, prevede l'utilizzo di stampo e controstampo. In questo modo è possibile realizzare in un unico pezzo serie di organi collegati meccanicamente con evidenti vantaggi in termini di efficienza strutturale, di costi di fabbricazione e di peso. Con tale tecnologia è possibile, inoltre, produrre parti spesse anche a geometria relativamente complessa, nella forma definitiva e senza la necessità di ulteriori operazioni di finitura. La qualità superficiale e la precisione sono elevate ed, in più, è possibile inserire direttamente, senza successive lavorazioni, elementi di collegamento, parti metalliche.

Un fattore che di certo ha influito non poco nello sviluppo delle tecniche di fabbricazione a stampo chiuso è quello ambientale: i processi di produzione a stampo aperto come hand lay-up e spray-up provocano forti emissioni di un componente organico volatile noto come stirene. È stato dimostrato che tale componente ha effetti nocivi sugli operatori, in particolare dà luogo ad affaticamento, depressione, riduzione dei tempi di reazione ed in alcuni casi addirittura sintomi psichiatrici. Poiché l'estrazione di tale componente dalla resina è un processo dispendioso, il rispetto delle limitazioni delle emissioni di stirene viene garantito migliorando i sistemi di ventilazione, utilizzando resine alternative e, ovviamente, mediante processi di fabbricazione a stampo chiuso. Infatti questi processi consentono riduzioni delle emissioni anche dell'ordine del 90%.

Tra le più importanti tecnologie di questo tipo ne troviamo certamente due:

1. Resin Transfer Moulding (R.T.M.).
2. Resin infusion.

Formatura dei materiali compositi

RTM: Resin Transfer Moulding

Con il termine RTM si intende una tecnologia mediante la quale si fabbricano compositi a matrice polimerica iniettando la resina catalizzata in una cavità avente la forma del particolare da realizzare ed in cui è stato prima collocato il rinforzo asciutto. La cavità è ottenuta chiudendo, l'uno contro l'altro, stampo e controstampo.

La resina viene iniettata all'interno dello stampo ad una pressione maggiore di quella atmosferica. Tale tecnologia quindi, richiedendo stampi molto rigidi (diversamente lo stampo risulterebbe deformato dalla pressione) risulta sicuramente più costosa ma consente di controllare la quantità esatta di resina. Inoltre per tenere lo stampo chiuso è necessario applicare un'elevata forza di chiusura. La forza di serraggio può essere ridotta applicando il vuoto all'interno dello stampo incrementando anche la qualità finale del prodotto. Infatti l'applicazione del vuoto riduce notevolmente la presenza di eventuali porosità all'interno della parte.

Il ciclo di fabbricazione RTM si articola nelle seguenti fasi:

- Pulitura dello stampo:

Rimozione dalla superficie dello stampo di sostanze che possono inquinare la parte. Talvolta si può limitare ad una semplice soffiatura con aria compressa, talvolta può richiedere la rimozione delle particelle di gel coat o di resina. Possono essere usati anche solventi quali acetone o cloruro di metilene

- Applicazione dell'agente distaccante:

Applicazione sullo stampo di una sostanza che consente l'estrazione del pezzo dallo stampo una volta terminato il processo

- Applicazione del gel-coat:

Il gel-coat consente di migliorare la finitura superficiale oltre che conferire al particolare ulteriori proprietà quali una maggiore resistenza all'idrolisi e alla corrosione ed, in generale, una maggiore resistenza all'invecchiamento.

- Posizionamento del rinforzo

FORMATURA DEI MATERIALI COMPOSITI

Il rinforzo è costituito dalla sovrapposizione di strati (mat o tessuti) in fibra di vetro, carbonio e aramidica. Il rinforzo viene posto sulla superficie del semi stampo inferiore curando anche l' eventuale collocamento di elementi addizionali, quali inserti, core ecc.

È importante raggiungere la massima uniformità nella distribuzione del rinforzo all' interno della cavità, e quindi evitare ripiegamenti, raggrinzamenti, allungamenti o compattazioni eccessivi, rattoppi e variazioni nello spessore.

- Chiusura e bloccaggio dello stampo

Il controstampo viene chiuso sullo stampo e bloccato per mezzo i morse, bulloni o altri sistemi di bloccaggi. La forza di serraggio deve essere sufficiente a resistere alle pressioni che si sviluppano nella cavità durante l' iniezione e durante la polimerizzazione.

- Iniezione della resina

La miscela di impregnazione viene trasferita all' interno della cavità tra stampo e controstampo attraverso appositi fori d' iniezione. Sotto l' effetto della pressione esercitata dal sistema di pompaggio, la resina già pre-miscelata o in fase di miscelazione col catalizzatore, avanza all' interno della cavità dal punto, o dai punti d' iniezione verso i fori d' uscita impregnando le fibre ed espellendo l' aria davanti al fronte fluido.

Questa fase può essere agevolata, specie nei casi in cui si usi elevata percentuale di fibra dall' utilizzo di una pompa a vuoto che aspiri l' aria dalla cavità attraverso i fori di uscita durante l' iniezione.

In alcuni casi la quantità di resina da iniettare viene fissata preventivamente con uno studio apposito; in ogni caso è consigliabile erogare una quantità eccedente di resina e verificarne la fuoriuscita da tutti i canali di sfogo, in modo da assicurarsi il completo riempimento della cavità. L' eccesso di resina che è opportuno iniettare dipende dalla complessità della forma del pezzo da realizzare, dalle sue dimensioni e dal sistema di iniezione utilizzato; esso è compreso normalmente tra il 5% ed il 20%.

La pressione di iniezione ed il tempo di iniezione dipendono da diversi parametri di processo, in particolare dal sistema di iniezione, dalla miscela d' impregnazione (soprattutto dalla sua viscosità), dalle caratteristiche del rinforzo e dal percorso che la miscela deve seguire all' interno della cavità. In genera le pressioni (relative) usate per l'

FORMATURA DEI MATERIALI COMPOSITI

iniezione variano tra 0.5 e 4 bar, mentre i tempi di iniezione tra i 20 secondi ed i 2 minuti.

Quando il riempimento della cavità è completato, i fori di uscita e di ingresso vengono chiusi mediante apposite valvole. Chiudendo prima le valvole di uscita e poi quelle di ingresso si ottiene un' iniezione addizionale che incrementa la pressione in cavità garantendo migliore rispondenza dimensionale e migliore finitura superficiale; ciò richiede però maggiore rigidità e resistenza degli stampi e delle strutture di sostegno.

- Polimerizzazione della resina

Il tempo di polimerizzazione dipende dal tipo di miscela, dalle caratteristiche geometriche e reologiche della cavità, dalla temperatura di iniezione della miscela e da quella a cui viene portato lo stampo.

Tale periodo corrisponde al tempo di permanenza del pezzo nello stampo, ed è pertanto uno dei fattori critici nella determinazione del tempo di ciclo complessivo, e quindi del ritmo di produzione. Comunque il pezzo viene in genere estratto dallo stampo prima che sia completamente indurito e collocato su un apposito supporto, che ne garantisce la conservazione della forma durante il completamento della polimerizzazione.

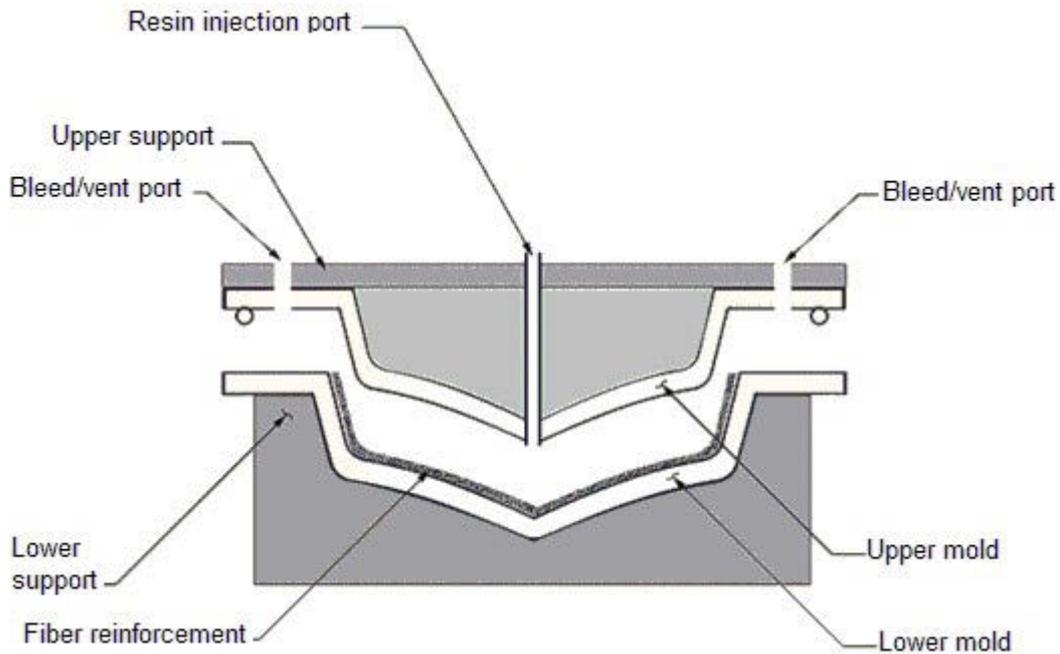
- Apertura dello stampo ed estrazione del pezzo

L' apertura dello stampo e l' estrazione del pezzo possono effettuarsi quando sia trascorso, dal completamento dell' iniezione, un periodo pari ad almeno quattro volte il tempo di gelificazione caratteristico della miscela usata. L' operazione di estrazione può risultare più o meno facile a seconda della forma e delle dimensioni del pezzo, in particolare a seconda degli angoli che la superficie del pezzo forma con la direzione di estrazione. In genere una facile estrazione può essere conseguita ricorrendo ad un getto d' aria attraverso i fori presenti nello stampo. In ogni caso, quando gli stampi sono in materiale composito, è sconsigliabile usare per la rimozione del pezzo, attrezzi d' acciaio; è preferibile adoperare cunei di materiale termoplastico o legno.

- Operazione di finitura

La principale operazione di finitura consiste nel tagliare i margini del pezzo, corrispondenti alle zone di contatto tra stampo e controstampo; questa operazione sarà

facilita nel caso di utilizzo di rinforzo preformato. A questa operazione può seguire una eventuale operazione di verniciatura del pezzo, nonché lavorazioni meccaniche, come praticare fori, posizionare perni o rivetti, fissare bulloni o saldare parti supplementari.



Processo RTM

RIFT: Resin Infusion Under Flexible Tool

La tecnica R.I.F.T. (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. Queste 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.

La tecnologia R.I.F.T. inoltre prevede l'utilizzo di un sacco elastomerico quale controstampo, ottenendo notevoli risparmi sul costo di realizzazione e mantenimento degli stampi.

Le attrezzature usate nel R.I.F.T. sono:

FORMATURA DEI MATERIALI COMPOSITI

- 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:

1. 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.
2. Stampi elettro-formati: 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.
3. 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 che regola le condizioni di vuoto. Il vuoto infatti 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.

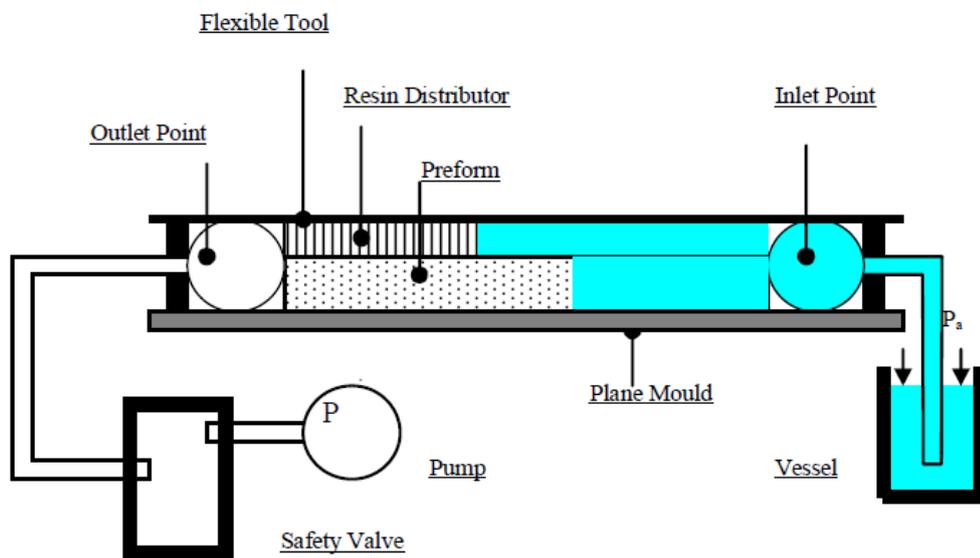
I sacchi utilizzati nel R.I.F.T. sono essenzialmente di quattro tipi: in nylon, in polipropilene, in gomma siliconica ed in polietilene a bassa densità. Le proprietà in base

FORMATURA DEI MATERIALI COMPOSITI

alle quali si giudicano i vari tipi sono la rigidità, la resistenza ai solventi e la resistenza ai picchi esotermici durante la polimerizzazione delle resine.

Il sistema di distribuzione della resina consente di aumentare l'uniformità del processo di impregnazione e di ridurre i tempi di lavorazione.

Nella seguente figura è rappresentato uno schema con le vari attrezzature utilizzate nel processo R.I.F.T..



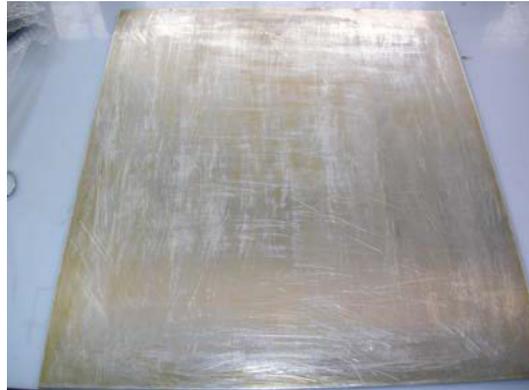
Processo R.I.F.T.

Fasi del processo R.I.F.T.

Il ciclo produttivo di un processo R.I.F.T. può essere suddiviso nelle seguenti fasi:

- Pulitura della stampo;

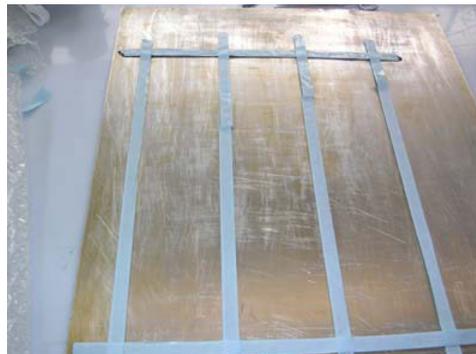
FORMATURA DEI MATERIALI COMPOSITI



Fase di pulitura dello stampo.

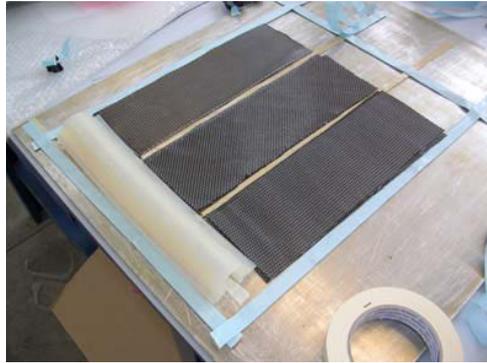
- Applicazione del sigillante;

Viene posizionato in modo tale da circondare la preforma; in seguito si fa aderire il sacco allo stampo rendendo ermetica la tenuta.



Posizionamento del sigillante.

- Applicazione del distaccante;
- Applicazione del gel-coat;
- Posizionamento del rinforzo;



Posizionamento del rinforzo.

- Posizionamento del peel-ply;

Risulta permeabile al flusso di resina, si distacca facilmente dal laminato, facilita l'apertura del sacco e consente di avere una superficie rugosa pronta per eventuali incollaggi.

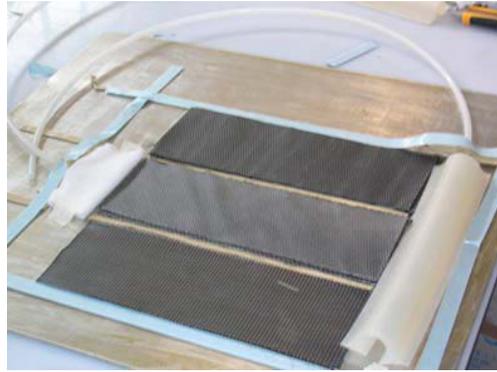


Posizionamento del peel-ply.

- Posizionamento del sistema di distribuzione;

Ha il compito di abbassare i tempi di impregnazione distribuendo la resina su tutta la superficie del laminato, creando micro canali nei quali la resina scorre più velocemente del rinforzo.

FORMATURA DEI MATERIALI COMPOSITI



Posizionamento del sistema di distribuzione.

- Chiusura con il sacco e sigillatura dei canali per il vuoto e l'iniezione:

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.



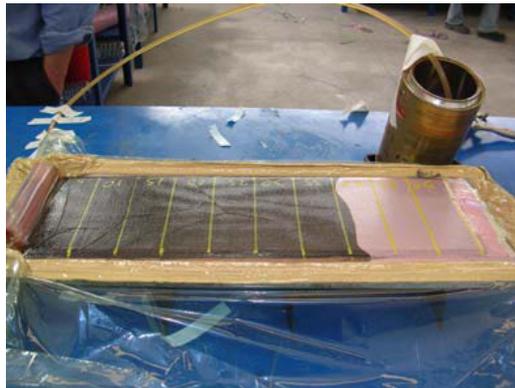
Chiusura del sistema.

- Iniezione e cura della resina;

Sotto la spinta della pressione atmosferica, impregna il rinforzo. La resina deve essere introdotta senza ulteriore pressione, altrimenti si eliminerebbero gli effetti della compressione e compattazione delle fibre prodotti dal vuoto.

FORMATURA DEI MATERIALI COMPOSITI

Successivamente si procede con 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.



Processo di impregnazione.

- Eliminazione del sacco, del peel-ply e del distributore ed estrazione del pezzo;

Dopo la polimerizzazione, seguiranno le fasi di eliminazione del peel-ply e del distributore, infine, quelle di estrazione e rifinitura del pezzo.



Estrazione del laminato.

- Operazioni di rifinitura.

Il particolare viene contornato e preparato per le successive operazioni di finitura superficiale

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

Sviluppo storico dei modelli teorici

La fase di iniezione della resina negli stampi e di impregnazione del rinforzo fibroso riveste un ruolo determinante nel processo di fabbricazione, in quanto da essa dipendono in buona parte le qualità finali del prodotto.

Per comprendere il comportamento del flusso di resina attraverso il rinforzo, molti ricercatori 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, 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

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

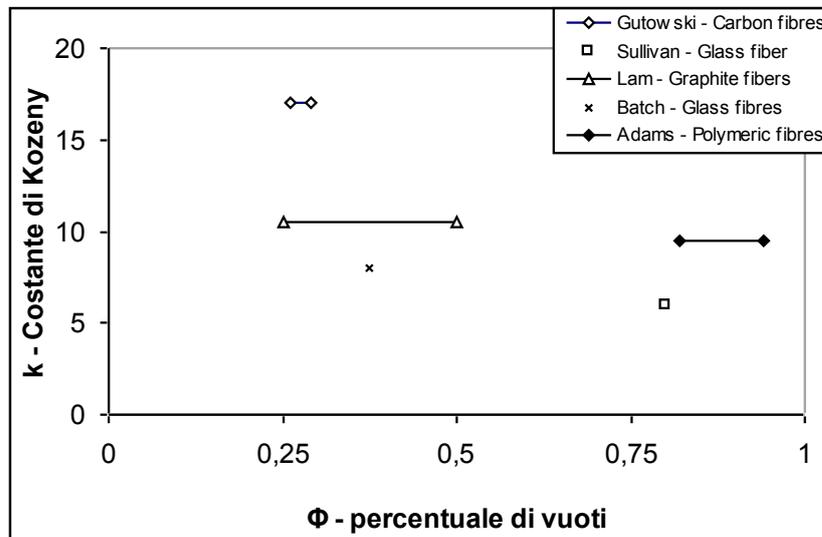
utilizzata e può essere ottenuta, per un letto granulare attraversato da fluido Newtoniano, dall'equazione di Kozeny-Carman.

Carman e Kozeny hanno modellato un mezzo poroso come una serie di tortuosi canali e la loro equazione 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 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, presentati graficamente nel diagramma 14 di k in funzione di Φ .



SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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 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.

Molte sono state le variazioni 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. 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 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. 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. 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 hanno esaminato gli effetti della compattazione sulla frazione volumetrica delle

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

fibre. Il lavoro iniziale di Van Wyk esaminò il comportamento delle fibre nei materiali naturali. Chen e Chou hanno esaminato la compattazione di preforme mono e multistrato per descrivere in generale il fenomeno, ma l'equazione comunemente usata come modello fu sviluppata da Gutowski. 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 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 presentarono una tecnica numerica per prevedere la permeabilità orizzontale e trasversale, mentre Bruske 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. Chan 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.

Micro e macro flusso

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

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

all'individuazione di due zone, dette satura ed insatura, il cui diverso grado di impregnazione è evidenziabile tramite la figura 15.

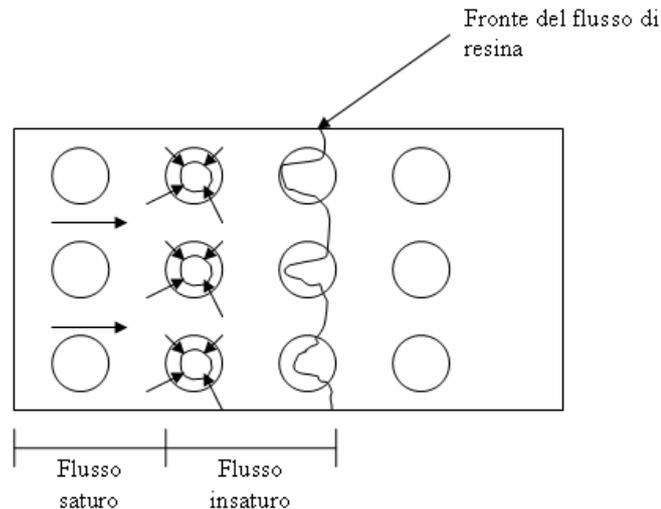


Figura 15 – Flusso saturo e flusso insaturo.

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 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., se il flusso di resina tra i vuoti è più

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

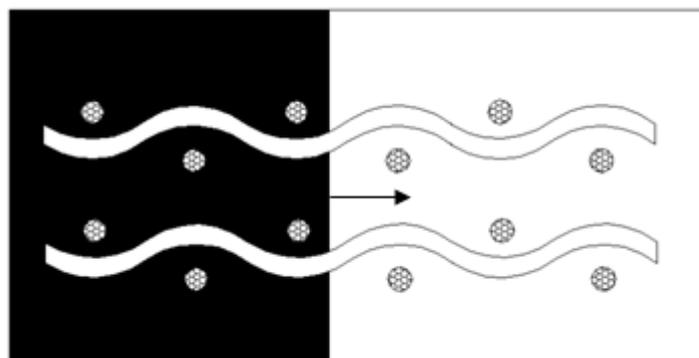
veloce del processo di assorbimento nei fasci di fibre, comporta che aria sia intrappolata nei fasci di fibre.

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, 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'R.T.M. 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, e in un caso sono state modellate le interazioni chimiche tra la preforma e la resina. 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, anche se alcuni studiosi (Adams, Fracchia e Williams) a seguito di opportuni esperimenti concordano sulla sua validità anche nella zona insatura, mentre altri (Molnar, Trevino e Martin e Son) hanno riscontrato significativi scostamenti dalla legge di Darcy. In particolare Martin e Son e Williams et al. 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

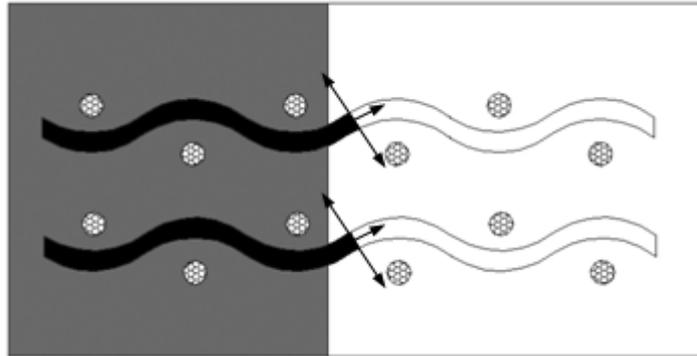
SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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 viscosive, 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, 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 sono rappresentati i due meccanismi.



SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI



Meccanismi di impregnazione: macro flusso e micro flusso.

È 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, mentre un certo numero di studi ha indicato che la portata totale del fluido attraverso il materiale è generata soprattutto dal macroflusso. Infatti, la portata per unità di area su macroscale è 100 volte maggiore di quella su microscale, sebbene la geometria sulle due scale sia praticamente la stessa. Sono stati presentati un certo numero di modelli che considerano il flusso su microscale, 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 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, in particolare Shih e Lee 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, 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. Dai risultati presentati da Sadiq, 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.

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

Ad una simile conclusione giunsero Larson e Higdon, 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. Molte discrepanze in letteratura, 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, effetti di pressione capillare e separazione del flusso in macro e micro flusso, prendendo quindi in considerazione pressioni capillare ed effetti di bagnabilità. 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. Negli studi sulla visualizzazione del flusso, 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 R.I.F.T.. 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, 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, 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

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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 sottomodello per infiltrazione di resina in un assemblaggio di tessuti intrecciati, tale modello è potenzialmente importante nelle applicazioni R.I.F.T. 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 sono i parametri d'ingresso.

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, 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 R.T.M., e trasparenti, in modo da monitorare l'avanzamento del fronte di flusso.

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

- 1) bagnatura con flusso radiale;
- 2) bagnatura con flusso parallelo;
- 3) 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 nel mezzo poroso influenza la misura della permeabilità, indipendentemente dalla sua geometria attuale, radiale o parallelo.

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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 valuta la permeabilità, sia nella bagnatura che nella saturazione e, le differenze riscontrate con le misure della tecnica con flusso radiale, sono spiegate con le diverse velocità del fronte di flusso. Ahn ed altri confermarono tali risultati, mentre Gerbart ed altri 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 R.T.M.. 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.

Influenza della struttura delle fibre sulla permeabilità

L'utilizzo della tecnologia R.I.F.T., come strumento economico ed efficiente di produzione di materiali compositi di grandi prestazioni, 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

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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. 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 determinano la buona riuscita di un processo di stampaggio mediante R.I.F.T.. 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 R.T.M. isotermico. I profili di avanzamento della resina venivano registrati in modo da poterne calcolare la velocità. Il processo di riempimento mediante R.I.F.T. 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.). Disposizioni non più uniformi delle fibre determinano un errato processo R.I.F.T., 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 R.I.F.T. 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.

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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 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, 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. 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, in particolare la riduzione della resistenza a compressione longitudinale e a taglio interlaminare. Pearce ed altri 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 mm² tra i fasci di fibre ed il contemporaneo deterioramento delle proprietà meccaniche per aree maggiori di 0,50 mm². 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 che si hanno nella realizzazione della microstruttura dei compositi. Ciò è stato realizzato in seguito alla

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

produzione di lamine di matrice epossidica e fibre di carbonio di differenti tipologie di tessitura, con R.T.M. 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.

Effetti sulla permeabilità di fronti di flusso convergenti

La velocità del processo di R.I.F.T. può essere migliorata, utilizzando più varchi di iniezione della resina. Ciò non dà luogo necessariamente alla convergenza dei fronti di flusso di resina. Lmdstrom 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 R.T.M., 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, grazie ad un' 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:

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

- 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.

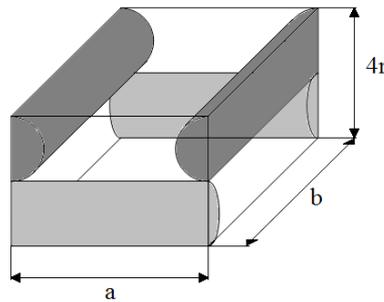
I vuoti, generati in questo modo, possono mantenere le loro posizioni durante i flussi seguenti, e ciò è dovuto all'annullamento della pressione di iniezione su tali zone di vuoto formatisi. Si è detto che un metodo, molto efficace per tale riscontro, è quello basato sugli ultrasuoni. Tale metodo può 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, 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.

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 e studiando l'effetto di deformazioni finite sulla struttura delle fibre. 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), procedure sperimentali non standard oppure richiede informazioni a livello microscopico, 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

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

come la curvatura e la torsione causate dall'attrito tra le fibre e dalla forza di compressione. Per la maggior parte delle fibre si è visto che l'effetto predominante è quello di shearing. Diversi sono stati gli studi (quasi sempre limitati a casi bidimensionali) presentati sul comportamento delle fibre. Un metodo largamente usato per la simulazione è basato su analisi cinematiche (come il PATRAN Laminate Modeler). Un primo modello per la determinare la permeabilità di un rinforzo si basa sulla deformazione di una cella elementare :



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.

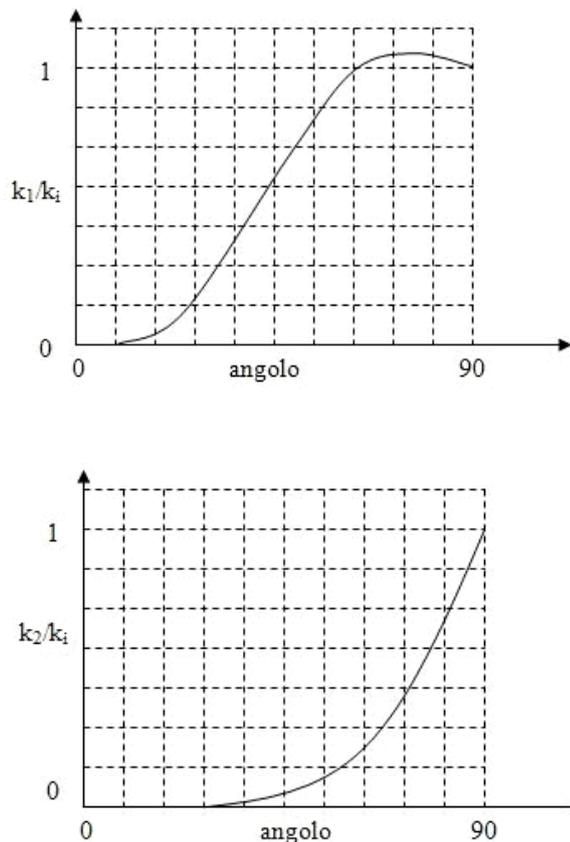
SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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 in figura una rappresentazione dei valori normalizzati, riferiti cioè al valore iniziale, di k_1 e k_2 (lungo le due direzioni nel piano).



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

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

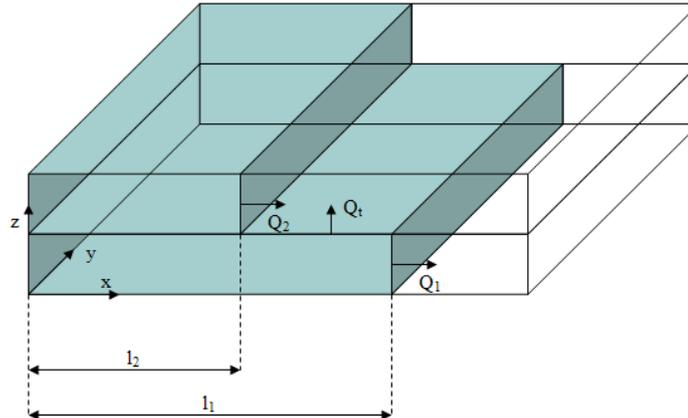
Al fine di ricavare le caratteristiche di permeabilità sono stati effettuati esperimenti sul flusso radiale con sezioni di iniezione circolari aventi raggio R_0 e pressione di iniezione nota. Risolvendo poi l'equazione differenziale riferita al generico caso di materiale anisotropo e fronte di flusso ellittico 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 Pa·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. e da Luo et al.. 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) 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. Quanto detto è reso esplicito in figura (in cui è

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

rappresentata l'impregnazione di due strati e si suppone che l'iniezione di resina avvenga da $z = 0$).



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:

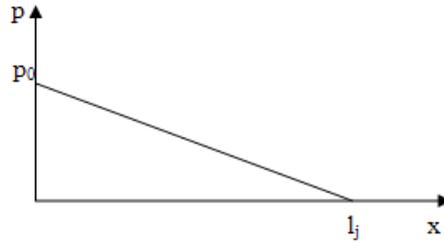
$$\bar{k} = \frac{1}{H} \sum_{j=1}^n h_j k_j$$

Equazione valida per flusso trasversale nullo o istantaneo.

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 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 20).
-

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI



Andamento della pressione nella direzione di impregnazione.

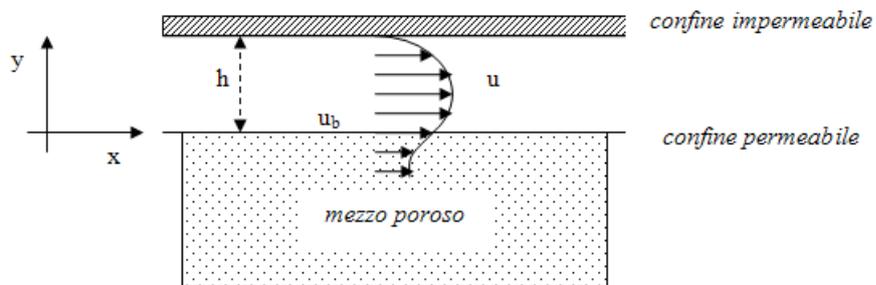
$$p_j(x) = \left(p_0 - p_0 \frac{x}{l_j} \right) (\delta(x) - \delta(x - l_j))$$

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

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

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

In uno studio effettuato su una tecnologia di tipo SCRIMP si è ipotizzato un andamento della velocità u del fronte di resina rappresentabile come in figura 21 (u_b rappresenta la velocità lungo il piano di scambio tra la rete e il mezzo poroso).



Ipotesi di avanzamento del flusso.

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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

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

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:

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

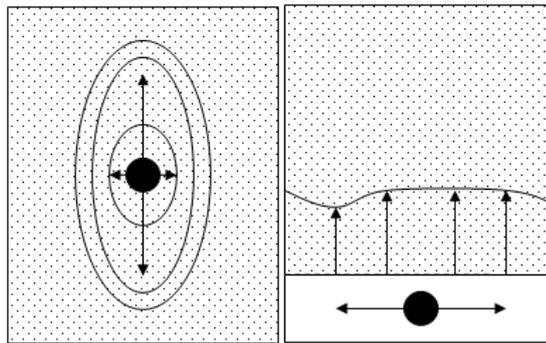
$$k_{eq} = \frac{h^3 + 4h^2 \sqrt{k_x} + 6hk_x}{12(\sqrt{k_x} + h)}$$

Risulta chiara, da quanto detto finora, l'importanza di ottenere la permeabilità di un rinforzo. Lidström suggerisce che la permeabilità di un materiale isotropico possa dipendere dalla geometria dell'esperimento, riscontrando valori diversi in quelli condotti

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

in modo radiale da quelli monodimensionali. Parnas e Salem 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 (in figura) è possibile osservare un fronte di flusso circolare, nel caso di materiale isotropo, o ellittico, nel caso di materiale anisotropo.



(a)

(b)

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.

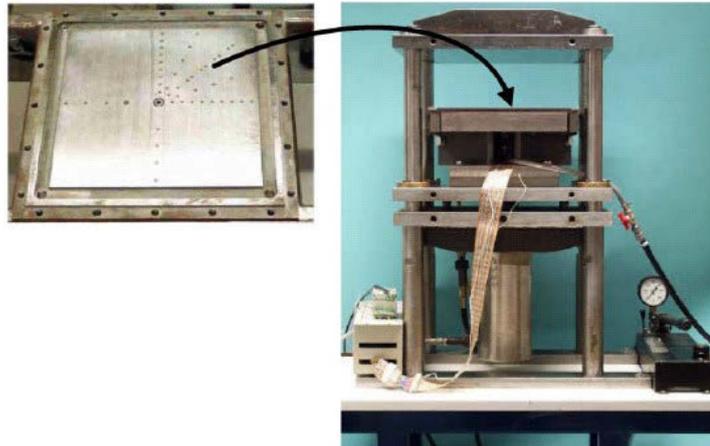
A tale fine Weitzenböck et al. sono partiti dalla legge di Darcy in coordinate polari:

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

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 incomprimibile. 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

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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 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 anche se recentemente è stata applicata una tecnica chiamata PIERS (Permeability Identification using Electrical Resistance Sensors) basata sull'utilizzo di una piastra di sensori (in figura). 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.



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

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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. 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.

Dalla legge di Darcy è noto che:

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

che è possibile riscrivere come:

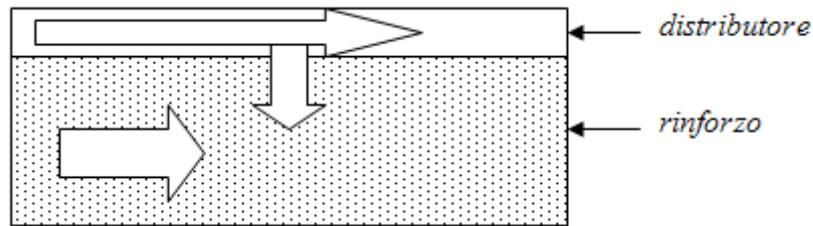
$$\Delta p = Q \left(\frac{\mu L}{k \sigma} \right)$$

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.

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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 in figura.



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).

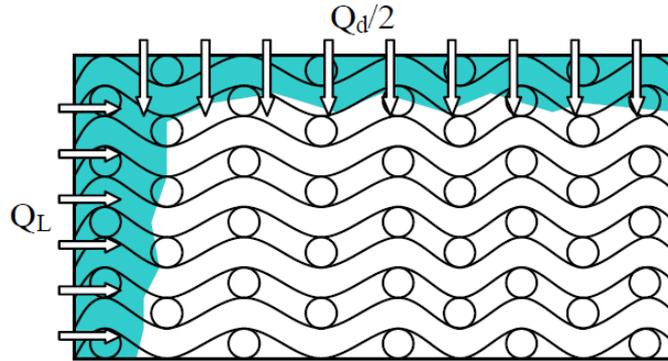
Nota l'espressione della resistenza in funzione dei parametri della legge di Darcy e delle regole che vincolano serie e parallelo la resistenza totale può scriversi:

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

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

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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.



Riempimento del rinforzo.

A questo punto è semplice scrivere l'espressione della portata:

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

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

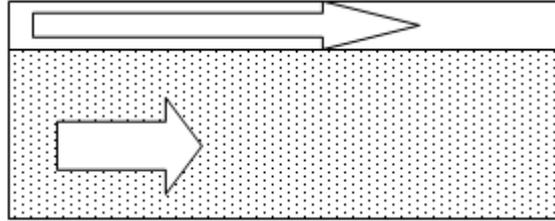
$$t = \int_i^f \frac{(dV/2)}{Q}$$

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.

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

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 (in figura).



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:

$$R_T = \frac{\frac{2}{k_d \cdot \sigma_d} \cdot \frac{1}{k_l \cdot \sigma_l}}{\frac{2}{k_d \cdot \sigma_d} + \frac{1}{k_l \cdot \sigma_l}} \cdot \mu \cdot x \quad Q = \frac{\Delta p}{\mu \cdot x} \cdot \frac{\frac{2}{k_d \cdot \sigma_d} + \frac{1}{k_l \cdot \sigma_l}}{\frac{2}{k_d \cdot \sigma_d} \cdot \frac{1}{k_l \cdot \sigma_l}}$$

confermando l'espressione temporale. È possibile così ottenere l'espressione della permeabilità equivalente data dalla seguente espressione:

$$k_{eq} = \frac{2k_l \sigma_l + k_d \sigma_d}{2(\sigma_d + \sigma_l)}$$

La permeabilità pari a quella equivalente del sistema può essere valutata, almeno secondo le indicazioni della casa costruttrice di un programma di simulazione FEM RTM-Worx, attraverso 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:

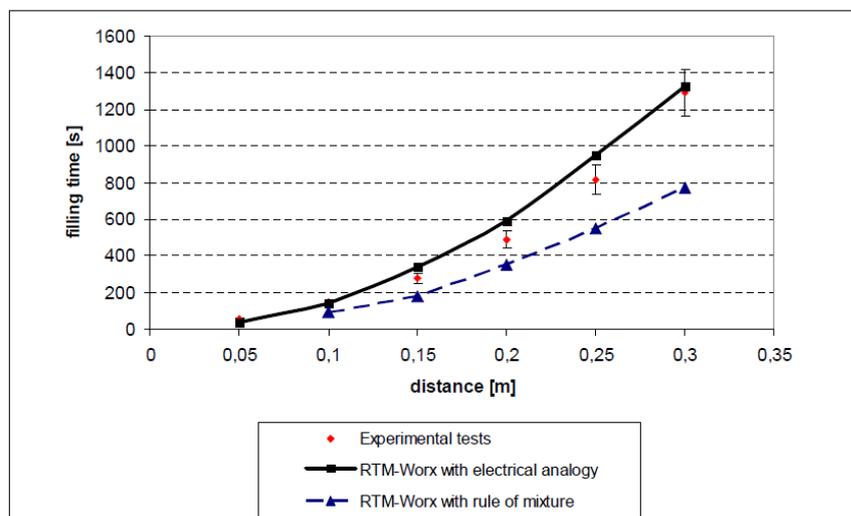
$$h_{tot} = h_1 + h_2$$

SVILUPPO STORICO DEI MODELLI TEORICI

mentre per la permeabilità si ha che

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

In realtà tale formula ha mostrato in studi precedenti una non perfetta aderenza ai risultati sperimentali come è possibile notare in figura dove viene riportato un confronto tra i risultati sperimentali e due simulazioni con tecnica FEM, adottando in un caso il modello di analogia elettrica e nell'altro la regola delle miscele per la valutazione della permeabilità equivalente.



Confronto tra dati sperimentali e analisi FEM.

La simulazione Numerica

L'applicazione di tecniche di stampaggio ad iniezione chiusi come RTM (con o senza l'assistenza di vuoto), infusione sotto vuoto sono ormai una realtà consolidata. I vantaggi sono investimenti iniziali relativamente bassi, costi materiali bassi rispetto al preimpegnato, le emissioni di stirene limitate (ad esempio, migliori condizioni di lavoro), elevata percentuale volumetrica di fibre (la differenza è particolarmente grande se l'infusione sotto vuoto viene confrontata con laminazione manuale) e riproducibilità elevata. Il processo, come già evidenziato, è molto semplice: il rinforzo secco viene posto in uno stampo, lo stampo viene chiuso e il flusso di resina nello stampo impregna il rinforzo. La forza motrice per il flusso della resina è una differenza di pressione .

Uno degli ingredienti chiave per una buona impregnazione è la conoscenza del comportamento del flusso di resina attraverso lo stampo. Non è semplicemente una questione di trovare la posizione 'ottimale' di punti di iniezione e di uscita, ma il processo deve essere sufficientemente robusto per affrontare inevitabili variazioni delle proprietà del materiale e delle condizioni di processo. Inoltre se devono essere prodotti stampi da utilizzare per un elevato numero di serie o quando il costo del materiale è molto elevato, i rischi ed i costi sono troppo elevati per poter effettuare prove sperimentali.

I software di simulazione hanno fornito una valida soluzione perché consentono di eseguire prove di processo e ottimizzazioni in breve tempo senza lo spreco di materiali e prima che lo stampo sia costruito. Tuttavia, per i notevoli costi che hanno, l'applicazione di questi software è ancora limitata a centri di ricerca e grandi industrie.

Il modello matematico

Il flusso di resina attraverso un rinforzo è ben descritto dalla legge di Darcy, una relazione lineare che lega il flusso di un liquido nei materiali porosi ed il gradiente di pressione applicata. Includendo la forza gravità (molto importante per infusione di oggetti di grandi dimensioni come gli scafi delle barche), la legge generalizzata a tre dimensioni e l'equazione di continuità Darcy sono:

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0 \quad (1)$$

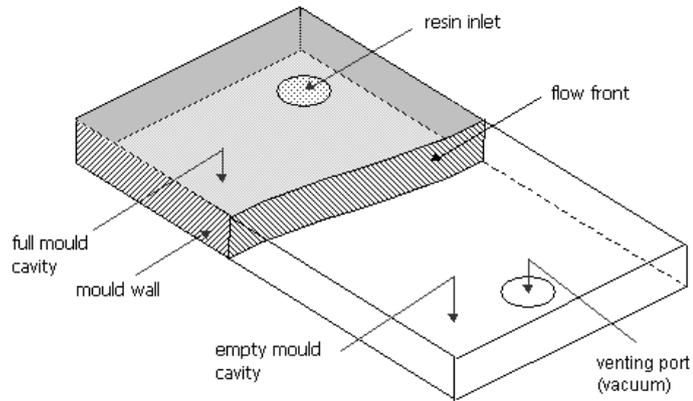
$$\underline{u} = -\frac{K}{\eta} (\nabla p - \rho_r \underline{g}) \quad (2)$$

Dove \underline{u} (m/s) è la velocità della fluido, K (m^2) è il tensore di permeabilità, η (Pa/s) è la viscosità della resina, p è la pressione, ρ_r è la densità della resina e \underline{g} è l'accelerazione di gravità. Sostituendo la legge di Darcy (2) nell'equazione (1) l'unica incognita è la pressione (una quantità scalare 3D). All'interno del liquido nello stampo:

$$\nabla \cdot \left(\frac{K}{\eta} (\nabla p - \rho_r \underline{g}) \right) = 0 \quad (3)$$

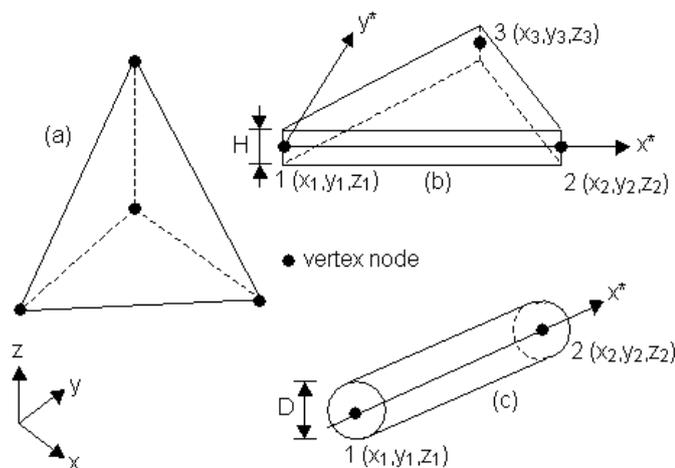
Al fine di risolvere questa equazione, è necessario scegliere correttamente i domini e le condizioni iniziali per diverse regioni della cavità di stampo; uno stampo forma un dominio chiuso che deve essere riempito di resina (in figura).

LA SIMULAZIONE NUMERICA



Per la simulazione numerica è stato scelto un modello che ricorre all' utilizzo di elementi lineari. Questo offre il vantaggio che la discretizzazione con il metodo agli elementi finiti di Galerkin raggiunge lo stesso risultato ottenuto dalla formulazione con i volume di controllo. Questo consente l'utilizzo di un efficiente metodo di monitoraggio del flusso e l'implementazione è relativamente facile.

La cavità dello stampo viene suddiviso in un numero finito di tetraedri, triangoli (elementi bidimensionali con spessore costante) e di canali (elemento lineari con sezione costante di forma arbitraria). In figura sono rappresentati i tipi elementi ai quali si ricorre nell' ambito della simulazione numerica:



a) elementi tetraedrici b) elementi triangolari c) elementi lineari

LA SIMULAZIONE NUMERICA

Gli elementi sono collegati da loro vertici, i nodi, e possono avere in comune facce triangolari (tetraedri) e bordi (triangoli). Per ogni immagine nodo identificato dalla lettera j , $w_j(\underline{x})$ è una funzione base caratterizzata dalle seguenti proprietà:

- $w_j(\underline{x})=1$ se $j=i$, $w_j(\underline{x}) = 0$ se $j \neq i$; $j, i = 1, N$
- w_j assume un comportamento lineare in ogni elemento
- w_j è continua su Ω

La pressione viene calcolata ricorrendo ad una combinazione lineare delle funzioni di base $w_j(\underline{x})$:

$$\tilde{p}(\underline{x}, t) = \sum_{j=1}^N p_j(t) w_j(\underline{x}) \quad (3)$$

Dopo aver applicato il metodo di Galerkin l'equazione diventa:

$$A_{ij} p_j = f_i + b_i \quad (4)$$

$$A_{ij} = \int_{\Omega} \underline{\nabla} w_i \cdot \frac{K}{\eta} \underline{\nabla} w_j d\Omega \quad (5)$$

$$f_i = \int_{\Omega} \underline{\nabla} w_i \cdot \frac{K}{\eta} \rho_r \underline{g} d\Omega \quad (6)$$

$$b_i = \int_{\Gamma} w_i \frac{K}{\eta} (\underline{\nabla} p - \rho_r \underline{g}) \cdot \underline{n} d\Gamma = \int_{\Gamma} w_i \underline{u} \cdot \underline{n} d\Gamma \quad (7)$$

Dove \underline{n} è il vettore normale sul confine Ω . A causa della scelta funzioni delle funzioni base w_i , le componenti A_{ij} della matrice A sono diversi da 0 solo se il nodo i e j giacciono nello stesso elemento. Le componenti A_{ij} della matrice A e le componenti f_i di \underline{f} possono essere ottenuti calcolando gli integrali separatamente per ogni elemento e aggiungendoli alla matrice del sistema.

Il termine b_i è zero quando viene chiuso il confine (una cosiddetta condizione limite naturale), ed è diverso da zero solo nei punti di iniezione, nei punti di uscita e sul fronte del flusso, e nei punti dove è imposta la pressione di iniezione e/o la portata. Le equazioni per i nodi in cui è imposta la pressione (che include la parte dello stampo non

ancora riempito di resina) possono essere eliminate dal sistema quando è risolto per le pressioni. È facile verificare che b_1 contiene le portate nodali residue, infatti una semplice moltiplicazione tra matrici dopo la semplice soluzione delle pressioni è sufficiente per il calcolo delle portate al fronte del flusso.

Implementazione del modello:

La posizione del fronte del flusso viene monitorata assegnando fattori di riempimento ai nodi. Inizialmente, tutti i nodi sono vuoti ($f=0$), tranne i nodi di iniezione. Le pressioni sono calcolate in nodi completamente riempiti ($f=1$), invece tutti i nodi parzialmente riempiti ($0 < f < 1$) formano il fronte del flusso. La pressione è pari a zero in tutti i nodi che non sono ancora completamente riempiti: nodi vuoti e sul fronte. Il calcolo procede come segue:

- Valutazione delle portate residue sul fronte del flusso dalle equazioni agli elementi finiti (eqs 5-8)
- Determinazione del passo temporale: l'incremento massimo di tempo che può essere considerato per riempire esattamente un volume di controllo.
- Avanzamento del fronte del flusso, aggiornamento dei fattori di riempimento, registrazione dei tempi di riempimento dei nodi (definito come il momento in cui $f = 0,5$) e aggiornamento delle condizioni al contorno sul fronte del flusso, nei punti di iniezione e di sfiato (in cui può variare la pressione e / o portata, e si possono aprire e chiudere in determinati istanti).
- Calcolo delle nuove pressioni (assemblare nuovamente la matrice di rigidità se necessario)
- Verifica che lo stampo sia completamente riempito. In caso contrario, andare al punto 1.

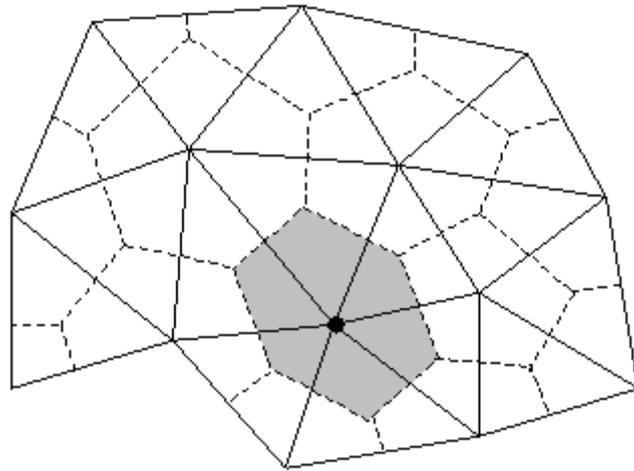
Il numero di incrementi di tempo durante il riempimento è uguale al numero di nodi, in quanto l'incremento di tempo è limitato. Non è necessario (non aumenta la precisione) adottare incrementi di tempo più brevi in quanto le condizioni al contorno non cambiano.

LA SIMULAZIONE NUMERICA

Se la viscosità della resina è costante e le proprietà degli elementi non cambiano, non è necessario ripetere assemblaggio della matrice di rigidità A_{ij} nel passaggio 4, che riduce significativamente il tempo di calcolo. La progressione del fronte del flusso può essere visualizzato plottando i tempi di riempimento nodali. In alternativa, i risultati intermedi possono essere visualizzati con il fronte del flusso definito nei elementi in cui essi sono intersecate dalla linea $f = 0,5$, in cui i fattori di riempimento vengono interpolati linearmente tra i valori nodali.

Per la soluzione delle pressioni dall'equazione (5) è necessario un risolutore lineare. La matrice A_{ij} è sparsa, la maggior parte dei coefficienti sono nulli. Mentre solutori diretti (sulla base di Gauss-eliminazione) sono molto competitivi in problemi di 2D, per problemi 3D i solutori iterativi sono preferiti perché richiedono meno spazio di memorizzazione e molto meno tempo per ogni iterazione. Un metodo molto popolare è l'iterazione di Gauss-Seidel. Tuttavia, la convergenza di questo metodo dipende molto dalle condizioni iniziali. La soluzione della pressione a partire dal passo temporale precedente è spesso un buon punto di partenza, tuttavia, se le condizioni al contorno sono cambiate, o il fronte raggiunge un'area nello stampo in cui la permeabilità improvvisamente subisce delle modifiche (bordo, canali di dispersione) è necessario un gran numero di iterazioni e tempi di calcolo aumentano notevolmente. Pertanto, in questo caso è utilizzato come risolutore quello del Gradiente Coniugato Precondizionato con - in questo caso - il precondizionamento simmetrico di Gauss-Seidel.

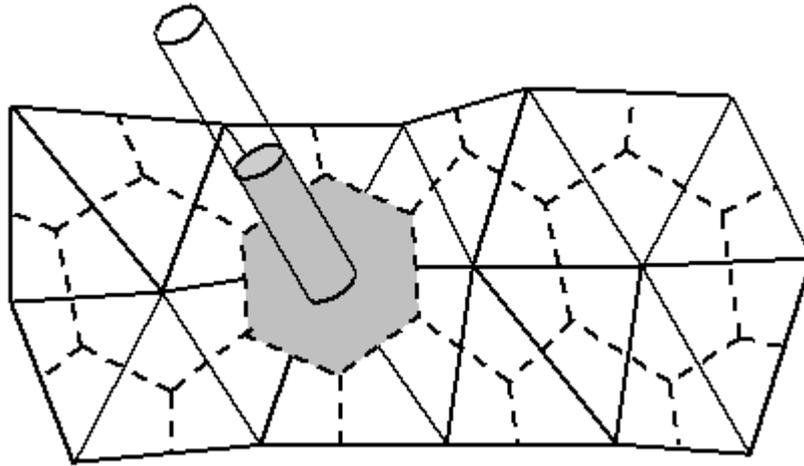
Per il calcolo della funzione di riempimento basta tener conto che gli elementi triangolari, collegati tra di loro dai nodi, insieme formano una superficie senza sovrapposizioni o lacune. La pressione viene interpolato linearmente sugli elementi, quindi il gradiente di pressione è costante su ogni elemento e discontinua ai bordi dell'elemento. Ogni triangolo è suddiviso unendo i punti medi dei suoi tre lati al suo baricentro. Il volume di controllo associato a un nodo viene quindi definito come l'unione di tutti i volumi suddivisi connessi a tale nodo, come mostrato in figura. Come gli elementi, i volumi di controllo coprono l'intero dominio di calcolo senza sovrapposizioni.



Volumi di controllo associati a ciascun nodo

In tutti i nodi, lo stato di riempimento del volume di controllo associato è definito da un fattore di riempimento f che definisce la frazione del volume riempito di resina rispetto alla quantità di resina del volume di controllo può contenere. Questo fattore di riempimento è pari a zero per i nodi vuoti e uno per la piena (bagnata) nodi. Tutti i nodi che sono parzialmente riempiti ($0 < f < 1$) sono nodi sul fronte del flusso. Per un dato stato di riempimento, le pressioni sono calcolati con pressione prescritta nei nodi al fronte del flusso: pressione ambiente o in caso di vuoto il livello di vuoto. Dalla soluzione della pressione, le portata al fronte può essere facilmente calcolato una moltiplicazione di matrice (eqs 5-7). Moltiplicando la portata con l'incremento di passo temporale fornisce la quantità di resina che entra ogni nodo del fronte, che viene utilizzato per aggiornare i fattori di riempimento. Questo viene ripetuto fino stampo è pieno.

Poiché questo è uno schema esplicito, solo un nodo può essere riempito in ogni incremento di passo temporale, che definisce la dimensione del passo di incremento di tempo. Il numero totale di passi temporali per riempire lo stampo è quindi uguale al numero totale di nodi nella mesh.



Volume di controllo associato a ciascun nodo e fattore di riempimento

RTM-Worx

Un sistema che adatta tale modello per la simulazione numerica del processo di impregnazione è RTMWORX della POLIWORX.

RTM-Worx è un sistema interattivo integrato per la simulazione del processo Resin Transfer Moulding basato su una combinazione del metodo di analisi degli elementi finiti e quello dei volumi finiti.

Sebbene è nato originariamente come programma per la simulazione del processo R.T.M., esso 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 R.I.F.T..

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 ed il numero dei punti di iniezione e le caratteristiche del materiale in breve tempo.

LA SIMULAZIONE NUMERICA

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.

Poiché il pre-processore, il simulatore e il post-processore sono integrati è possibile lavorare in modo facile e veloce in ogni singolo ambiente del programma evitando di dover passare da un'applicazione ad un'altra.

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

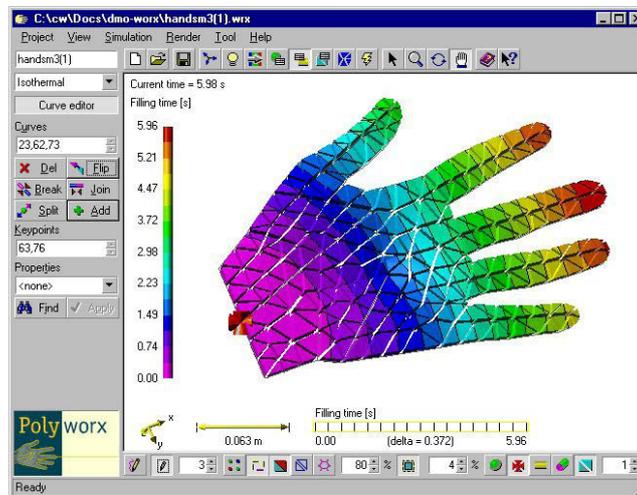
- geometria del laminato;
- viscosità della resina (alla temperatura di iniezione);
- frazione volumetrica di fibre nel laminato e permeabilità delle fibre.

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

L'interfaccia di RTM-Worx rappresenta uno spazio di lavoro nel quale il display del modello occupa una posizione centrale e tutti gli strumenti necessari per costruire e modificare il modello, eseguire la simulazione e visualizzare proprietà e risultati sono localizzati intorno al display stesso.

Nella figura è raffigurato un esempio dell'interfaccia grafica del programma:



Finestra principale.

Il layout della finestra è organizzato intorno al display del modello; al di sopra e al di sotto di quest'ultimo ci sono rispettivamente la barra principale e la barra di esecuzione mentre a sinistra è situato il pannello di controllo che contiene i comandi ed i campi da compilare.

La *barra principale* contiene i comandi che si usano maggiormente; questi ultimi sono raggruppati in modo logico, così come è mostrato nella figura:



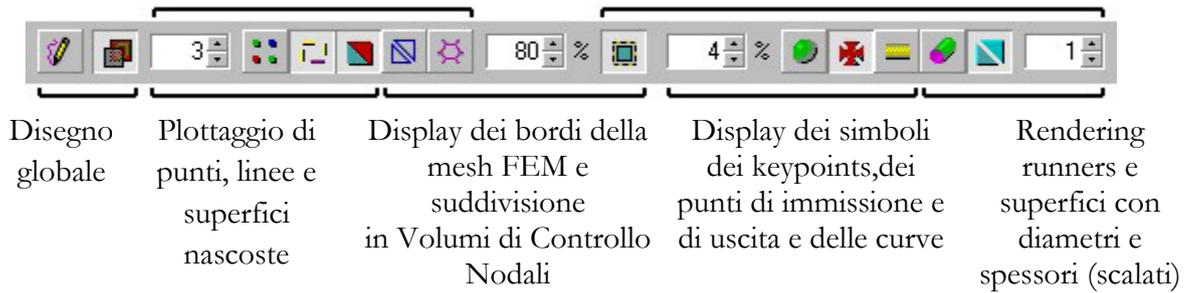
Barra principale .

La *barra render* mette in evidenza i cambiamenti e le graduazioni che influenzano il display del modello e mostra quali sono le graduazioni correnti.

Display classico di un
programma FEM

Display 3D

LA SIMULAZIONE NUMERICA

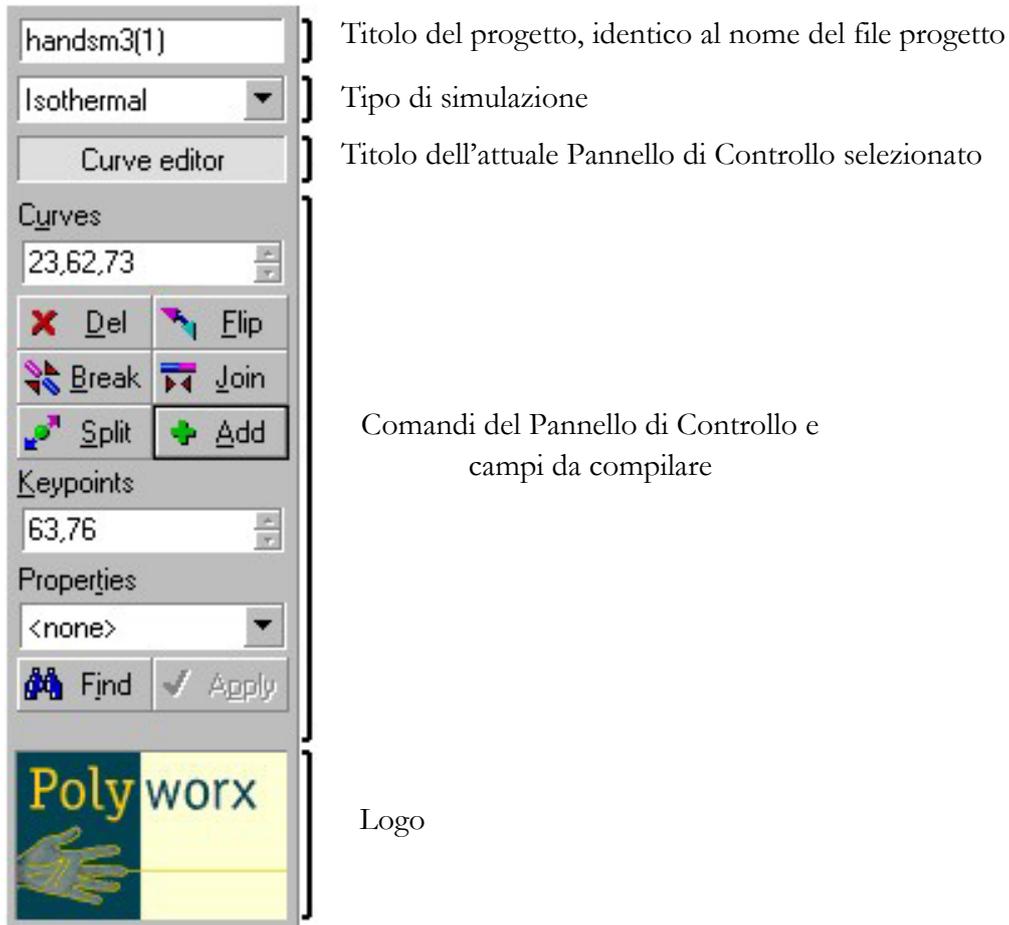


Barra render.

Tutti i comandi di questa barra sono disponibili anche nel menu dei comandi nel Render menu. Per quanto riguarda i campi compilati, di seguito ne viene fornita una breve descrizione:

- 3 pixels: dimensione dei punti.
- 80% : dimensione degli elementi. Questo valore rappresenta il fattore di restringimento degli elementi finiti costituiti da triangoli sulle superfici e da cerchi attorno alle strisce.
- 2% : dimensione dei simboli. Questo valore individua la dimensione dei simboli relativa alla dimensione del modello; quest'ultima è definita come il diametro della più piccola sfera nella quale verrà inserita la geometria. La dimensione dei simboli è utilizzata come raggio dei simboli dei keypoints e diametro delle curve ordinarie rappresentate come tubi 3D.
- 1: fattore di scala. Per la rappresentazione di superfici 3D, il diametro o la spessore sono rispettivamente moltiplicati per tale valore.

Il *pannello di controllo* è utile se si sta usando la tastiera per inserire una lista di numeri oppure se si preferisce lavorare con comandi che contengono sia immagini che il testo.

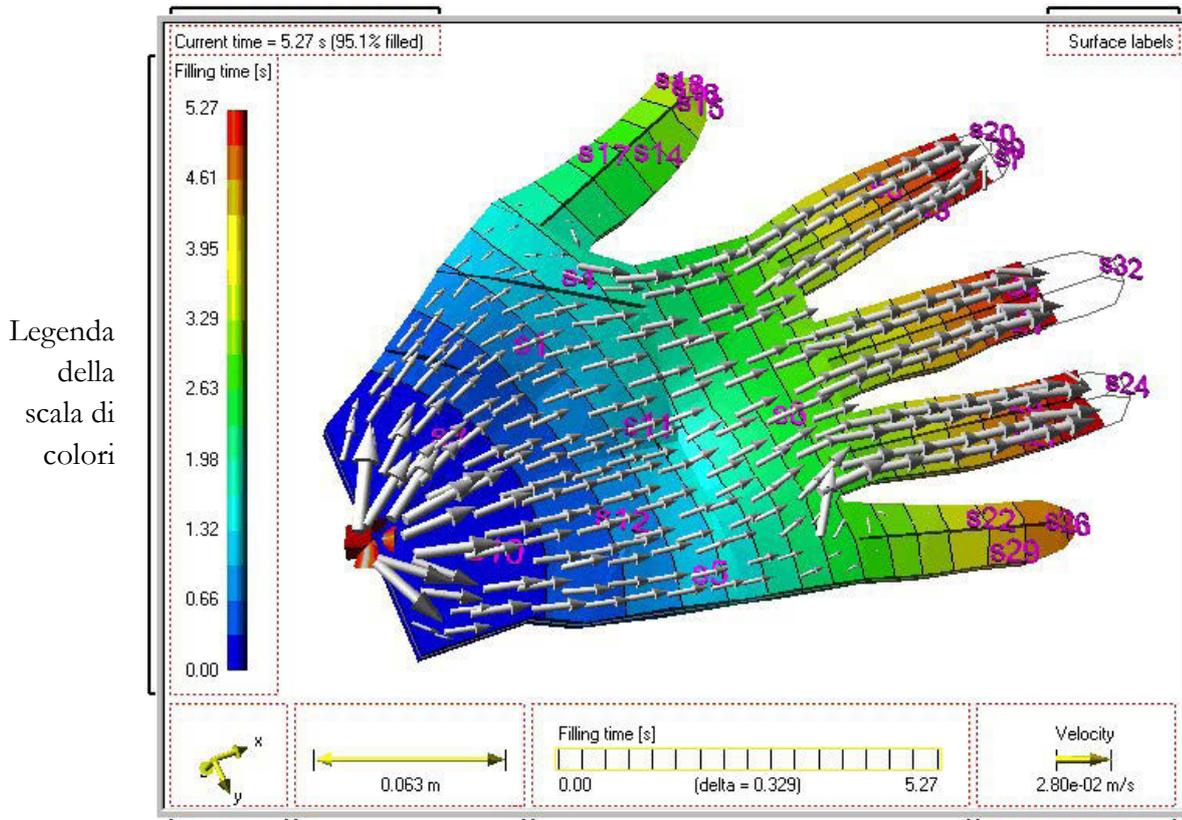


Pannello di controllo.

La maggior parte dello schermo, come già detto, è utilizzata per mostrare il modello. L'area "display" include gli assi coordinati per indicare l'orientazione del modello ed un righello per la misura delle dimensioni. Le voci "tempo attuale" e "percentuale di riempimento" sono collocate nell'angolo in alto a sinistra. Sono presenti anche delle legende.

Tempo attuale e
percentuale di riempimento

Labeling
legenda



Coordinate dell'oggetto

Riga

Legenda di plottaggio delle linee di contorno

Legenda di plottaggio del vettore

Area display.

RTM-Worx offre un'elevata flessibilità del display del modello; infatti è possibile cambiare opzioni e parametri relativamente alla direzione e alla scala di visualizzazione, ai colori, ai riflessi, ai punti, alle linee, alle superfici, alla mesh, alle proprietà del modello ed ai risultati.

Modellazione

Le fasi tipiche della modellazione in RTM-Worx sono:

1. Creazione o importazione della geometria.
2. Introduzione delle proprietà delle superfici.
3. Definizione dei punti di immissione e di uscita della resina.
4. Generazione della mesh.
5. Introduzione della viscosità della resina e dei parametri di calcolo.

LA SIMULAZIONE NUMERICA

6. Soluzione del modello.

7. Analisi dei risultati.

Di seguito verranno analizzate le fasi sopraelencate.

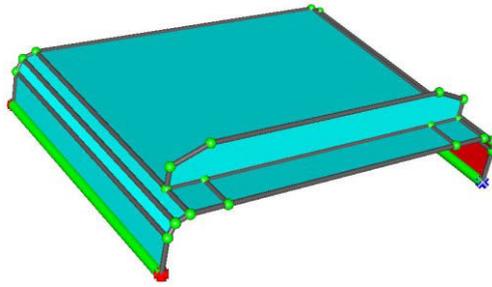
Creazione o importazione della geometria. L'interfaccia grafica di RTM-Worx contiene una serie di strumenti CAD per la modellazione geometrica ma è anche possibile importare geometrie complesse realizzate utilizzando altri programmi.

In RTM-Worx viene utilizzata una superficie modello per descrivere la geometria di un oggetto; ogni oggetto geometrico è automaticamente suddiviso in elementi in modo da generare la mesh che serve per il calcolo FEM.

RTM-Worx fornisce tre entità di base per creare la superficie modello:

- I keypoints per definire gli angoli del modello, il minimo numero di vertici necessari a specificare un bordo curvo ed i punti di immissione e di uscita della resina. I keypoints servono anche per imporre il raffinamento della mesh.
- Le curve per definire i contorni delle superfici, i canali di scorrimento della resina.
- Le superfici per definire i volumi del prodotto con o senza rinforzo. Assegnando uno spessore ad una superficie, questa diventa un volume che può essere riempito con della resina.

Nella figura 64 è riportato un esempio di superficie modello in cui è i keypoints sono rappresentati da piccole sfere e le curve da bastoncini circolari.

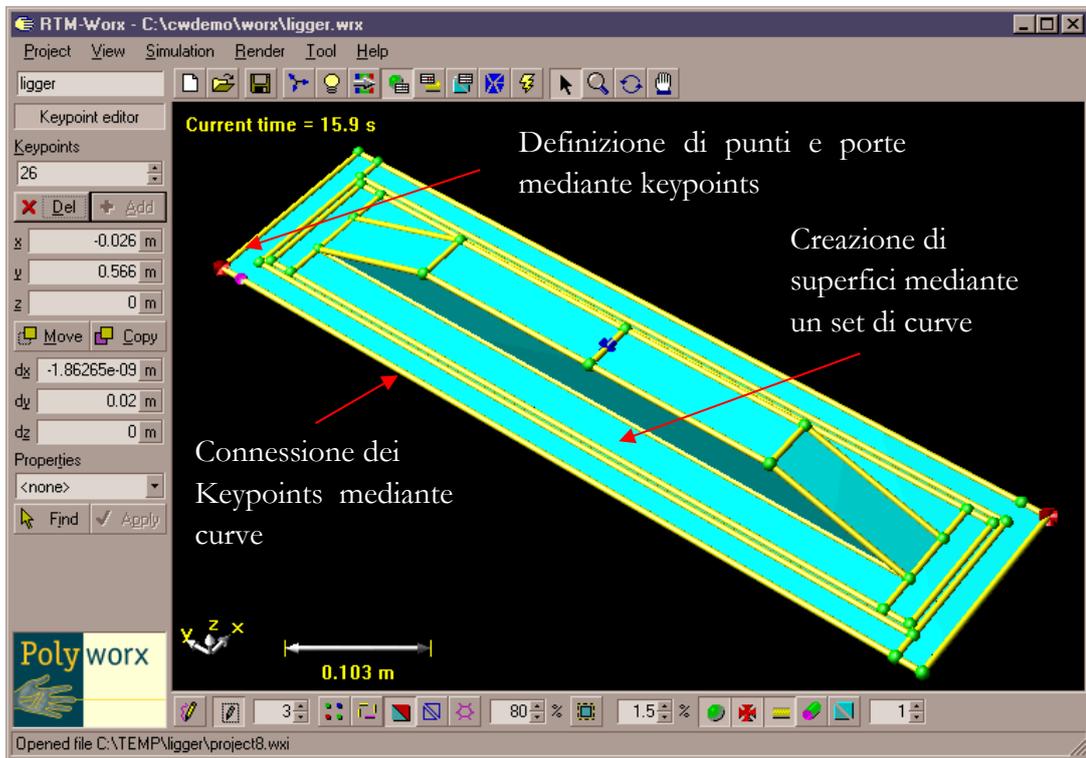


Superficie modello.

Vengono così inserite le coordinate x , y e z dei “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.

È opportuno ricordare che per simulare il flusso di resina è necessario che tutte le parti siano connesse; in caso contrario la resina non potrà fluire da una parte all'altra.

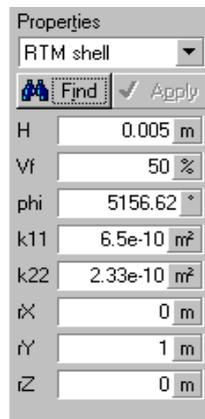
Nella figura 65 sono rappresentate le fasi di realizzazione della geometria precedentemente descritte.



Creazione della geometria.

Introduzione delle proprietà delle superfici. 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:

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



Maschera delle proprietà delle superfici.

È necessario specificare a proposito delle informazioni da inserire nella sezione comandi, che in questo programma FEM non è 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 questa formula ha mostrato in studi precedenti [179] una non perfetta aderenza ad esperimenti similari a quelli effettuati in questo lavoro. Al fine di migliorare i risultati ottenuti con la simulazione FEM è stato utilizzato, per il calcolo della permeabilità, il valore della permeabilità equivalente ottenuto utilizzando la teoria dell’analogia elettrica, considerando che i due flussi sono paralleli. La permeabilità viene dunque 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.

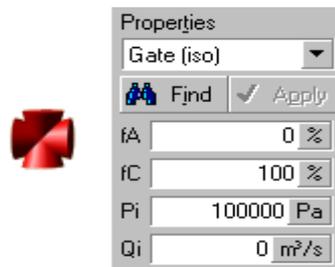
Definizione dei punti di immissione e uscita della resina. I punti di iniezione e uscita della resina sono definiti aggiungendo delle proprietà ai keypoints; dunque è semplice

LA SIMULAZIONE NUMERICA

cambiare questi punti. È necessario definire fin dall'inizio il punto di immissione altrimenti non accade nulla effettuando la simulazione.

Il punto di immissione (Gate) ha bisogno di altre due informazioni rispetto ai punti normali (figura 67):

- Pressione massima di iniezione
- Portata massima erogabile di resina



Maschera del punto di immissione della resina.

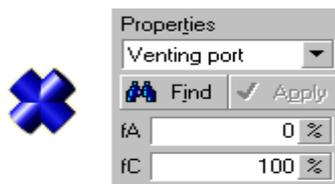
È inoltre necessario specificare la percentuale di riempimento dello stampo quando viene aperto il gate (fA) e quando viene chiuso il punto di uscita (fC).

La pressione definita all'ingresso corrisponde con la differenza di pressione tra il punto di immissione e quello di uscita della resina; la pressione in corrispondenza del fronte de flusso e all'uscita è posta infatti pari a zero dal programma.

Il punto di uscita è opzionale ed è possibile effettuare la simulazione senza averlo selezionato per capire la sua locazione ottimale.

Anche il punto di uscita (Venting Port) ha bisogno di due informazioni aggiuntive rispetto ai normali punti:

- Tempo di inizio apertura valvole
- Tempo di chiusura valvole



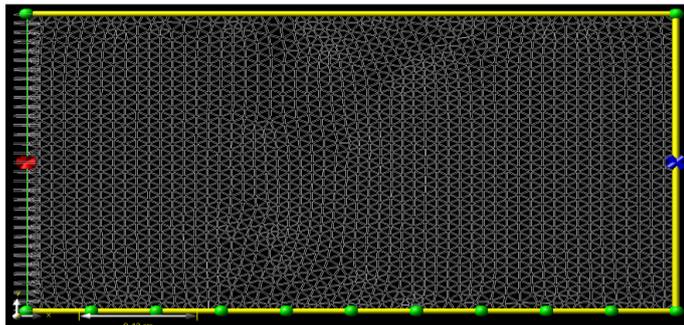
Maschera del punto di aspirazione.

LA SIMULAZIONE NUMERICA

Anche in tal caso è necessario specificare le percentuali fA ed fC.

Generazione della mesh. Una volta che sono state assegnate tutte le caratteristiche ai vari elementi che compongono il pezzo, questo va meshato (figura 69).

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



Esempio di superficie meshata.

Aumentando il numero di elementi della mesh aumenta l'accuratezza del risultato, contemporaneamente però incrementa anche il tempo di calcolo.

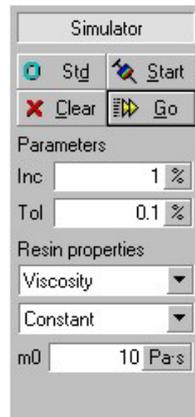
Il pannello di controllo “mesh generator” riportato in figura, contiene quattro parametri per il controllo della generazione della mesh e una serie di comandi che è possibile utilizzare per cambiare velocemente la dimensione della mesh e per rimesciare il modello.



Pannello “mesh generator”.

LA SIMULAZIONE NUMERICA

Introduzione della viscosità della resina e dei parametri di calcolo. Nel pannello di controllo “simulator” vengono introdotti i parametri di calcolo e le proprietà della resina, come mostrato in figura.



Pannello “simulator”.

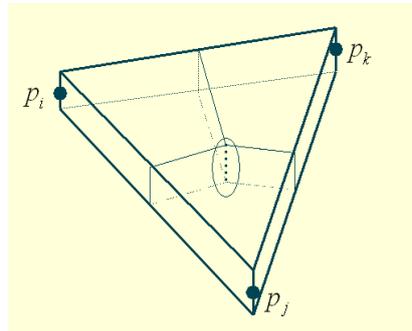
Per quanto riguarda i parametri di calcolo, è possibile modificarli senza perdere i risultati della simulazione. I comandi sono:

- Inc : incremento di riempimento tra gli steps di tempo da salvare (poiché i risultati del calcolo sono salvati come fotografie istantanee, 1% significa che 101 fotografie istantanee verranno salvate durante il riempimento).
- Tol : principio di terminazione per calcoli interattivi. Per il calcolo della pressione questo valore corrisponde all'errore relativo permesso per le velocità di flusso nodali.

Nella parte inferiore del pannello si possono selezionare le proprietà della resina da definire ed il modello di materiale da utilizzare per le proprietà. Nel caso di simulazione isoterma l'unica proprietà della resina è la viscosità costante, come mostrato.

Soluzione del modello. Il simulatore calcola la pressione che agisce nei vari punti del laminato, la posizione del fronte del flusso ed il tempo di riempimento.

Il calcolo delle pressioni avviene effettuando la media delle pressioni agenti ai vertici del triangolo e considerando questa pressione agente nel baricentro della figura in esame.

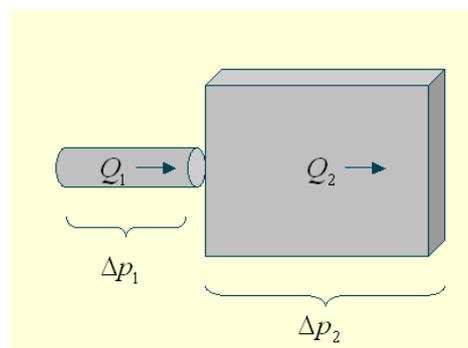


Calcolo della pressione agente su un triangolo della mesh.

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 73), l'equazione di conservazione della massa può essere scritta come:

$$Q_1=Q_2$$



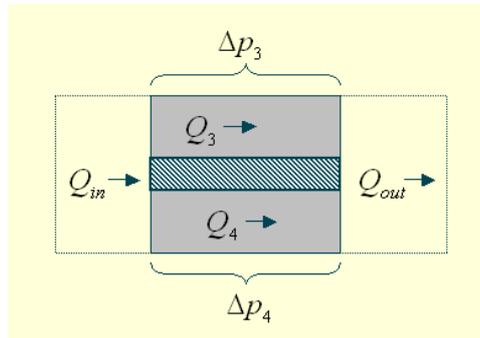
Elementi posti in serie.

e quindi:

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

Per elementi posti in parallelo (figura 74), invece, il bilancio di massa porta a:

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



Elementi posti in parallelo

e quindi:

$$\Delta P_3 = \Delta P_4$$

Per il calcolo del tempo di impregnazione del rinforzo, nel caso di una piastra di lunghezza L e di una differenza di pressione costante ΔP , la formula che approssima il risultato numerico del programma è la seguente:

$$t_{fill} = C \frac{\eta L^2 \phi}{\Delta p K}$$

in cui Φ è la porosità del rinforzo e C è una costante che varia a seconda della strategia di iniezione. Nel caso in esame questa costante vale 0,5 quindi la formula si particolarizza nella seguente:

$$t_{fill} = \frac{\phi \eta L^2}{2 K \Delta p}$$

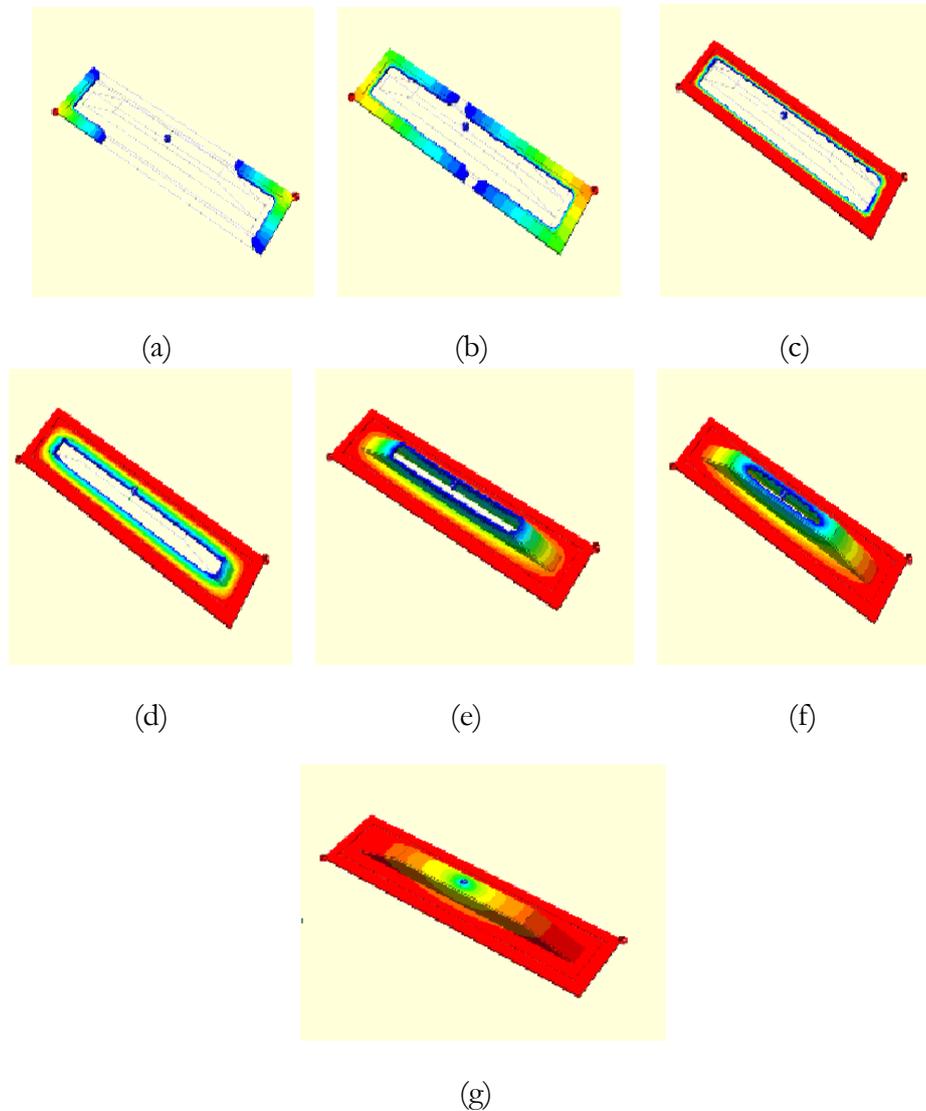
Da questa formula è possibile ricavare la posizione del fronte del flusso:

$$x(t) = \sqrt{\frac{2 K \Delta p}{\eta \phi} t}$$

ed il valore della permeabilità K :

$$k = \frac{\Phi \eta L^2}{2 \Delta P t_{fill}}$$

Analisi dei risultati. Terminata la simulazione di impregnazione del pezzo, è possibile vedere i risultati attraverso il post-processore:



Fasi della simulazione di impregnazione di un laminato :(a) inizio del processo; (b), (c), (d), (e), (f) steps intermedi; (g) fine del processo.

Il processo di impregnazione 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 matematici. 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

LA SIMULAZIONE NUMERICA

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. Anche 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. Questo fa capire l’importanza del ruolo che ricoprono tali software per la progettazione della strategia di infusione che sempre più spesso consentendo un notevole risparmio sia economico che temporale.

Implementazione del modello matematico

Il problema definito nel capitolo 4 va risolto mediante l'implementazione di un codice di calcolo automatico che può essere riassunto nel diagramma di flusso che segue:

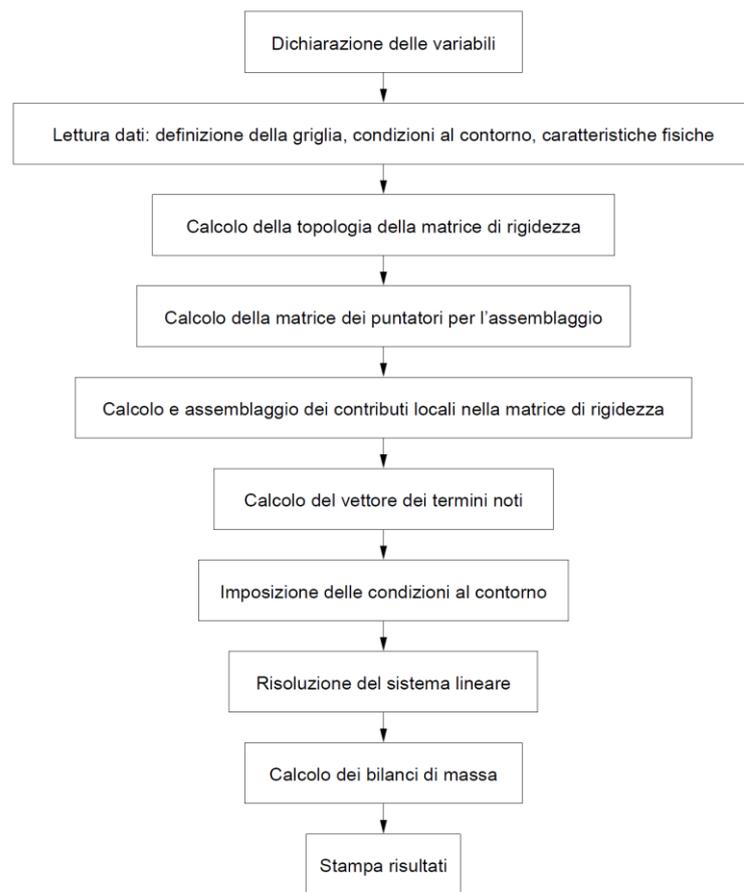
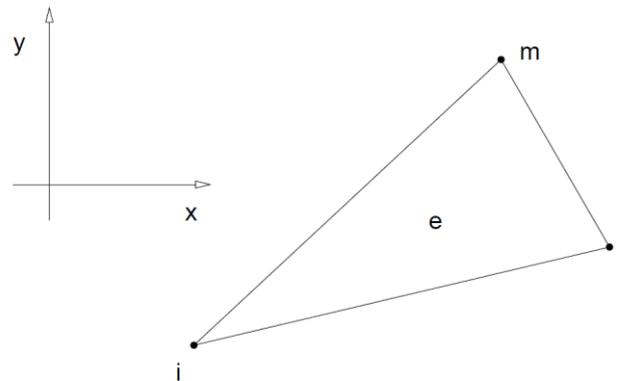


Diagramma di flusso per il codice FEM

Si consideri una suddivisione del dominio S in elementi triangolari. La triangolazione o mesh è individuata da una tabella che fornisce per ciascun elemento la successione in senso antiorario degli indici dei nodi che lo caratterizzano. Generalmente, si introduce anche un indice finale che individua la zona di appartenenza del triangolo. Tale indice viene utilizzato per la definizione delle caratteristiche fisiche del dominio che possono variare da zona a zona. Ad esempio, si possono utilizzare indici diversi per identificare

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

zone con una diversa permeabilità. Ciascun nodo è, infine, determinato da una coppia di coordinate cartesiane x e y.



Generico elemento triangolare i, j, m

Nella definizione della griglia è importante individuare le zone del contorno del dominio caratterizzate da condizioni di Dirichlet (condizioni sulla pressione, $u = \bar{u}$), di Neumann (condizioni sulla portata, $q = T \nabla u \cdot \mathbf{n} = q_n$) o miste.

Generalmente, il contorno del problema viene determinato indicando i nodi che lo compongono e la corrispondente condizione, vale a dire il valore di pressione laddove si imponga Dirichlet ed il valore della portata laddove si imponga Neumann.

La definizione della mesh, e cioè della tabella dei triangoli, delle coordinate nodali e dei nodi al contorno, viene ottenuta utilizzando il programma CAD “CatiaV5” di Dassault Systemes che a partire dal modello tridimensionale della parte consente di salvare lo stesso in formato .stl che rappresenta un modello la cui superficie è stata discretizzata in triangoli. Un file .stl, in formato binario o ASCII, consiste delle coordinate X, Y e Z ripetute per ciascuno dei tre vertici di ciascun triangolo, con un vettore per descrivere l'orientazione della normale alla superficie. Il formato .stl presenta dei vantaggi quali la semplicità, in quanto risulta molto facile da generare e da processare, mentre a suo sfavore presenta una geometria approssimata e la sua struttura dati, che pur risultando semplice, può presentare la ripetizione dello stesso vertice più volte.

La matrice di rigidezza, A

La matrice di rigidezza A è costituita dal vettore degli indici di colonna JA e dal vettore delle posizioni degli elementi diagonali IA. Essi sono univocamente determinati dai contatti nodali definiti dalla mesh, i quali individuano tutti gli elementi potenzialmente non nulli della matrice di rigidezza. Poiché la matrice è simmetrica, si memorizzano solo gli elementi della parte triangolare alta e cioè solo gli elementi a_{ij} per cui $j \geq i$.

Per facilitare l'operazione di assemblaggio della matrice di rigidezza conviene definire un vettore di matrici di puntatori TRIJA. Il coefficiente TRIJA(i, j, k) individua la posizione a cui va aggiunto il contributo locale $a_{ij}^{(k)}$.

Calcolo ed assemblaggio dei contributi locali

Suddividiamo il dominio S in elementi triangolari e ed indichiamo con $p^{(e)}$ la soluzione approssimata sull'elemento e:

$$p^{(e)} = \sum_{k=1}^3 p_k w_k(x, y)$$

Nel generico elemento triangolare di $p^{(e)}$ varia linearmente in funzione delle variabili nodali p_i, p_j, p_m , che rappresentano la soluzione p sui nodi i, j, m. Le funzioni di forma w_k , infatti, sono calcolate utilizzando un'interpolazione lineare e sono convenientemente scelte in modo tale da:

- assumere valori non nulli solamente all'interno dell'elemento (supporto locale);
- valere 1 sul nodo cui sono associate e 0 sugli altri.

Esse assumono pertanto l'espressione:

$$w_i(x,y) = (a_i + b_i x + c_i y) / 2\Delta$$

$$w_j(x,y) = (a_j + b_j x + c_j y) / 2\Delta$$

$$w_m(x,y) = (a_m + b_m x + c_m y) / 2\Delta$$

Dove:

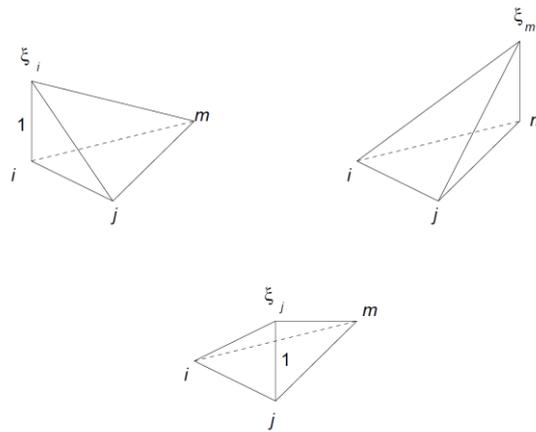
$$\Delta = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix}$$

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

Ed i coefficienti sono dati da:

$$\begin{aligned} a_i &= x_j y_m - x_m y_j & a_j &= x_m y_i - x_i y_m & a_m &= x_i y_j - x_j y_i \\ b_i &= y_j - y_m & b_j &= y_m - y_i & b_m &= y_i - y_j \\ c_i &= x_m - x_j & c_j &= x_i - x_m & c_m &= x_j - x_i \end{aligned}$$

L'andamento delle funzioni base è mostrato in figura:



Funzioni base lineari definite sul generico triangolo di vertici i, j, m .

Ricordando che:

$$A_{ij} = \int_{\Omega} \underline{\nabla} w_i \cdot \frac{K}{\eta} \underline{\nabla} w_j d\Omega$$

e che come funzioni base utilizziamo dei polinomi di interpolazione bidimensionali continui a tratti e con supporto locale l'espressione assunta dal coefficiente A_{ij} dell'equazione i -esima che moltiplica l'incognita p_j è il risultato dell'assemblaggio dei contributi locali $A_{ij}^{(e)}$.

Quindi:

$$A_{ij} = \sum_{(e)} A_{ij}^{(e)} = \sum_{(e)} \int_{\Omega^{(e)}} \underline{\nabla} w_i \cdot \frac{K}{\eta} \underline{\nabla} w_j d\Omega^{(e)}$$

Quindi il termine $A_{ij}^{(e)}$, risulta essere pari a:

$$A_{ij}^{(e)} = \frac{(k_{xx}b_i b_j + k_{yy}c_i c_j)}{4\eta\Delta}$$

Nel caso in cui $k_{xx}=k_{yy}=k$ diventa:

$$A_{ij}^{(e)} = \frac{k(b_i b_j + c_i c_j)}{4\eta\Delta}$$

Quindi la matrice di rigidezza locale $A^{(e)}$ per una elemento a tre nodi diventa:

$$A^{(e)} = \frac{1}{4\eta\Delta} \left\{ k_{xx} \begin{pmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_m \\ b_j b_i & b_j b_j & b_j b_m \\ b_m b_i & b_m b_j & b_m b_m \end{pmatrix} + k_{yy} \begin{pmatrix} c_i c_i & c_i c_j & c_i c_m \\ c_j c_i & c_j c_j & c_j c_m \\ c_m c_i & c_m c_j & c_m c_m \end{pmatrix} \right\}$$

nel caso in cui $k_{xx}=k_{yy}=k$:

$$A^{(e)} = \frac{k}{4\eta\Delta} \left\{ \begin{pmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_m \\ b_j b_i & b_j b_j & b_j b_m \\ b_m b_i & b_m b_j & b_m b_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_i c_i & c_i c_j & c_i c_m \\ c_j c_i & c_j c_j & c_j c_m \\ c_m c_i & c_m c_j & c_m c_m \end{pmatrix} \right\}$$

Da queste espressioni si comprende come la permeabilità possa variare da elemento ad elemento a seconda della zona in cui è posizionato l' elemento stesso e quindi della configurazione del tessuto da impregnare.

I contributi $A^{(e)}$ vanno assemblati nella matrice di rigidezza globale A attraverso la matrice dei puntatori TRIJA, costruendo in tal modo il vettore reale SYSMAT dei termini non nulli della matrice di rigidezza. La matrice locale $A^{(e)}$ è singolare. Infatti la somma delle righe (colonne) produce la riga (colonna) nulla. Ciò comporta ovviamente che anche la matrice globale A sia singolare e quindi ammette un'infinita di soluzioni. L'imposizione delle condizioni al contorno, trasforma la H in una matrice regolare. Le condizioni al contorno si impongono pre-assegnando il valore del potenziale nella fase di soluzione del sistema globale. Per far questo sarebbe necessario imporre un valore unitario al termine diagonale corrispondente

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

al nodo di Dirichlet, azzerare tutti gli elementi extra diagonali della riga e della colonna corrispondenti, ed uguagliare il termine noto al valore della condizione di Dirichlet. Poiché è piuttosto complesso, data la simmetria di H e la sua memorizzazione compatta, cercare tutti i termini extra diagonali relativi alla colonna del nodo di Dirichlet, conviene sostituire l'elemento diagonale della matrice di rigidezza con un valore molto grande, ad esempio $R_{max} = 10^{15}$, ed uguagliare il termine noto corrispondente al valore di Dirichlet moltiplicato per R_{max} . Poiché la matrice di rigidezza H è sparsa, simmetrica e definita positiva, il sistema lineare, risultante dalle procedure di assemblaggio dei contributi locali sugli elementi e del termine noto, e dall'imposizione delle condizioni al contorno, viene risolto con il metodo del Gradiente Coniugato Modificato (GCM). La correttezza della soluzione è molto spesso controllata verificando che il principio di conservazione della massa venga rispettato. Quindi si deve calcolare la massa di liquido che entra nel dominio e verificare che questa sia uguale alla massa che esce dal dominio stesso.

La massa entrata o uscita dai nodi di Dirichlet si determina semplicemente moltiplicando per il vettore soluzione la matrice di rigidezza H , come calcolata prima dell'imposizione delle condizioni al contorno. Per fare ciò è necessario salvare i coefficienti diagonali della matrice H prima che essi siano modificati dall'imposizione delle condizioni al contorno.

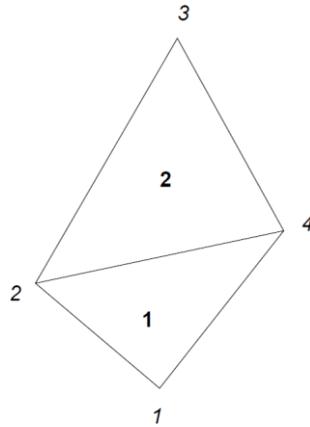
La massa entrata o uscita dai nodi di Neumann è data direttamente dal valore della portata assegnata in quei nodi moltiplicata per la lunghezza del bordo afferente al nodo. Il bilancio di massa viene eseguito sommando algebricamente i valori ottenuti per ciascun nodo di Dirichlet e di Neumann. Se la soluzione è corretta, il risultato deve essere teoricamente nullo. In pratica il bilancio di massa si considera comunque numericamente soddisfatto se la differenza fra massa entrante e massa uscente è ad una frazione sufficientemente piccola (entro il 5%) della stessa massa entrante od uscente.

Assemblaggio della matrice di rigidezza

La topologia della matrice di rigidezza, vale a dire l'ubicazione dei coefficienti non nulli in A , descritta nella memorizzazione compatta dai vettori interi J_A e I_A , è determinata univocamente

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

dalla mesh di calcolo con cui si è discretizzato il dominio di interesse. In particolare, è la rete dei contatti nodali nella maglia computazionale a stabilire la posizione degli elementi non nulli di A . Gli elementi non nulli della riga i corrispondono infatti agli indici di colonna j dei nodi con cui i risulta in contatto. È ovvio che se il nodo i è in contatto con il nodo j , anche j sarà in contatto con i , e quindi la matrice A avrà una topologia simmetrica. Risulta pertanto sufficiente memorizzare le posizioni a_{ij} per cui $j \geq i$. A partire dalla tabella dei contatti nodali, definita dalla mesh, è dunque possibile costruire i vettori JA e IA che individuano la topologia di A . Di seguito sarà descritta brevemente la procedura di assemblaggio della matrice di rigidezza A .



Mesh formata da due elementi triangolari

4	:	numero di nodi n
1	x_1	y_1
2	x_2	y_2
3	x_3	y_3
4	x_4	y_4

Numero di nodi e coordinate nodali

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

$$\begin{array}{cccc}
 & 2 & & : \text{numero di elementi } ne \\
 1 & 2 & 1 & 4 & 1 \\
 2 & 4 & 3 & 2 & 1
 \end{array}$$

Numero di elementi, indice dei nodi in ordine antiorario ed indice di zona

Dai contatti nodali si deduce che la matrice di rigidezza, di dimensione $n \times n$, avrà la seguente forma:

$$\begin{bmatrix}
 a_{1,1} & a_{1,2} & 0 & a_{1,4} \\
 a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} \\
 0 & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} \\
 a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} & a_{4,3}
 \end{bmatrix}$$

Grazie alla simmetria di A , si memorizza la sola parte triangolare alta inclusa la diagonale principale. Quindi il vettore JA degli indici di colonna di $nt = 9$ componenti risulta:

$$\mathbf{JA} = 1 \ 2 \ 4 \ 2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 4 \ 4$$

mentre il vettore IA di $n + 1 = 5$ componenti contenente le posizioni in SYSMAT, e quindi in JA , degli elementi diagonali è:

$$\mathbf{IA} = 1 \ 4 \ 7 \ 9 \ 10$$

Sia $n1$ il massimo numero di contatti nodali ammessi dalla mesh, cioè il massimo numero di elementi non nulli che possiamo trovare su ciascuna riga di A . Nel caso in esame, $n1 = 4$ e di conseguenza il massimo numero di elementi non nulli da memorizzare sarà $nt = n1 \cdot n = 16$.

Il vettore JA viene generato come una successione di nt componenti intere, inizialmente nulle, che possiamo interpretare come n celle, corrispondenti alle n righe di A , ciascuna composta di $n1$ elementi. In esse andranno inseriti gli indici di colonna degli elementi non nulli incontrati in ciascuna riga:

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Il primo elemento di ogni cella corrisponde all'elemento diagonale, il cui indice di colonna j è uguale all'indice di riga i . Ciò significa che la prima componente di ogni cella deve essere pari all'indice della cella stessa, cioè sarà 1 nella prima cella, 2 nella seconda, e così via:

1	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	4	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Per determinare i vari contatti nodali si esegue un ciclo sugli elementi della mesh. Si consideri il triangolo 1 definito dalla successione di nodi 2, 1, 4. Poiché nella cella i vanno inseriti solo i contatti nodali relativi alla parte triangolare alta di A , cioè gli indici j tali che $j \geq i$, conviene ordinare gli indici dei nodi in senso crescente:

2 1 4 \rightarrow 1 2 4

Si osservi che tale successione ordinata è utile solamente ai fini della determinazione della topologia di A , mentre per il calcolo dei contributi locali va mantenuta la successione originaria in senso antiorario. È consigliabile, pertanto, fare uso di un vettore ausiliario $I1$ in cui memorizzare provvisoriamente la sequenza nodale ordinata in senso crescente. Con un ciclo sulle componenti di $I1$ nella prima cella vanno aggiunti i contatti nodali 2 e 4, nella seconda va aggiunto il contatto 4 e nella quarta non va aggiunto nulla:

1	2	4	0	2	4	0	0	3	0	0	0	4	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Seguiamo la medesima procedura per il triangolo 2. Viene creato il vettore $I1$ con la sequenza nodale ordinata in senso crescente:

4 3 2 \rightarrow 2 3 4

Nella seconda cella vanno aggiunti i contatti ai nodi 3 e 4. A causa del modo in cui vengono memorizzati gli indici di colonna in JA , l'intero 3 va inserito fra il 2 ed il 4 già presenti, spostando quindi l'ultimo indice avanti di una posizione. Inoltre, poiché il contatto con il nodo 4 è già stato individuato, null'altro va aggiunto alla seconda cella. Infine, nella terza cella va introdotto il contatto con il nodo 4:

1	2	4	0	2	3	4	0	3	4	0	0	4	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Nell'ultima cella non va mai aggiunto nessun contatto. Il vettore così determinato corrisponde, a meno degli zeri, al vettore JA cercato.

La costruzione del vettore IA è ora quasi immediata. La posizione dell'elemento diagonale della riga i corrisponde, infatti, al primo elemento della cella i in JA, vale a dire $(i-1) \cdot n1 + 1$. Il valore così determinato va quindi depurato del numero di zeri rimasti nelle celle precedenti.

Definita la topologia della matrice di rigidezza H mediante la costruzione dei vettori JA e IA, è necessario ricavare il vettore il coefficienti non nulli SYSMAT. La matrice globale A si ottiene da un processo di assemblaggio dei contributi locali calcolati su ciascun elemento finito che viene generalmente indicato con la seguente simbologia:

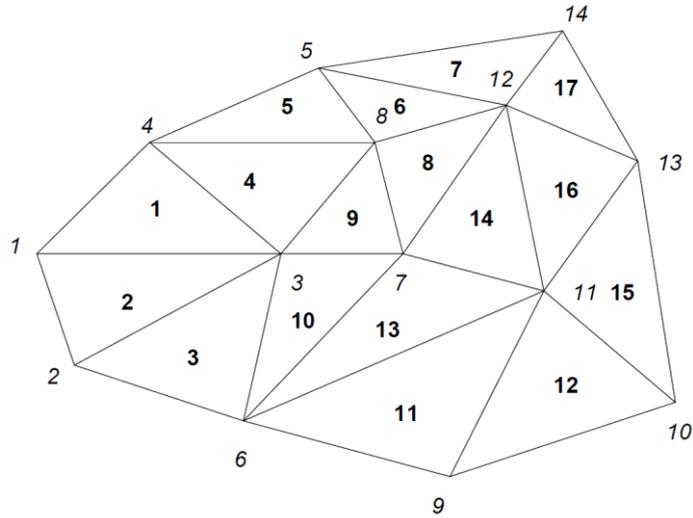
$$A_{i,j} = \sum_e A_{i,j}^{(e)}$$

I contributi locali sono contenuti in una matrice $A^{(e)}$ di dimensione $n^{(e)} \times n^{(e)}$, dove $n^{(e)}$ è il numero di nodi individuati nell'elemento finito prescelto. Ad esempio, con una griglia triangolare la matrice di rigidezza locale $A^{(e)}$ ha dimensione 3×3 .

Si consideri il generico elemento triangolare di nodi i, j, m , in cui i è il primo nodo, j il secondo ed m il terzo. L'operazione di assemblaggio viene eseguita collegando a ciascun elemento della matrice locale la posizione corrispondente nella matrice globale. Ad esempio, il coefficiente locale $a_{1,1}^{(e)}$, che si riferisce al primo nodo dell'elemento e , andrà collegato al coefficiente diagonale globale $a_{i,i}$, mentre il coefficiente $a_{1,2}^{(e)}$, che si riferisce all'interazione del primo col secondo nodo di e , va collegato ad $a_{i,j}$, e così via. Poiché ad uno stesso nodo concorrono più elementi finiti, ci sono più termini locali provenienti da diversi elementi che andranno collegati al medesimo termine globale. Essi perciò andranno sommati ai valori precedentemente accumulati nella matrice di rigidezza globale.

Consideriamo la mesh in figura:

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO



Volendo eseguire l'assemblaggio del contributo locale dell'elemento 13 caratterizzato dalla successione nodale 7, 6, 11. La matrice di rigidezza locale si collega ai nodi globali secondo il seguente schema:

	7	6	11
7	$a_{1,1}^{(13)}$	$a_{1,2}^{(13)}$	$a_{1,3}^{(13)}$
6	$a_{2,1}^{(13)}$	$a_{2,2}^{(13)}$	$a_{2,3}^{(13)}$
11	$a_{3,1}^{(13)}$	$a_{3,2}^{(13)}$	$a_{3,3}^{(13)}$

da cui si evince immediatamente che $a_{1,1}^{(13)}$ andrà collegato all'elemento $a_{7,7}$, $a_{1,2}^{(13)}$ all'elemento $a_{7,6}$, $a_{1,3}^{(13)}$ all'elemento $a_{7,11}$, e così via. A causa della simmetria di A , vengono memorizzati solo gli elementi relativi alla parte triangolare alta della matrice globale, per cui del contributo locale dato dal triangolo 13 interesseranno solamente gli elementi diagonali e quelli relativi ad $a_{6,7}$, $a_{6,11}$ ed $a_{7,11}$. per calcolare i termini globali di A si sommano i termini locali

che concorrono al medesimo nodo. Ad esempio, l'assemblaggio del termine diagonale $a_{7,7}$ viene effettuato sommando tutti i contributi locali derivanti dagli elementi che afferiscono al nodo 7. Nel caso in esame, si tratta degli elementi 8, 9, 10, 13 e 14, descritti nel modo seguente:

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

			...		
	8	8	7	12	1
	9	8	3	7	1
	10	3	6	7	1
			...		
	13	7	6	11	1
	14	7	11	12	1
			...		

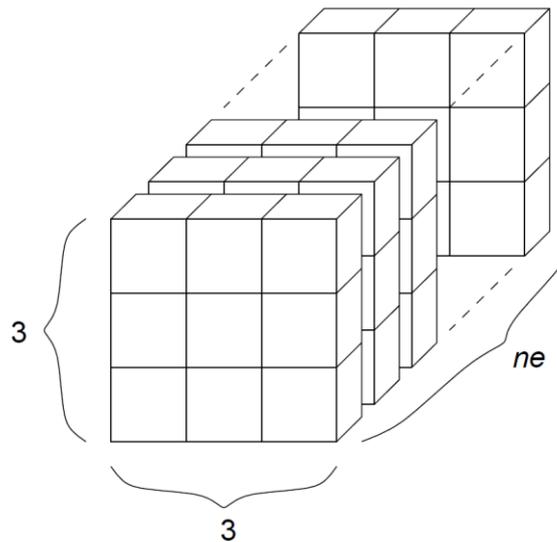
Quindi l' elemento globale $a_{7,7}$ risulta pertanto:

$$a_{7,7} = a_{2,2}^{(8)} + a_{3,3}^{(9)} + a_{3,3}^{(10)} + a_{(1,1)}^{(13)} + a_{1,1}^{(14)}$$

Ad esempio, l'elemento extra-diagonale $a_{7,11}$ riceve un contributo dai soli elementi che hanno in comune il lato definito dai nodi 7 e 11, cioè i triangoli 13 e 14. Dunque:

$$a_{7,11} = a_{1,3}^{(13)} + a_{1,2}^{(14)}$$

L'operazione di assemblaggio della matrice di rigidezza globale è resa più complessa dalla memorizzazione compatta di H. L'elemento globale $a_{i,j}$ va, infatti, sempre cercato nel vettore SYSMAT a partire dalla posizione IA(i) attraverso lo scorrimento delle componenti di JA. Per facilitare tale operazione, si può definire una matrice tridimensionale di puntatori denominata TRIJA:

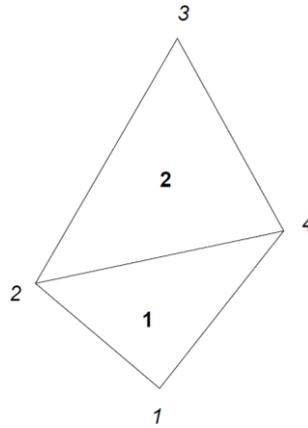


IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

Struttura della matrice tridimensionale dei puntatori TRIJA

La matrice TRIJA è un insieme di matrici 3 x 3 generate per ciascun elemento triangolare. L'elemento TRIJA_(i,j,k) individua l'indice *ind* della componente del vettore SYSMAT relativo alla matrice globale A a cui va aggiunto il contributo locale $a_{ij}^{(k)}$, cioè il termine in posizione (i,j) della matrice locale generata sull'elemento k.

Determiniamo, ad esempio, la componente della matrice TRIJA relativa all'elemento 2 della mesh riportata in figura:



Data la successione dei nodi 4,3,2, il contributo locale alla matrice di rigidità possiede la seguente struttura:

	4	3	2
4	$a_{1,1}^{(2)}$	$a_{1,2}^{(2)}$	$a_{1,3}^{(2)}$
3	$a_{2,1}^{(2)}$	$a_{2,2}^{(2)}$	$a_{2,3}^{(2)}$
2	$a_{3,1}^{(2)}$	$a_{3,2}^{(2)}$	$a_{3,3}^{(2)}$

La corrispondente matrice TRIJA(i, j, 2) ha coefficienti non nulli solo nei termini per cui, detti ii e jj gli indici globali dei nodi, vale $jj \geq ii$. Ad esempio, l'elemento $a_{1,1}^{(2)}$ corrisponde ad $ii = jj = 4$, cioè all'elemento diagonale della matrice globale $a_{4,4}$. La posizione *ind* in SYSMAT di tale elemento è individuata da IA(ii), vale a dire 9. Agli elementi $a_{1,2}^{(2)}$, $a_{1,3}^{(2)}$ e $a_{2,3}^{(2)}$ corrispondono indici $jj < ii$ e pertanto gli elementi ad essi

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

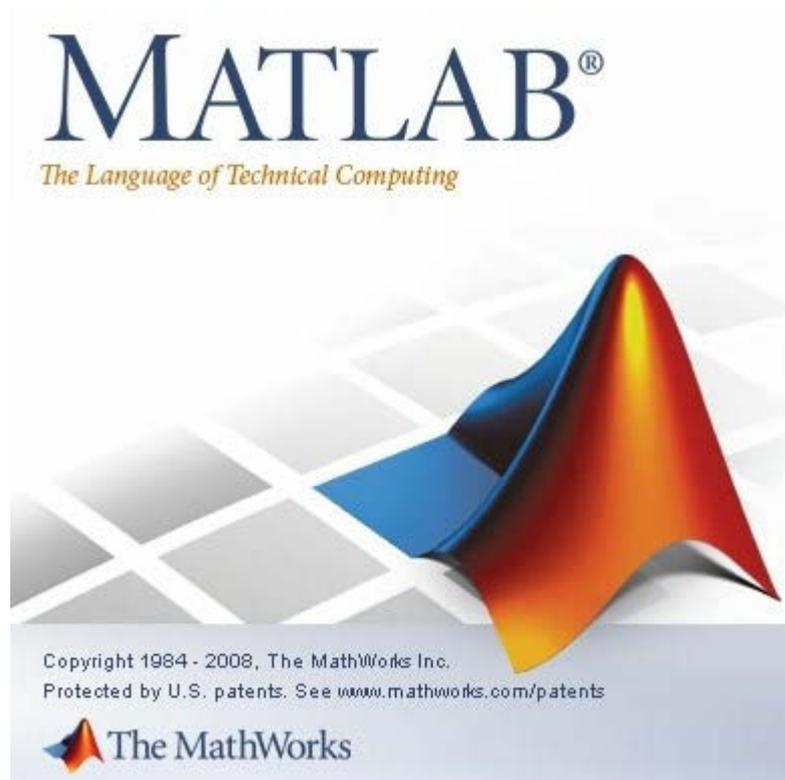
collegati in TRIJA sono nulli. L'elemento $a_{2,1}^{(2)}$ contribuisce, invece, al termine globale $a_{3,4}$, la cui posizione *ind* in SYSMAT è determinata partendo da IA(3) e scorrendo JA fintantoché si trova l'indice 4. Quindi, l'elemento corrispondente in TRIJA è 8. Per gli altri contributi locali, si trova TRIJA(i, j, 2):

$$\begin{array}{ccc} 9 & 0 & 0 \\ 8 & 7 & 0 \\ 6 & 5 & 6 \end{array}$$

Determinata la matrice dei puntatori TRIJA, è possibile proseguire con l'operazione di assemblaggio dei contributi locali sulla matrice globale che a questo punto diventa rapido.

Matlab

MATLAB® è un linguaggio di alto livello e un ambiente interattivo per il calcolo numerico, l'analisi e la visualizzazione dei dati e la programmazione. MATLAB consente di analizzare dati, sviluppare algoritmi e creare modelli e applicazioni. Fornisce anche numerosi metodi di calcolo numerico per analizzare dati, sviluppare algoritmi e creare modelli. Il linguaggio MATLAB include funzioni matematiche che supportano comuni operazioni scientifiche e ingegneristiche. Le principali funzioni matematiche utilizzano librerie ottimizzate per il processore per consentire una rapida esecuzione di calcoli vettoriali e matriciali.



La simulazione in MATLAB del flusso di resina

A partire dai modelli descritti in precedenza è stato sviluppato un algoritmo che consente di simulare numericamente il processo di impregnazione del flusso di resina.

Inoltre essendo il software completamente aperto, può essere riconfigurato inserendo nuovi modelli matematici che consentono di prevedere al meglio il processo di impregnazione, ma anche di simulare la cura della resina, la variazione dello spessore durante la fase di impregnazione per effetto della variazione di pressione (nel caso si utilizzi un sacco per il vuoto), la deformazione dello fibre.

Il programma può essere riassunto in pochi passi:

- Lettura della mesh in formato .stl
- Inserimento delle proprietà del tessuto da impregnare e della resina
- Inserimento delle condizioni iniziali
- Assemblaggio della matrice di rigidità
- Calcolo della funzione di riempimento
- Plottaggio della soluzione finale

Lettura della mesh in formato . stl

Va inserito il nome del file da leggere compreso dell' estensione .stl. Lo spessore va inserito in mm, che poi sarà convertito in metri dall' algoritmo (quindi compatibilmente con le altre unità di misura).

Il programma richiama la funzione `stload` (descritta in seguito) che consente di leggere i dati nel file.stl e di generare le mesh, ossia la sequenza ordinata di nodi ed elementi. Gli elementi della mesh devono essere di tipo triangolare. Una volta letta la mesh il programma attende che da tastiera vengano inserite le condizioni iniziali. Al termine il programma richiama diverse funzione (descritte più avanti) per la ricerca della soluzione ed il plottaggio dei risultati:

- `calcoloJA`
- `calcolotrija`
- `calcoloH`
- calcolo della soluzione e plottaggio dati
- `calcolomatricecompleta`
- `calcolosoluzione`

- calcolovettori
- calcolovolumedicontrollo
- calcoloriempimento

```

filename='laminato2025.stl';
stlread
% spessore in mm
spessore=1
%converte in metri lo spessore in metri
spessore=t/1000;
%spessore=spessore/1000;
% densità in kg/m3
rho=1080;
gamma=9.81*rho;
% dati
% viscosità [Pa/s]
mu=0.001;
% permeabilità[m^2]
k1=1^-9;
k2=1^-9;
K=[k1 0;0 k2];
%elimina i doppi nodi
[v,mv,nv]=unique(v,'rows','last');
f=nv(f);
nd=size(v,1);
% dimensione del vettore degli elementi
[ne,n]=size(f);
for i=1:ne
    temp=f(i,1);
    f(i,1)=f(i,3);
    f(i,3)=temp;
end
%condizioni iniziali
Pressione=zeros(nd,nd);
IN=zeros(nd,1);
ff=zeros(nd,nd);
%Dimensione del vettore IN
nin=size(IN,1);
trimesh(f,v(:,1),v(:,2),v(:,3));
th=text(v(:,1),v(:,2),v(:,3),...
        num2cell(1:size(v,1)),...
        'fontSize',12);
colormap(summer(256));
%inserire da tastiera le condizioni iniziali nel vettore IN()
keyboard
for i=1:nd
    Pressione(i,1)=IN(i,1);

```

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

```

    if IN(i,1)~=0
        ff(i,1)=1;
    end
end
% Dimensione del vettore OUT
% nout=size(OUT,1);
% for i=1:nout
%   Pressione(OUT(i,2),:)=OUT(i,4);
% end
ci=zeros(nd,nd);
X=zeros(nd,nd);
P=zeros(nd,nd);
% definizione della matrice di rigidità globale
calcoloJA
calcolotrija
calcoloH
calcolo della soluzione e plottaggio dati
calcolomatricecompleta
calcolosoluzione
calcolovettori
calcolovolumedicontrollo
calcoloriempimento

```

La funzione stread.

Questa funzione è disponibile in rete e si presenta come segue:

```

use_color=(nargout>=4);
fid=fopen(filename, 'r'); %Open the file, assumes STL Binary format.
if fid == -1
    error('File could not be opened, check name or path.')
end
if ~exist('verbose','var')
    verbose = false;
end
ftitle=fread(fid,80,'uchar=>schar'); % Read file title
numFaces=fread(fid,1,'int32'); % Read number of Faces
T = fread(fid,inf,'uint8=>uint8'); % read the remaining values
fclose(fid);
stltitle = char(ftitle);
if verbose
    fprintf('\nTitle: %s\n', stltitle);
    fprintf('Number of Faces: %d\n', numFaces);
    disp('Please wait...');
end
% Each facet is 50 bytes

```

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

```

% - Three single precision values specifying the face normal vector
% - Three single precision values specifying the first vertex (XYZ)
% - Three single precision values specifying the second vertex (XYZ)
% - Three single precision values specifying the third vertex (XYZ)
% - Two color bytes (possibly zeroed)
% 3 dimensions x 4 bytes x 4 vertices = 48 bytes for triangle vertices
% 2 bytes = color (if color is specified)
trilist = 1:48;
ind=reshape(repmat(50*(0:(numFaces-1))),[48,1],[1,48*numFaces])+repmat(trilist,[1,numFaces]);
Tri = reshape(typecast(T(ind),'single'),[3,4,numFaces]);
n=squeeze(Tri(:,1,:));
n=double(n);
v=Tri(:,2:4,:);
v = reshape(v,[3,3*numFaces]);
v = double(v)';
f = reshape(1:3*numFaces,[3,numFaces])';
if use_color
    c0 = typecast(T(49:50),'uint16');
    if (bitget(c0(1),16)==1)
        trilist = 49:50;
        ind=reshape(repmat(50*(0:(numFaces-
1))),[2,1],[1,2*numFaces])+repmat(trilist,[1,numFaces]);
        c0 = reshape(typecast(T(ind),'uint16'),[1,numFaces]);
        r=bitshift(bitand(2^16-1, c0),-10);
        g=bitshift(bitand(2^11-1, c0),-5);
        b=bitand(2^6-1, c0);
        c=[r; g; b]';
    else
        c = zeros(numFaces,3);
    end
end
if verbose
    disp('Done!');
end
[v,m1,n1]=unique(v,'rows','first')
f=n1(f)
trimesh(f,v(:,1),v(:,2),v(:,3));
th=text(v(:,1),v(:,2),v(:,3),...
        num2cell(1:size(v,1)),...
        'fontSize',12);
colormap(summer(256));

```

CalcoloJA, e TRIJA

Tali funzioni risultano disponibili in rete e che comunque sono state personalizzate si presentano nel modo seguente:

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

Calcolo JA:

```

n1=nd;
nt=n1*nd;
JA=zeros(1,nt);
for k=1:n1:nt
    JA(k)=(k+n1-1)/n1;
end
ord=zeros(1,3);
% riordino dei nodi degli elementi in senso crescente
for k=1:ne;
ord(k,:)=sort(f(k,:));
end

% alla fine del ciclo in I1 abbiamo la terna ordinata mentre in I2 i valori
% sono tutti pari a imax
%
% genera il vettore JA
for k=1:ne;
    for i=1:2;
        j=i+1;
        for q=j:3
            m=n1*(ord(k,i)-1)+q-j+2;
            mcontr=n1*ord(k,i);
            continua='false';
            while (((ord(k,q)-JA(m))<0) | (ord(k,q)-JA(m))>0) && continua=='false')
                if (ord(k,q)-JA(m))>0
                    if JA(m)==0
                        JA(m)=ord(k,q);
                        continua='true';
                    else
                        m=m+1;
                        if (m-mcontr)>=0
                            iii=mcontr/n1;
                            fprintf(' RIGA=%6.0f TRIANGOLO=%6.0f AUMENTARE n1 ',
                                iii,k);
                                break
                        else
                            continua='false';
                        end
                    end
                elseif (ord(k,q)-JA(m))<0
                    mm=m;
                    mm=mm+1;
                    if (m-mcontr)>=0
                        iii=mcontr/n1;

```

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

```

    fprintf(' RIGA=%6.0f TRIANGOLO=%6.0f AUMENTARE n1 ',
iii,k);
        break
    else
        continua2='false';
        while ((JA(mm)>0 | JA(mm)<0) && continua2=='false')
            mm=mm+1;
            if (m-mcontr)>=0
                iii=mcontr/n1;
                fprintf(' RIGA=%6.0f TRIANGOLO=%6.0f AUMENTARE
n1 ', iii,k);
                    break
                else
                    continua2='false';
                end
            end
            while JA(mm)==0
                JA(mm)=JA(mm-1);
                mm=mm-1;
                while mm>m
                    JA(mm)=JA(mm-1);
                    mm=mm-1;
                end
            end
        end
        JA(m)=ord(k,q);
    end
end
end
end
end
%
% costruisce il vettore LA
%
LA(1)=1;
m=1;
j=1;
for k=1:n1:nt;
    for i=1:n1;
        if JA(k+i-1)~=0
            m=m+1;
        end
    end
    j=j+1;
    LA(j)=m;
end
%
```

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

```
% compatta il vettore JA eliminando gli zeri
%
m=1;
for k=1:nt;
    if JA(k)~=0
        JA1(m)=JA(k);
        m=m+1;
    end
end
JA=JA1;
nt=m-1;
```

Calcolo TRIJA

```
trija=zeros(n,n,ne);
for k=1:ne
    for i=1:3
        ii=f(k,i);
        for j=1:3
            jj=f(k,j);
            if jj>=ii
                ind=IA(1,ii);
                if JA(ind)==jj
                    trija(i,j,k)=ind;
                else
                    while JA(1,ind)~=jj
                        ind=ind+1;
                    end
                    trija(i,j,k)=ind;
                end
            end
        end
    end
end
end
end
```

CalcoloH

Questa funzione a partire dai vettori che definiscono i contatti nodali e a partire dalle funzione di forma locali assembla la matrice di rigidezza globale:

```
[rJA,cJA]=size(JA);
H=zeros(1,cJA);
A=ones(3,3);
Area=zeros(ne,1);
e=zeros(ne,n);
He=zeros(3,3,ne);
```

```

% matrice che raggruppa i contributi locali degli elementi
for i=1:ne;
    % ordiniamo i nodi di ciascun elemento in ordine crescente
    ord=sort(f(1,:));
    % individuazione dei nodi di ciascun elemento
    for j=1:n;
        nodes(j)=f(i,j);
    end
    % calcolo dell' area
    for s=1:3;
        A(s,2)=v(nodes(s),1);
        A(s,3)=v(nodes(s),2);
    end
    % misura dell' area di ciascun elemento
    Area(i,1)=abs(1/2*det(A));
    % calcolo delle funzioni di forma
    % ai=xj*ym-xm*yj
    a(i,1)=v(f(i,2),1)*v(f(i,3),2)-v(f(i,3),1)*v(f(i,2),2);
    % bi=yj-ym
    b(i,1)=v(f(i,2),2)-v(f(i,3),2);
    % ci=xm-xj
    c(i,1)=v(f(i,3),1)-v(f(i,2),1);
    % aj=xm*yi-xi*ym
    a(i,2)=v(f(i,3),1)*v(f(i,1),2)-v(f(i,1),1)*v(f(i,3),2);
    % bj=ym-yi
    b(i,2)=v(f(i,3),2)-v(f(i,1),2);
    % cj=xi-xm
    c(i,2)=v(f(i,1),1)-v(f(i,3),1);
    % am=xi*yj-xj*yi
    a(i,3)=v(f(i,1),1)*v(f(i,2),2)-v(f(i,2),1)*v(f(i,1),2);
    % bm=yi-yj
    b(i,3)=v(f(i,1),2)-v(f(i,2),2);
    % cm=xj-xi
    c(i,3)=v(f(i,2),1)-v(f(i,1),1);
    % calcolo delle espressioni ei
    % e(i,1)=(a(1)+b(1)*x+c(1)*y)/(2*Area(i,1));
    % e(i,2)=(a(2)+b(2)*x+c(2)*y)/(2*Area(i,1));
    % e(i,3)=(a(3)+b(3)*x+c(3)*y)/(2*Area(i,1));
    % definiamo la matrice di rigidezza locale
    for s=1:3;
        for k=1:3;
            He(s,k,i)=(b(i,s)*b(i,k)+c(i,s)*c(i,k))/(4*Area(i,1));
        % calcolo della matrice di rigidezza
        if trija(s,k,i)~=0;
            H(1, trija(s,k,i))=He(s,k,i)+H(1, trija(s,k,i));
        end
    end
end

```

```

    end
end

```

Calcolo matrice completa

```

Hc=zeros(nd,nd);
k=1;
for i=1:nd
    l=IA(i+1);
    while k~l
        Hc(i,IA(k))=H(k);
        Hc(IA(k),i)=H(k);
        k=k+1;
    end
end
end

```

Calcolo soluzione

Questa funzione risolve il sistema di equazioni lineari a partire dalla matrice di rigidità globale utilizzando il metodo del gradiente coniugato pre-condizionato. Questo metodo è compreso tra le funzioni disponibili in MATLAB.

```

step=1;
for i=1:nd
    ci(i,step)=Pressione(i,step);
end
TF(:,step)=isnan(ci(:,step));
Rmax=10^14;
bf=zeros(nd,1);
Hcc=Hc;
for i=1:nd
    if TF(i,step)==0
        Hcc(i,i)=Rmax;
        bf(i)=ci(i,step)*Rmax/gamma;
    end
end
[X,flag(1,step),relres,iter(1,step)]=pcg(Hcc,bf,10^-22,1000000);
% plottaggio delle funzioni di forma
subplot(2,3,2)
P(:,step)=gamma*X;
%plot 3d della geometria
trisurf(f,v(:,1),v(:,2),v(:,3),P(:,step))
shading interp
title('Pressione')

```

Calcolovettori

A partire dai valori della pressione ottenuti dalla soluzione del sistema lineare calcola il gradiente di pressione e quindi genera le velocità di flusso in ogni elemento:

```

gradP=zeros(ne,2);
for i=1:ne
    for j=1:3
        gradP(i,1)=(b(i,j)*X(ff(i,j),1))/(2*Area(i))*gamma+gradP(i,1);
        gradP(i,2)=(c(i,j)*X(ff(i,j),1))/(2*Area(i))*gamma+gradP(i,2);
    end
end
% coordinate del baricentro
cbar=zeros(ne,2);
for i=1:ne
    cbar(i,1)=(v(ff(i,1),2)+v(ff(i,2),2)+v(ff(i,3),2))/3;
    cbar(i,2)=(v(ff(i,1),3)+v(ff(i,2),3)+v(ff(i,3),3))/3;
end
subplot(2,3,4)
[cbar1,cbar2,Z]=meshgrid(cbar(:,1),cbar(:,2),0);
trisurf(f,v(:,1),v(:,2),v(:,3))
hold on
plot(cbar(:,1),cbar(:,2),'o')
quiver(cbar(:,1),cbar(:,2),gradP(:,1),gradP(:,2),'b')
hold off
title('Vettore Gradiente')
%vettore velocità
vl=(-K*(gradP)')/mu;
subplot(2,3,5)
trisurf(f,v(:,1),v(:,2),v(:,3))
hold on
plot(cbar(:,1),cbar(:,2),'o')
quiver(cbar(:,1),cbar(:,2),vl(:,1),vl(:,2),'r')
hold off
title('Vettore Velocità')

```

Calcolo volume di controllo

Tale funzione genera i poligoni di controllo associati a ciascun nodo. Moltiplicando l'area di ciascun poligono per lo spessore del laminato si giunge ai volumi di controllo che dovranno essere riempiti. Essi contribuiranno al calcolo della funzione riempimento e del tempo di riempimento.

```

% coordinate del baricentro di ciascun elemento
cbar=zeros(ne,2);
for i=1:ne
    cbar(i,1)=(v(ff(i,1),1)+v(ff(i,2),1)+v(ff(i,3),1))/3;
    cbar(i,2)=(v(ff(i,1),2)+v(ff(i,2),2)+v(ff(i,3),2))/3;

```

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

```

end
% definizione del poligono
Pp1g=NaN(5,2,3,ne);
for i=1:ne
    for j=1:3
        t=0;
        for k=1:3
            if k~=j
                t=t+2;
                Pp1g(1,1,j,i)=v(f(i,j),1);
                Pp1g(1,2,j,i)=v(f(i,j),2);
                Pp1g(t,1,j,i)=(v(f(i,j),1)+v(f(i,k),1))/2;
                Pp1g(t,2,j,i)=(v(f(i,j),2)+v(f(i,k),2))/2;
                Pp1g(3,1,j,i)=cbar(i,1);
                Pp1g(3,2,j,i)=cbar(i,2);
                Pp1g(5,1,j,i)=v(f(i,j),1);
                Pp1g(5,2,j,i)=v(f(i,j),2);
            end
        end
    end
end
Dist2punti=zeros(4,3,ne);
% definizione vettori normali
Cv1g=NaN(4,2,3,ne);
for i=1:ne
    for j=1:3
        for t=2:3
            Cv1g(t,1,j,i)=-(Pp1g(t+1,2,j,i)-Pp1g(t,2,j,i));
            Cv1g(t,2,j,i)=Pp1g(t+1,1,j,i)-Pp1g(t,1,j,i);
            norma=norm(Cv1g(t,:,j,i));
            Cv1g(t,1,j,i)=Cv1g(t,1,j,i)/norma;
            Cv1g(t,2,j,i)=Cv1g(t,2,j,i)/norma;
            Dist2punti(t,j,i)=sqrt((Pp1g(t+1,1,j,i)-Pp1g(t,1,j,i))^2+(Pp1g(t+1,2,j,i)-Pp1g(t,2,j,i))^2);
        end
    end
end
% cambiamento coordinate dei vettori relativi al secondo nodo
for i=1:ne
    Cv1g(:,2,i)=-Cv1g(:,2,i);
end
% coordinate di punti di applicazione dei vettori normali
Pav1g=NaN(4,2,3,ne);
for i=1:ne
    for j=1:3
        for t=2:3
            Pav1g(t,1,j,i)=(Pp1g(t+1,1,j,i)+Pp1g(t,1,j,i))/2;
            Pav1g(t,2,j,i)=(Pp1g(t+1,2,j,i)+Pp1g(t,2,j,i))/2;
        end
    end
end

```

```

end
    end
end
%subplot(2,3,3)
for j=1:ne
    for i=1:3
        hold on
        plot(Pp1g(:,1,i,j),Pp1g(:,2,i,j))
        hold off
    end
end
scale=1/700;
for i=1:ne
    hold on
    for j=1:3
        for k=2:3
            quiver(Pavp1g(k,1,j,i),Pavp1g(k,2,j,i),Cvp1g(k,1,j,i),Cvp1g(k,2,j,i),scale,'r')
        end
    end
end
hold off
title('Volumi di Controllo')

% calcolo dell' area dei poligono

Areapoligoni=zeros(1,3,ne);
for i=1:ne
    for j=1:3
        Areapoligoni(1,1,j,i)=polyarea(Pp1g(:,1,j,i),Pp1g(:,2,j,i));
    end
end
Areavolumidicontrollo=zeros(nd,1);
for k=1:nd
    for i=1:ne
        for j=1:3
            if f(i,j)==k
                Areavolumidicontrollo(k,1)=Areavolumidicontrollo(k,1)+Areapoligoni(1,1,j,i);
            end
        end
    end
end
end
end

```

Calcolo riempimento

Tale funzione effettua il calcolo della funzione riempimento e genera il plottaggio finale della soluzione.

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

```

% calcolo del volume totale
filltime=0;
step=1;
Volumetotale=0;
for i=1:ne
    for j=1:3
        Volumetotale=Volumetotale+Areapoligoni(1,1,j,i)*spessore;
    end
end
% rapporto volume riempito / volume totale
portata=zeros(nd,nd);
Volumerimpito=0;
prodottoscalare=0;
%condizione di stop
tempo=NaN(nd,nd);
tempodiriempimento=zeros(1,nd);
% misura del volume di controllo
Volumedicontrollo=zeros(nd,1);
for i=1:nd
    for j=1:ne
        for k=1:3
            if ff(j,k)==i
                % calcolo del volume di controllo
                Volumedicontrollo(i,1)=Volumedicontrollo(i,1)+Areapoligoni(1,1,k,j)*spessore;
            end
        end
    end
end
end

% calcolo del riempimento
while step<10
    step
    calcolosoluzione
    for i=1:nd
        if ff(i,step)<1
            X(i)=0;
            P(:,step)=gamma*X;
        end
    end
    calcolovettori
    step=step+1;

    for i=1:nd
        if ff(i,step-1)<1;
            for j=1:ne
                for k=1:3
                    if ff(j,k)==i

```

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

```

        for t=2:3
            prodottoscalare=dot(vl(j,:),Cvplg(t, :, k, j));
            if prodottoscalare>0
                portata(i,step)=portata(i,step)+prodottoscalare*spessore*Dist2punti(t,k,j);
            end
        end
    end
end
end
end
% calcolo del tempo
tempo(i,step)=(Volumedicontrollo(i,1)*(1-ff(i,step-1)))/portata(i,step);
end
end
[tempodiriempimento(1,step),indice(1,step)]=min(tempo(:,step));
filltime=filltime+tempodiriempimento(1,step);
%for i=1:nd
% if indice(1,step)~=In(i) && indice(1,step)~=Out(i)
Pressione(indice(1,step),step:nd)=NaN;
% end
%end
for g=1:nin
    Pressione(IN(g,1),:)=IN(g,1);
end
for l=1:nin
    Pressione(OUT(l,2),:)=OUT(l,4);
end
for t=1:nd
    if ff(t,step-1)<1
        ff(t,step:nd+10)=portata(t,step)*tempodiriempimento(step)/Volumedicontrollo(t,1)+ff(t,step-1);
    end
end
ff(indice(1,step),step:nd+10)=1;
end
subplot(2,3,6)
trisurf(f,v(:,2),v(:,3),v(:,4),ff(:,step))
shading interp
title('Fill Factor')

```

Confronto dei risultati:

Di seguito sono forniti i risultati di alcune simulazioni eseguite in ambiente MATLAB e poi confrontati con modelli teorici o con software commerciali quali RTMWORX. I confronti si basano su tre diverse geometrie:

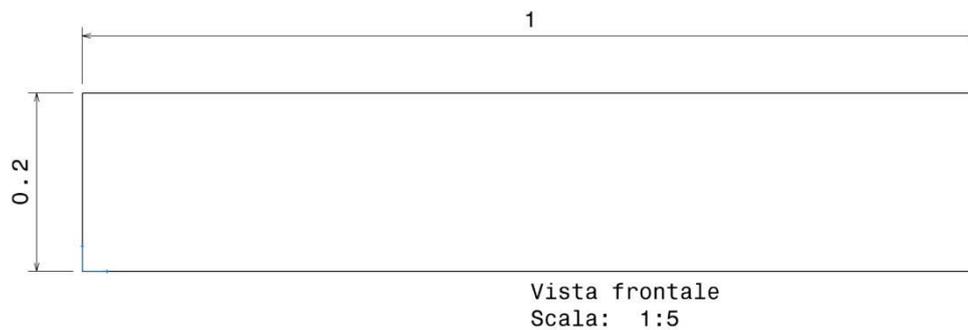
- piastra piana

- un quarto di cerchio
- geometrie complesse

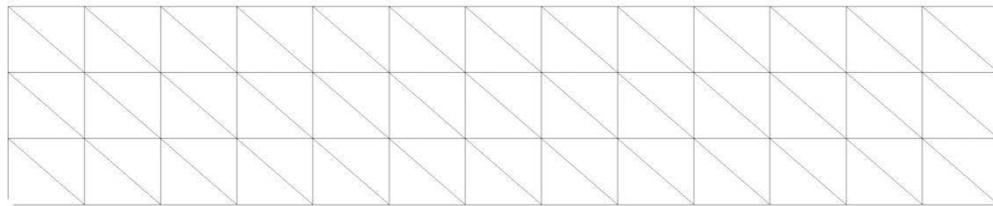
Nei primi due casi agli elementi sono state assegnate le seguenti proprietà:

Proprietà del tessuto in fibra	
Permeabilità [m ²]	6.8x10 ⁻¹⁰
Porosità[%]	40
Parametri di iniezione	
Viscosità del resina [Pa·s]	0.1
Differenza di pressione [Pa]	10 ⁵

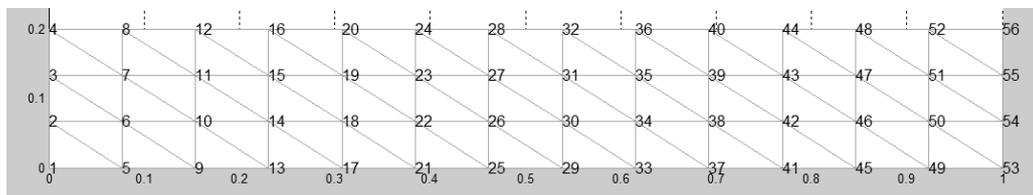
1) pannello rettangolare di dimensioni: 1x0.2x0.005m



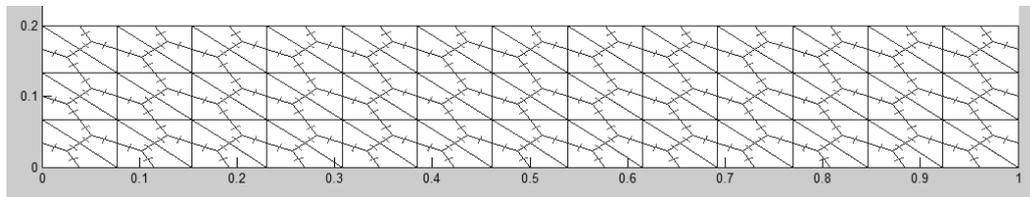
Piastra rettangolare: 1 x 0.2 x 0.005 m



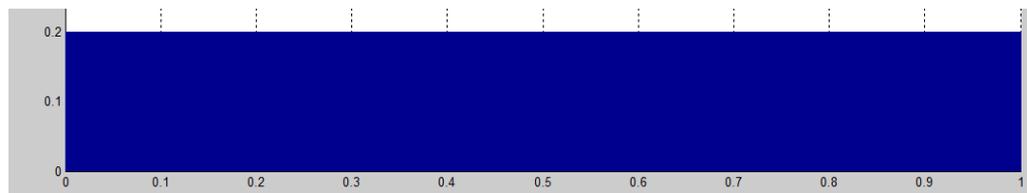
Mesh bidimensionale generata da CatiaV5: 78 elementi triangolari

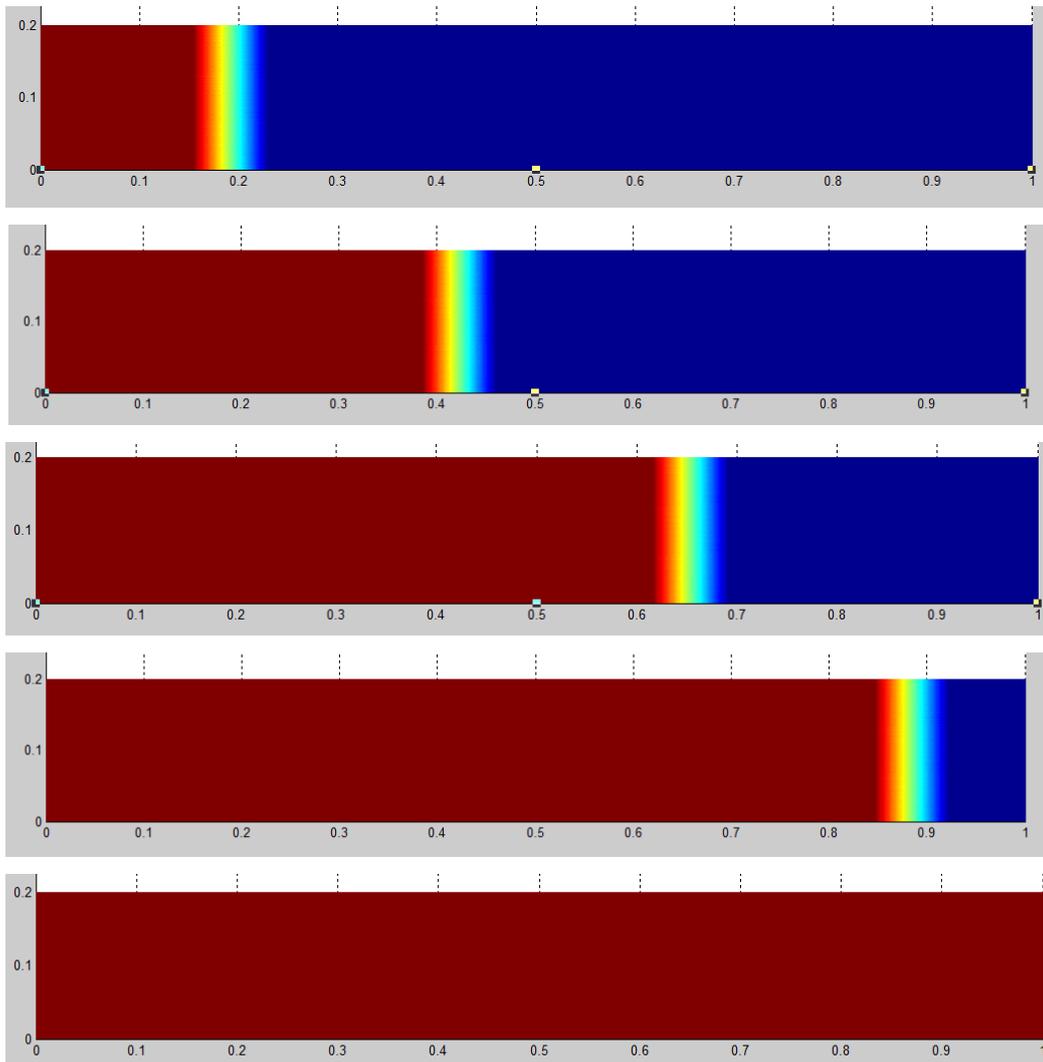


Mesh importata in MATLAB: sono visualizzati i numeri dei nodi (56 nodi)



Rappresentazione dei poligoni di controllo e vettori normali ai lati.





Rappresentazione grafica del fattore di riempimento: T_{tot} : 294 secondi

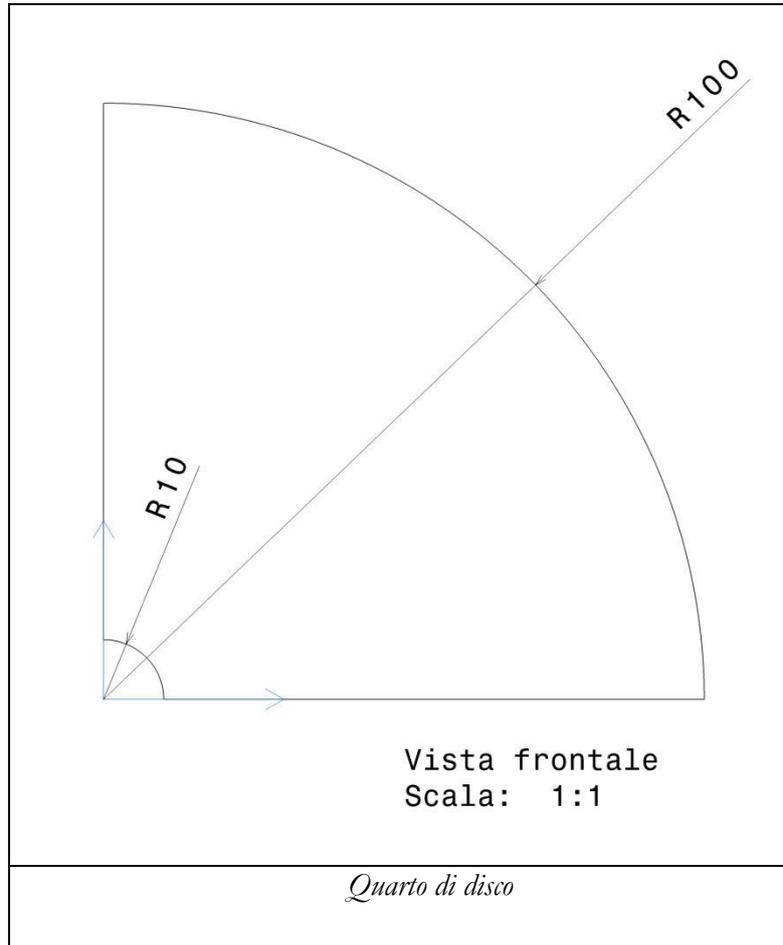
Il tempo totale di riempimento risulta uguale a quello calcolato a partire dalla relazione:

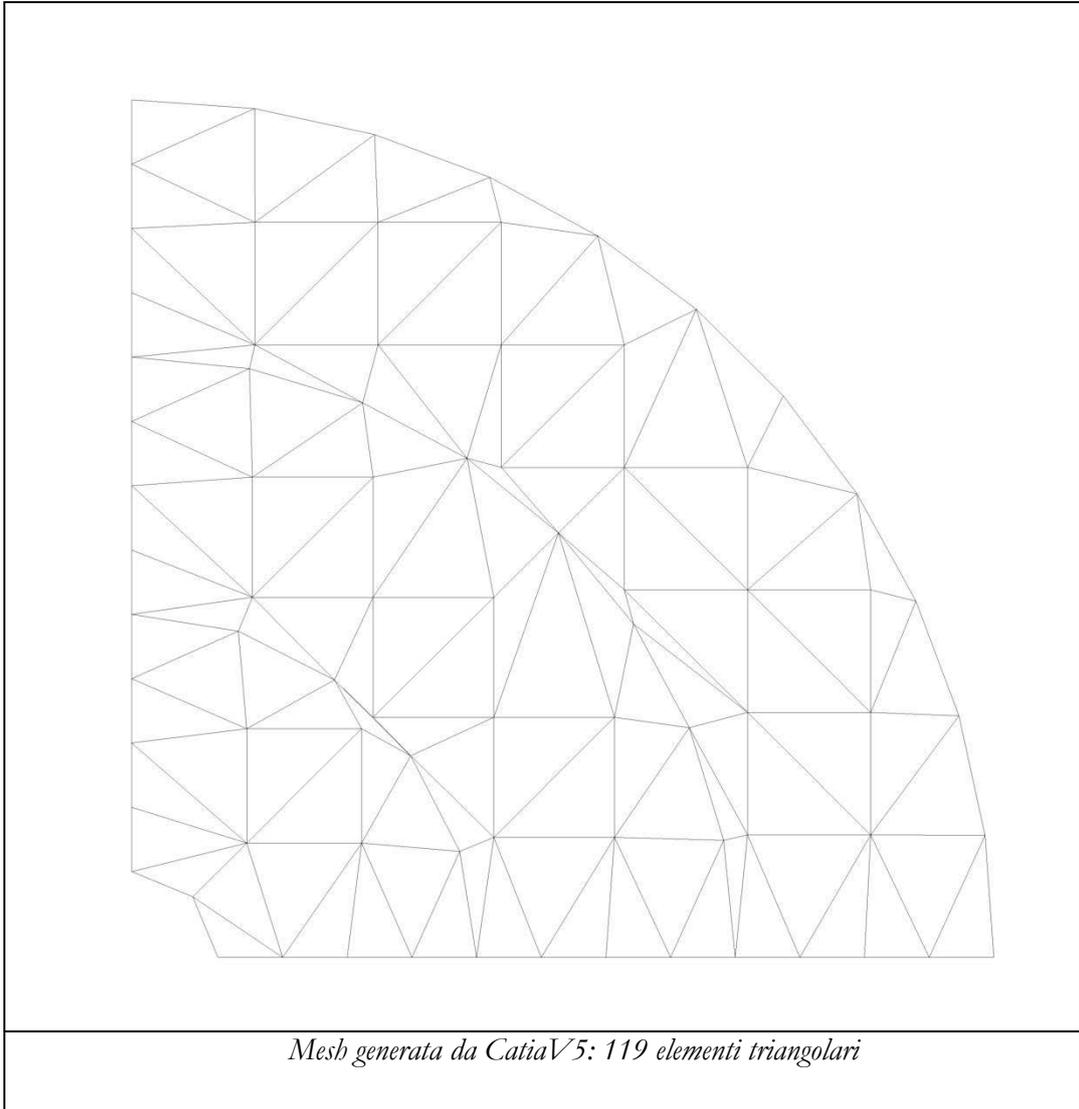
$$t_{RI} = \frac{\eta \phi}{2k \Delta \varphi} L^2$$

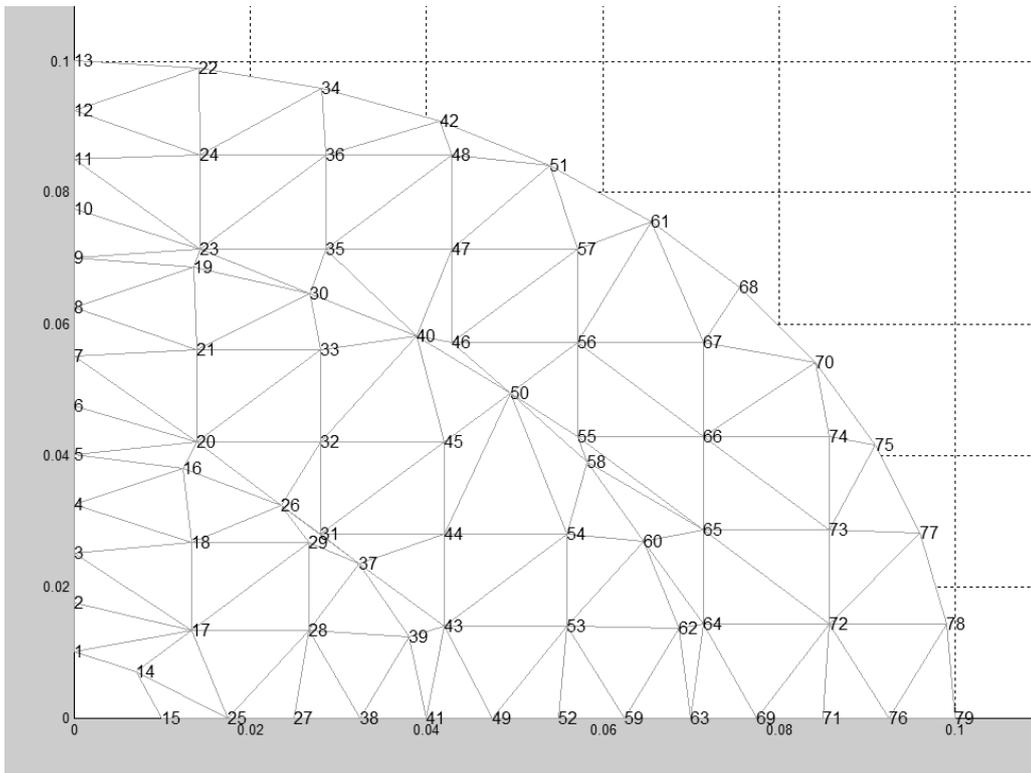
Tempo di riempimento di una piastra rettangolare

che a sua volta è del tutto simile a quello calcolato con l'ausilio di RTM WORX.

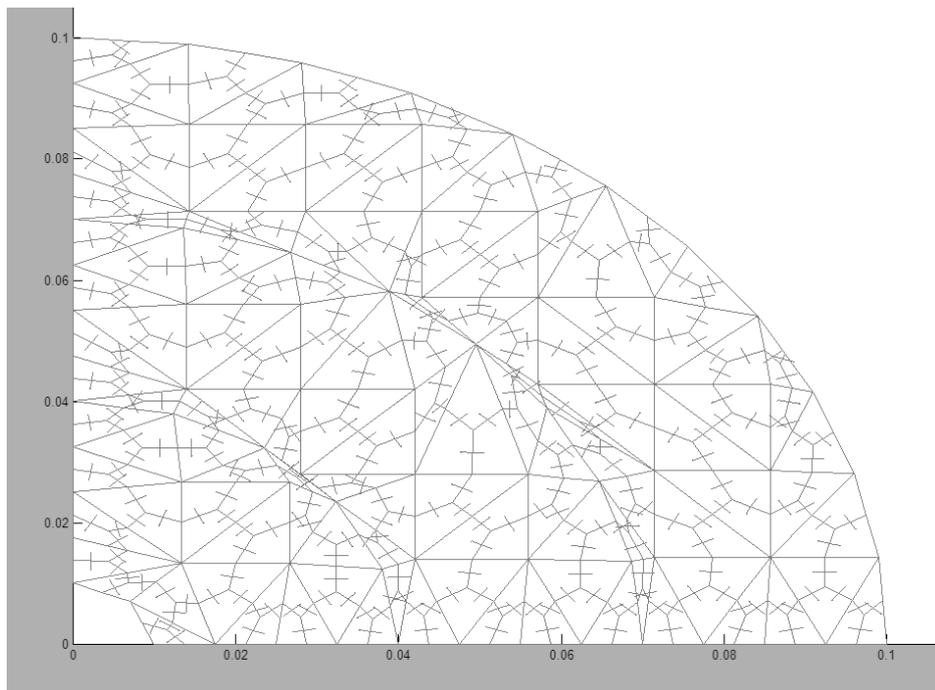
2) Quarto di disco $Ri=0.01m$, $Re=0.1m$



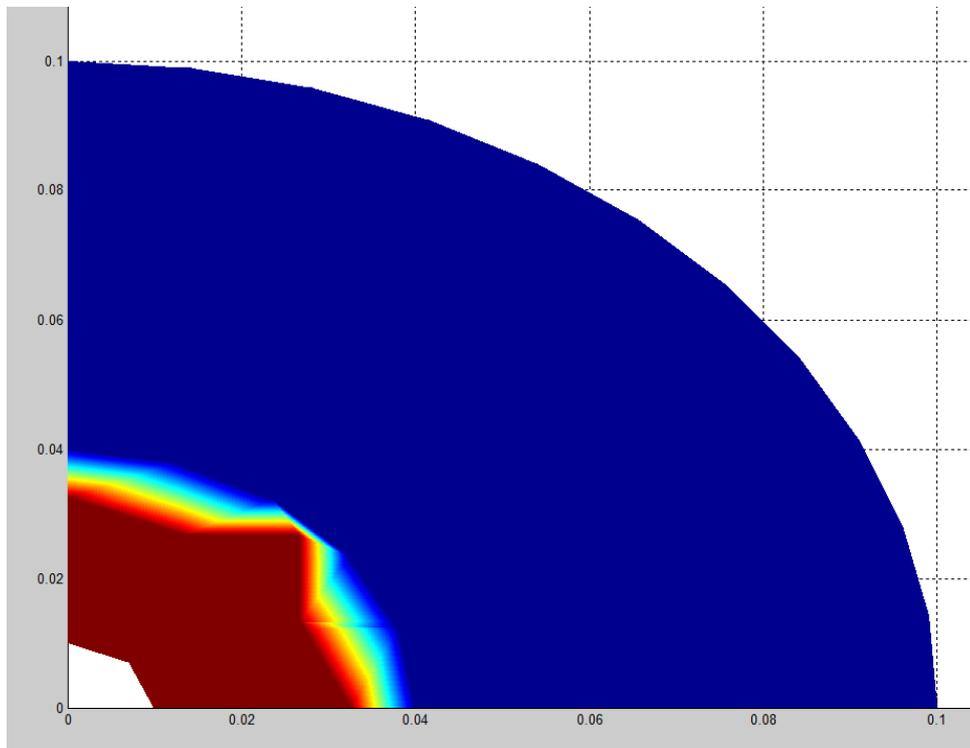
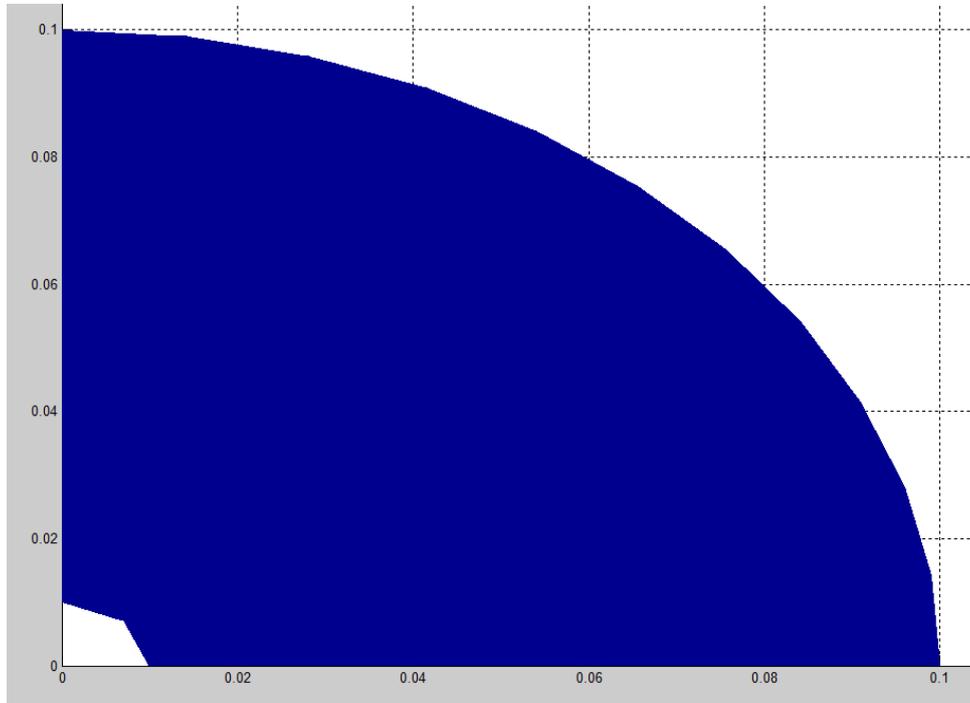


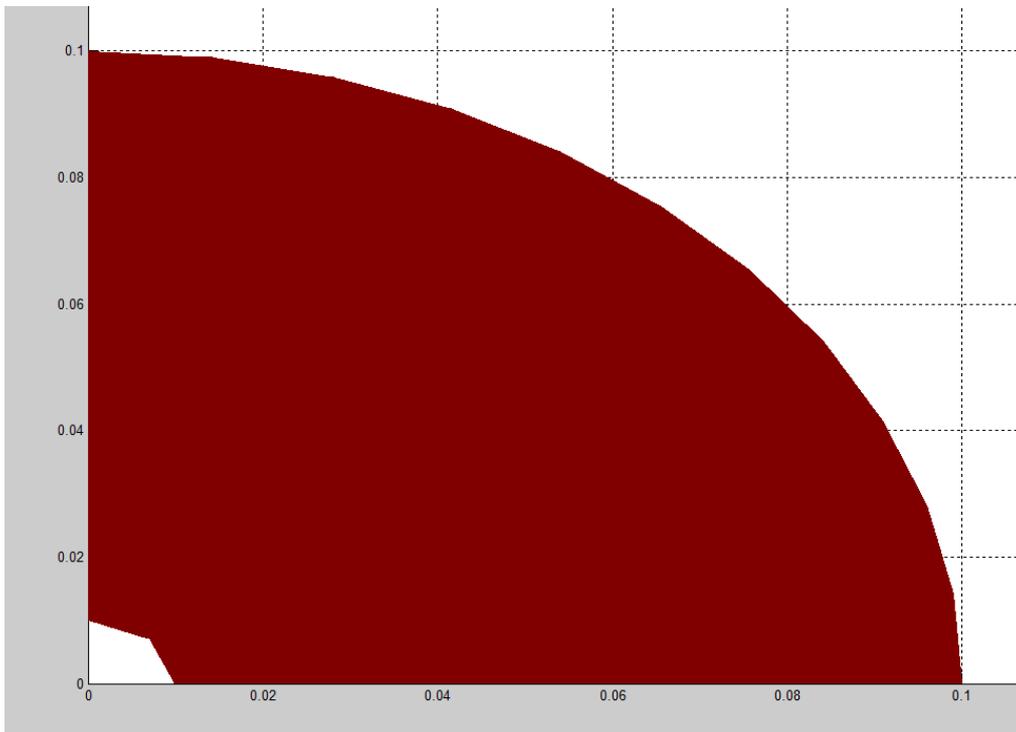
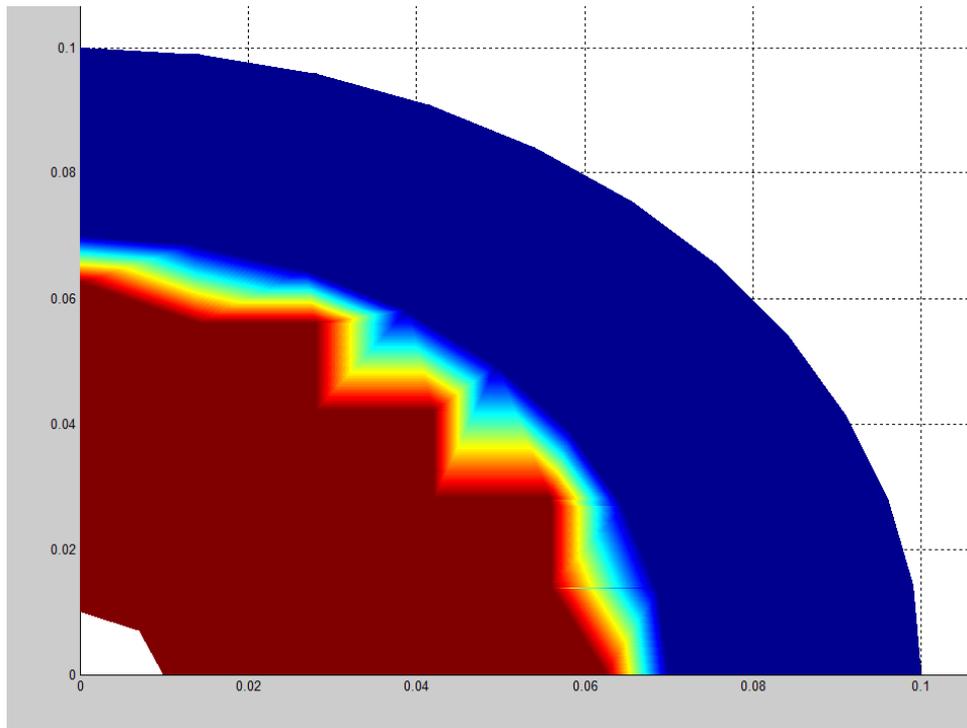


Mesh importata in MATLAB: sono visualizzati i numeri dei nodi (79 nodi)



Rappresentazione dei poligoni di controllo e vettori normali ai lati.





Rappresentazione grafica del fattore di riempimento: T_{tot} : 5.5 secondi

Il tempo totale di riempimento teorico partire dalla relazione seguente è pari a 5,32 sec.:

$$t_{\text{RB}} = \frac{\eta \phi r_0^2}{4k \Delta p} \left\{ \left(\frac{R}{r_0} \right)^2 \left[2 \ln \left(\frac{R}{r_0} \right) - 1 \right] + 1 \right\}$$

Tempo di riempimento per un quarto di disco

che a sua volta è del tutto simile a quello calcolato con l'ausilio di RTM WORX.

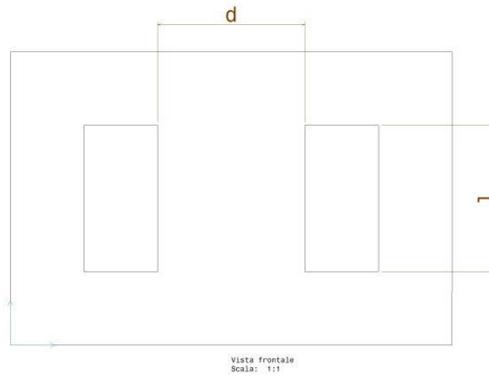
Laminati a geometria complessa

Infine, a partire da laminati di geometria complessa, vengono riportati i risultati ottenuti confrontando le simulazioni effettuate con RTM WORX e MATLAB.

Lo studio di questi laminati ha avuto quale scopo principale, quello di analizzare il comportamento del flusso di resina in presenza di ostacoli che possono comportare nel prodotto finito la presenza di difetti non graditi e che vanno ad inficiare le proprietà dei laminati.

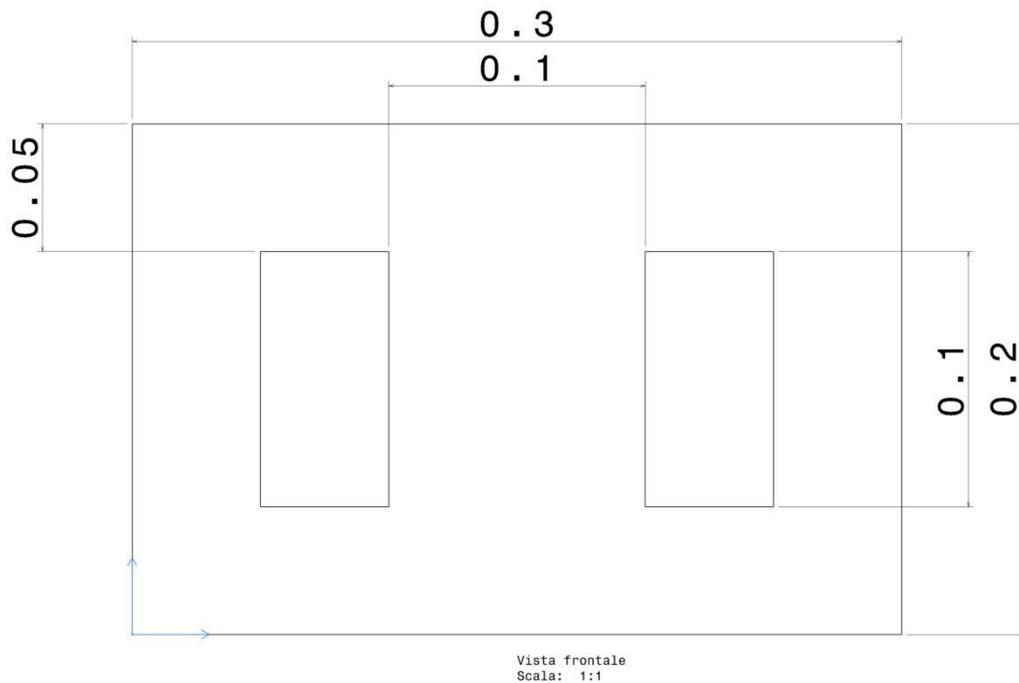
In particolare sono stati realizzati laminati simmetrici con due “finestre” rettangolari, disposte in senso trasversale rispetto alla direzione di avanzamento della resina ed a diversa distanza l'una dall'altra. Onde evitare effetti di bordo che avrebbero potuto falsare le prove, è stato necessario lasciare almeno 5 cm di materiale ai lati di ciascuna finestra. Tali laminati sono, dunque, caratterizzati da un fattore geometrico esprimibile come il rapporto tra la distanza d tra le finestre e l'altezza l delle stesse.

L'obiettivo di queste prove è quello di studiare la tendenza del flusso di resina ad uniformarsi dopo aver superato la prima delle due finestre. Se l'uniformità del flusso non dovesse verificarsi nello spazio compreso tra le due finestre, ci sono grosse probabilità che il laminato presenti, in questa area, difetti dovuti ad una incompleta impregnazione.



Laminati a geometria complessa

Laminato (0.30x0.20) m con finestre distanti 0.10 m



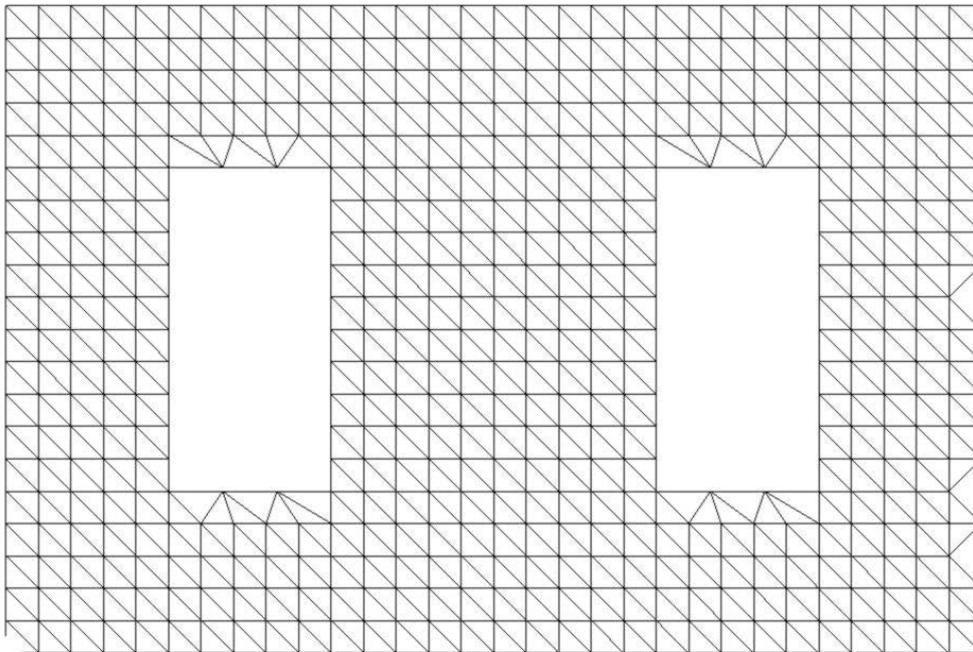
Geometria del laminato con finestre rettangolari

Questo laminato presenta un rapporto di forma d/L pari a 1. Per le simulazioni sono stati adoperati i parametri inseriti in tabella:

Pressione [bar]	0,9
------------------------	-----

Viscosità [Pa·s]	0,6
Spessore [mm]	3,5
V_f [%]	50
K₁₁ [m²]	1,0·10 ⁻¹⁰
K₂₂ [m²]	1,0·10 ⁻¹⁰

Parametri e proprietà delle superfici per il laminato con finestre distanti 10 cm.

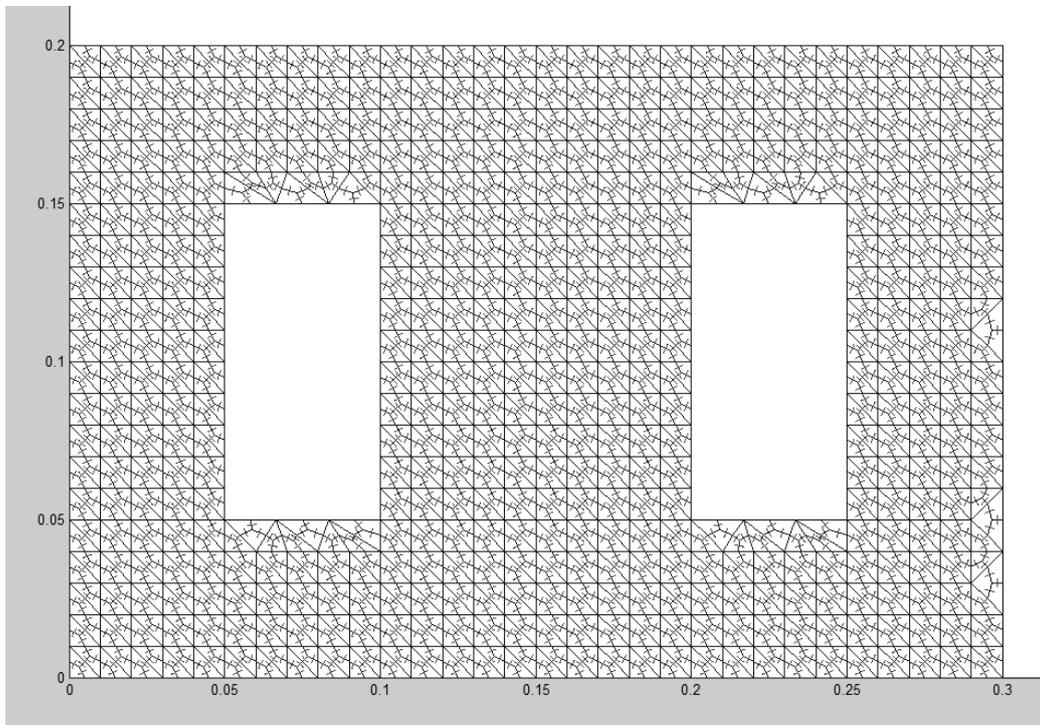


Mesh generata da CatiaV5

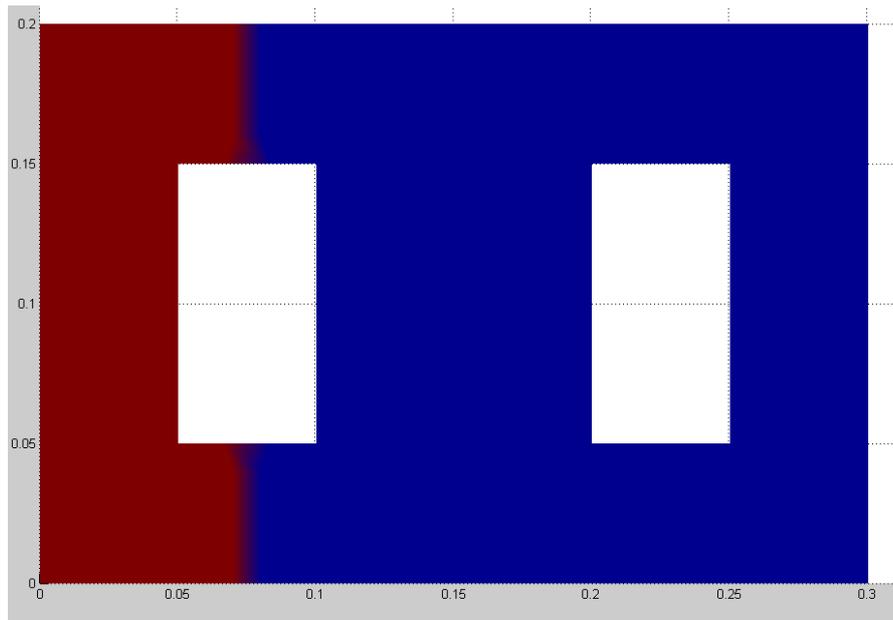
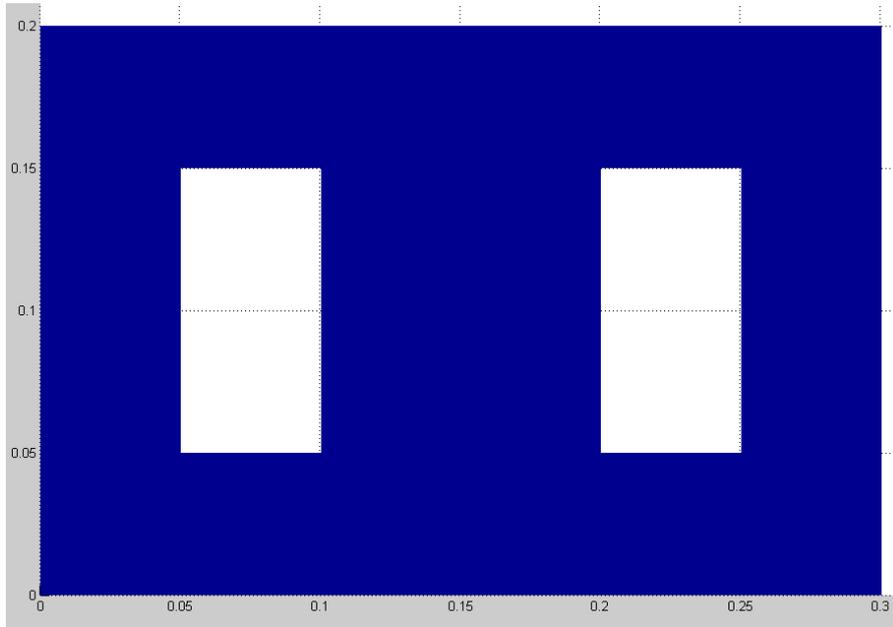
LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

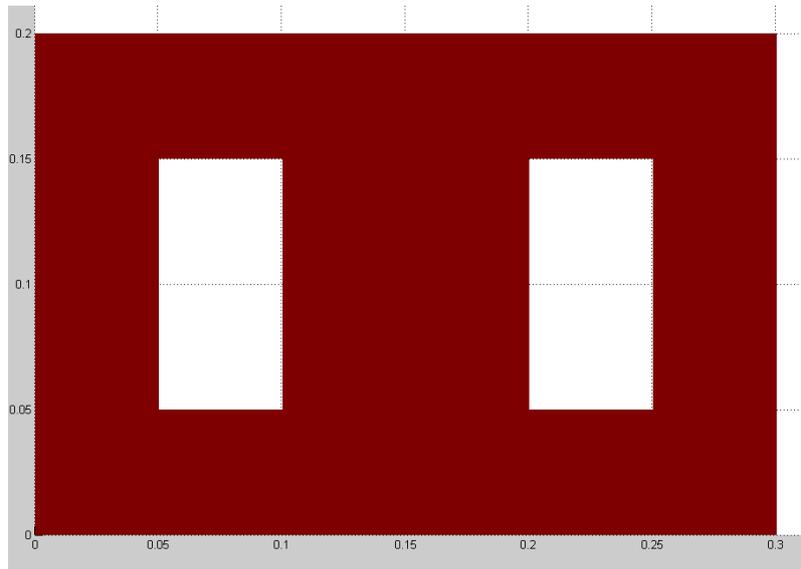
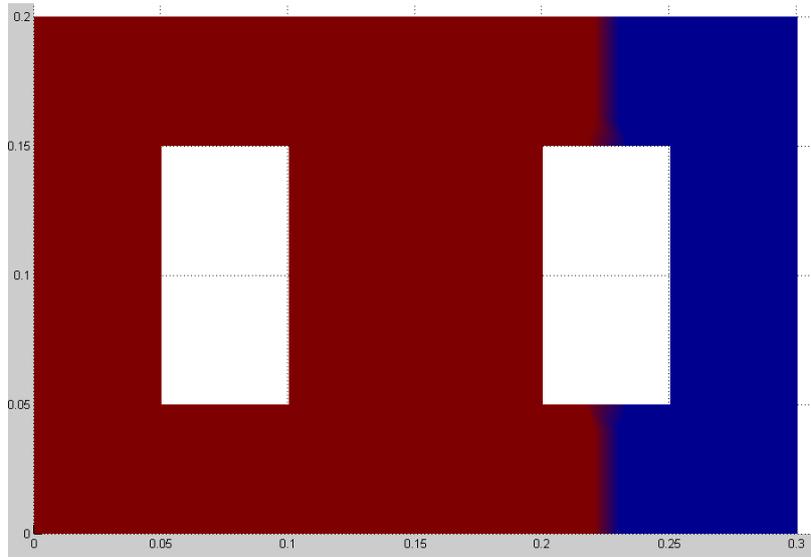


Mesh importata in MATLAB

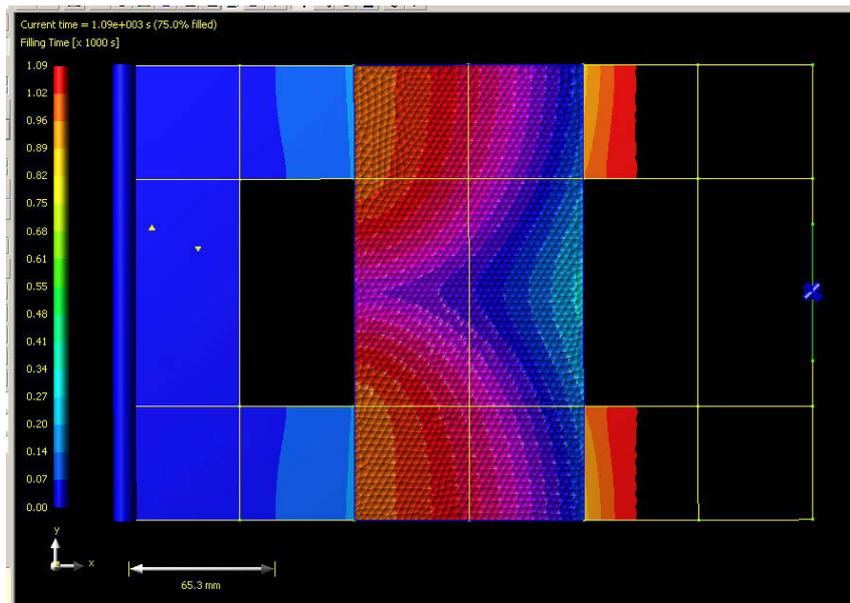
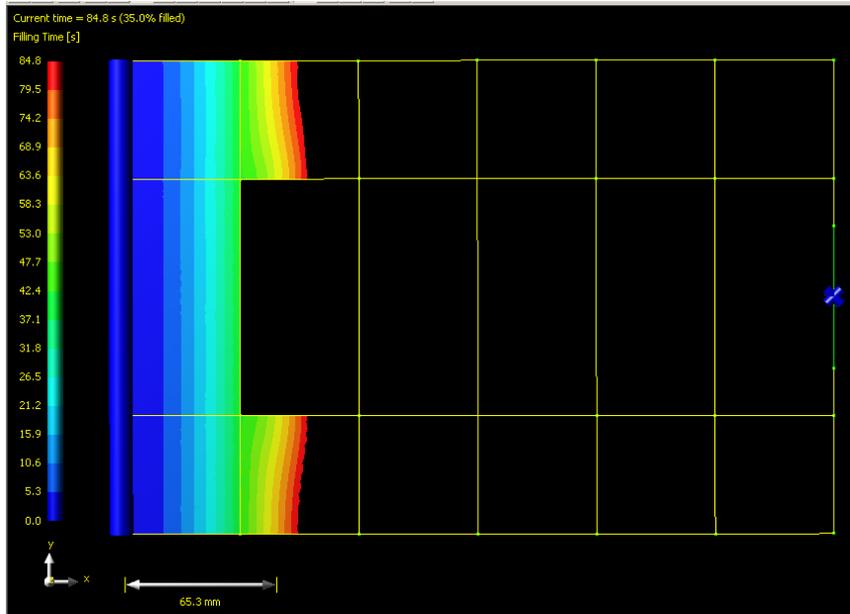


Poligoni di controllo e relativi vettori normali





Fattore di riempimento in MATLAB



Fattore di riempimento in RTM WORX

Distanza x [cm]	Tempo t1 [s]	Tempo t2 [s]	Tempo t3 [s]	
-----------------	--------------	--------------	--------------	--

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

5	42.2	42.2	42.2	MATLAB
	42,5	42,5	42,5	RTM- Worx
10	146		146	MATLAB
	145		145	RTM- Worx
15	422	755	422	MATLAB
	418	740	418	RTM- Worx
20	903	1058	903	MATLAB
	901	1050	901	RTM- Worx
25	1265		1265	MATLAB
	1270		1270	RTM- Worx
30	1790	2215	1790	MATLAB
	1780	2200	1780	RTM- Worx
Confronto dei risultati per laminato con finestre distanti 0.1m				

Dalla tabella si può vedere come il codice generato in MATLAB fornisce ottimi risultati nel calcolo dell' avanzamento del fronte del flusso, del tutto in linea con quanto verificato in RTMWORX.

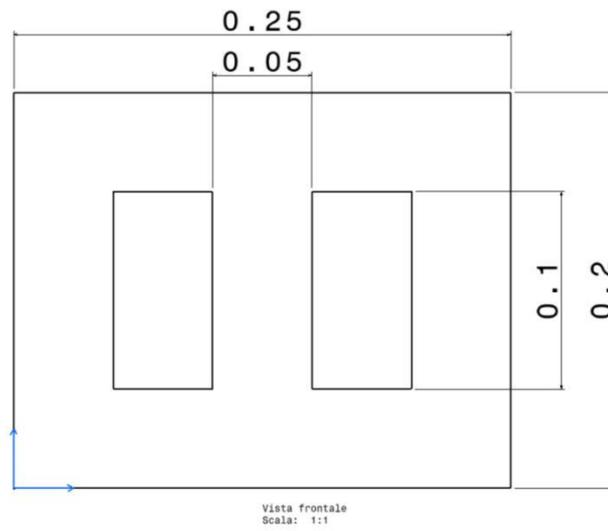
LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

Laminato (0.25x0.20) m con finestre distanti 0.05m

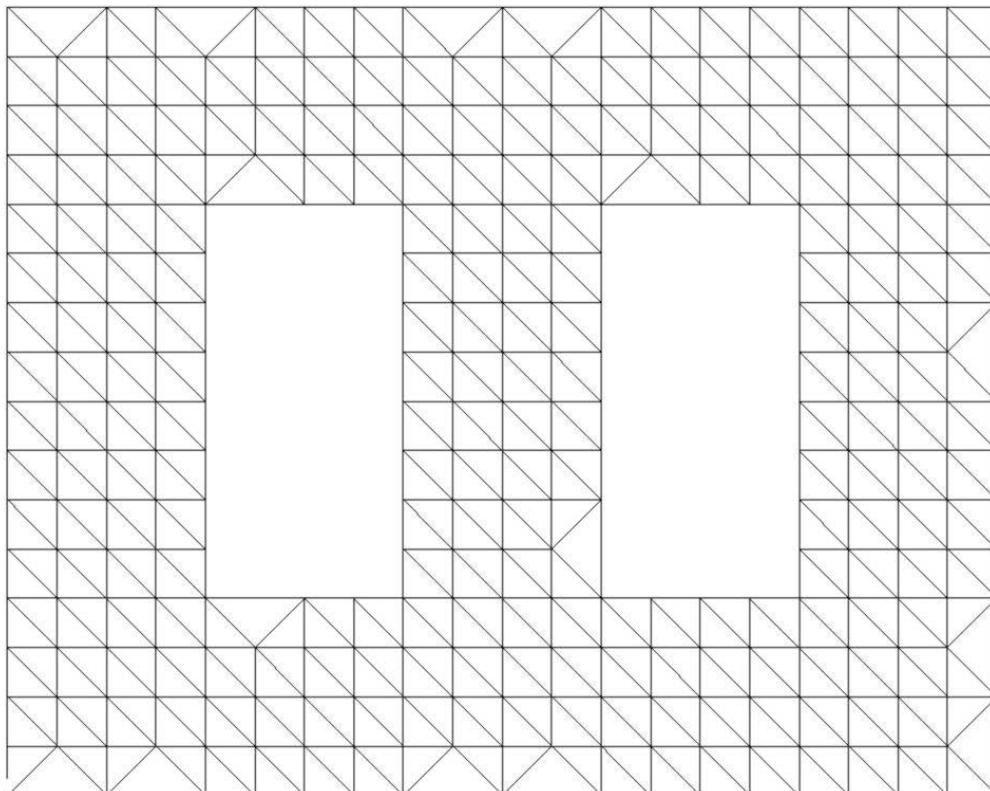
Sulla base dei risultati ottenuti dalla prova precedente, sono state considerate modifiche circa le dimensioni del laminato e la distanza tra le finestre, passando ad un valore del rapporto di forma d/L pari a 0,5.

Pressione [bar]	0,9
Viscosità [Pa·s]	0,6
Spessore [mm]	3,5
V_f [%]	50
K_{11} [m²]	$1,0 \cdot 10^{-10}$
K_{22} [m²]	$1,0 \cdot 10^{-10}$

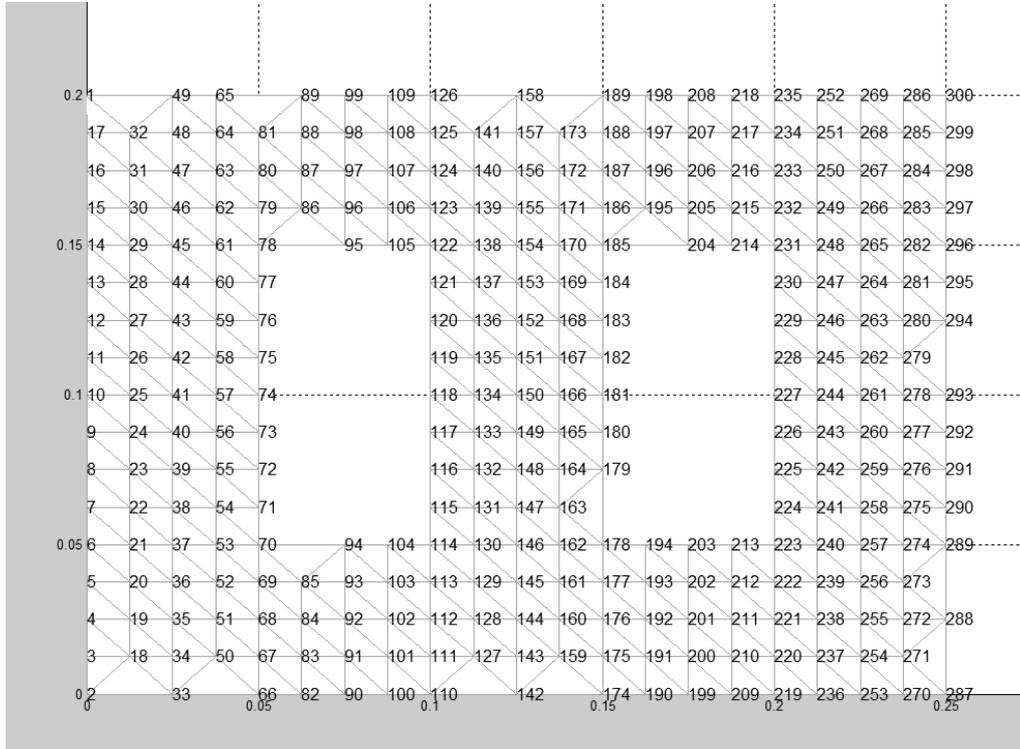
Parametri e proprietà delle superfici per il laminato con finestre distanti 0.05m



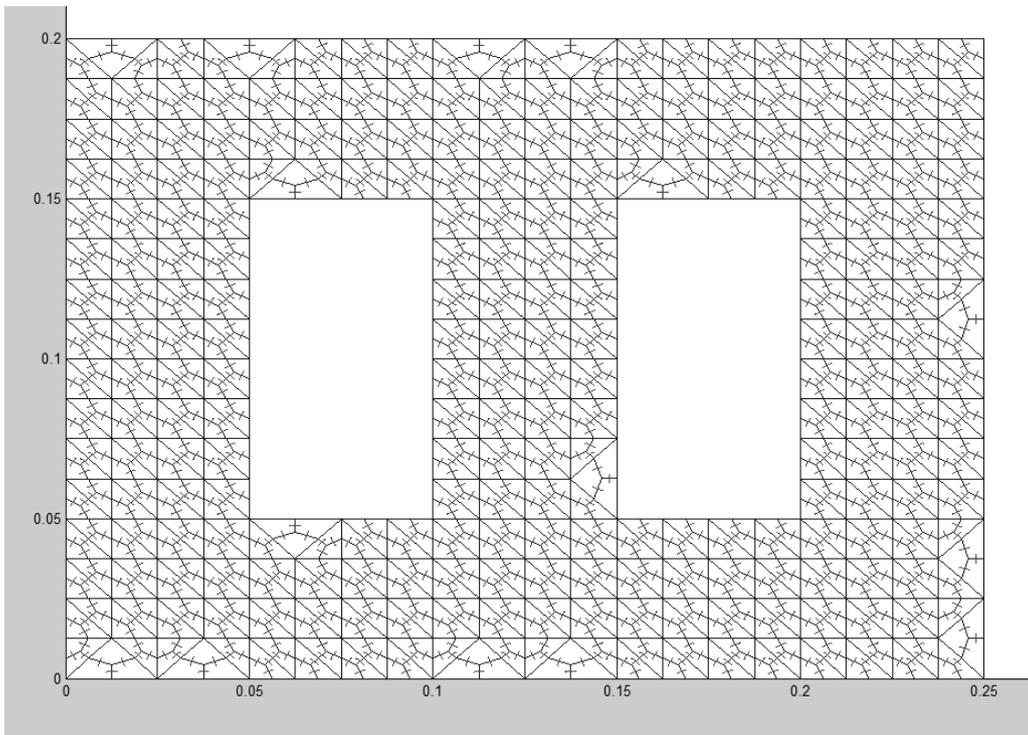
Geometria del pannello



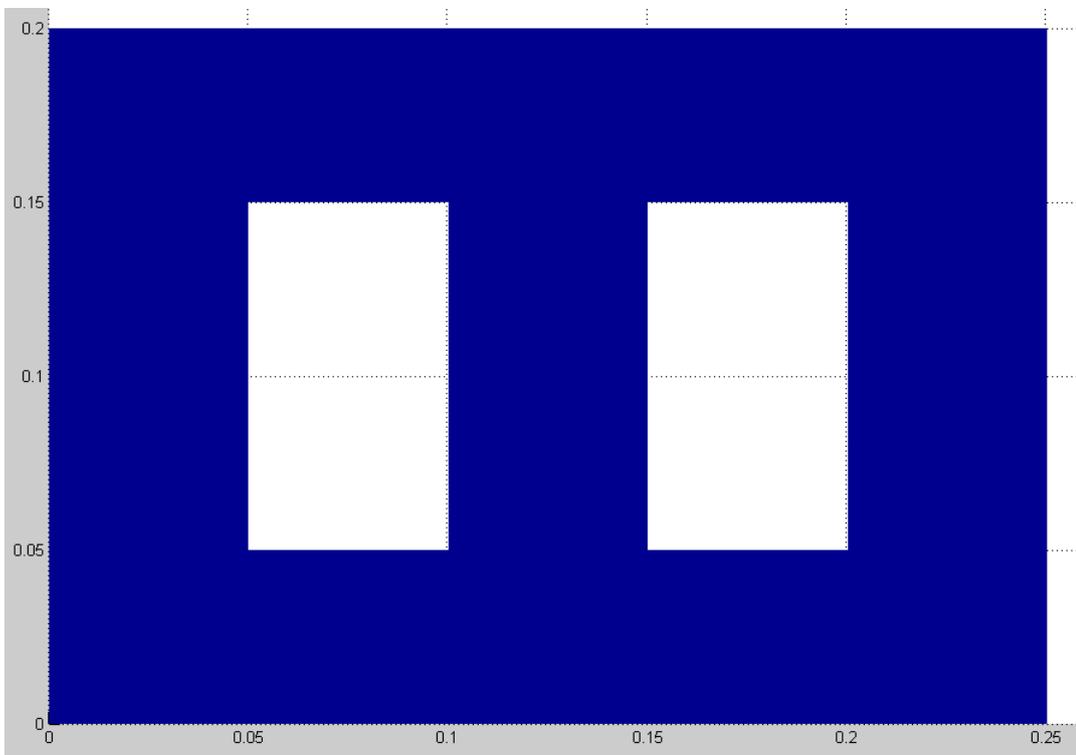
Mesh in CatiaV5

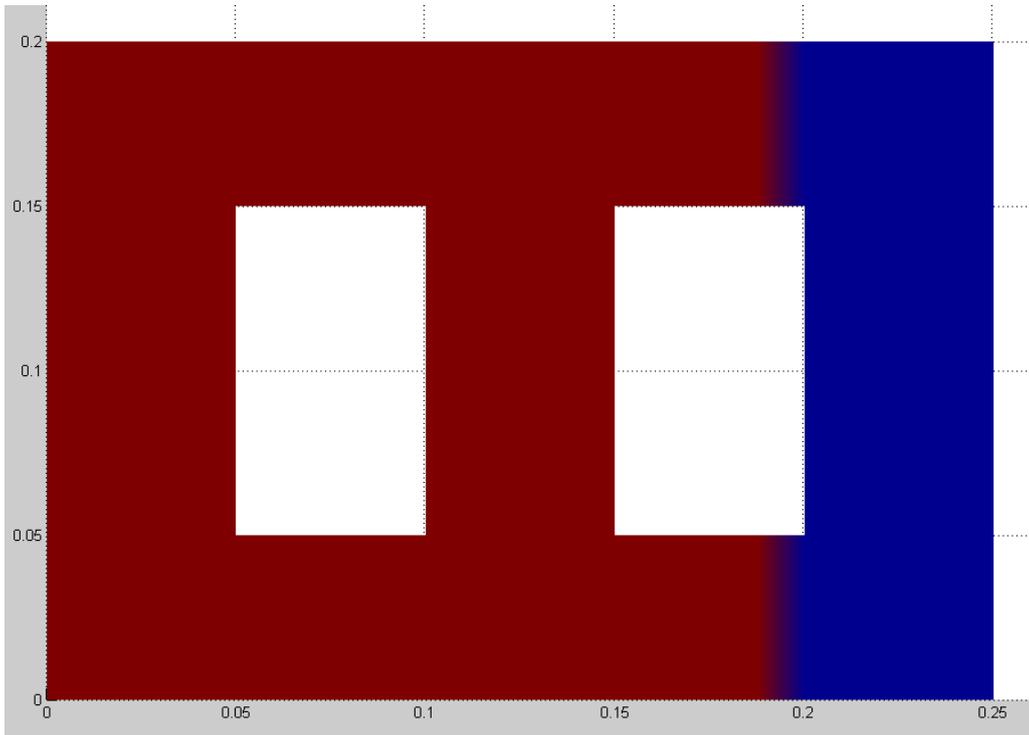
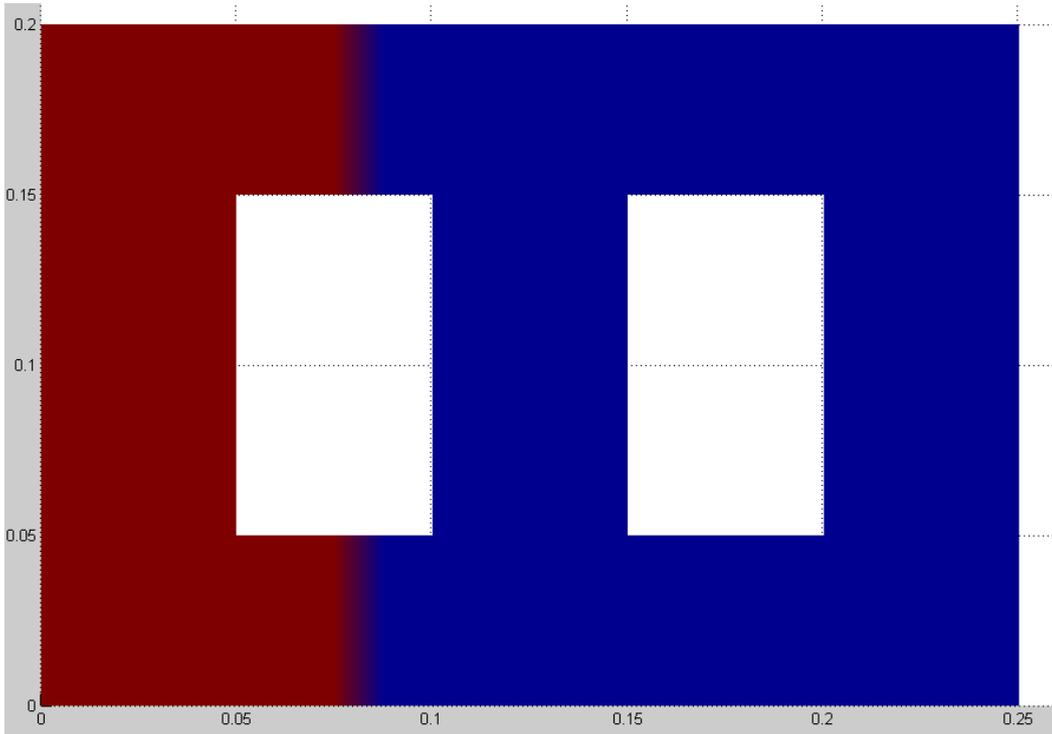


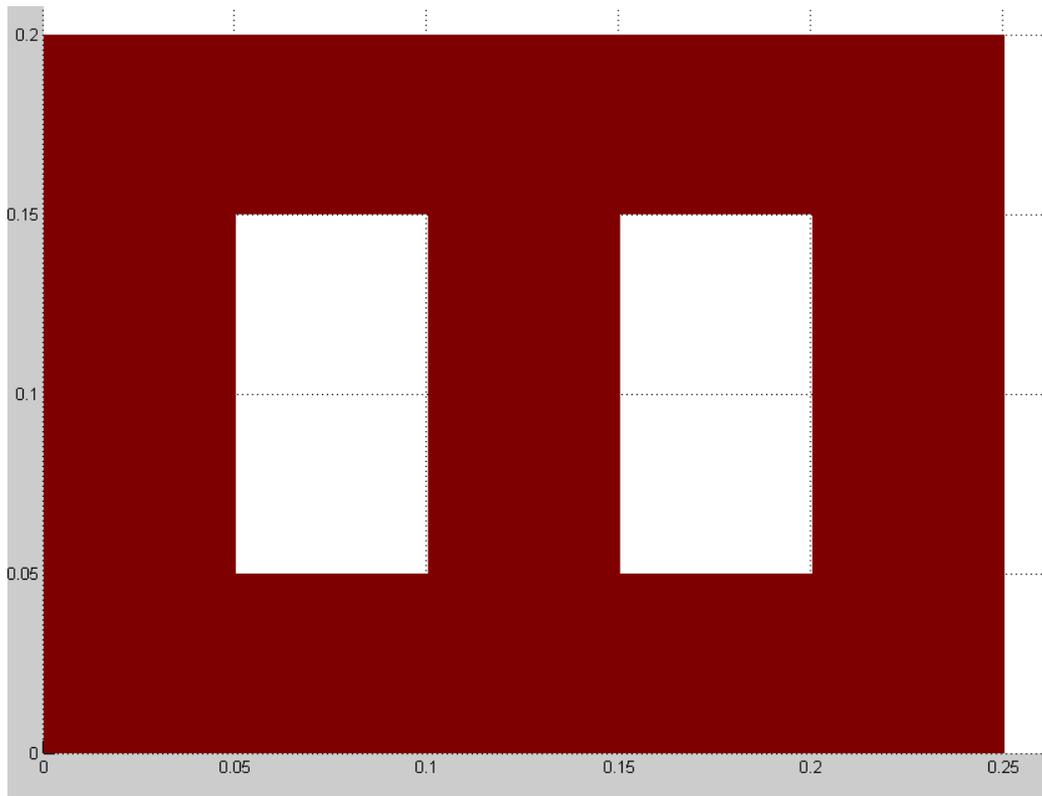
Mesh in MATLAB



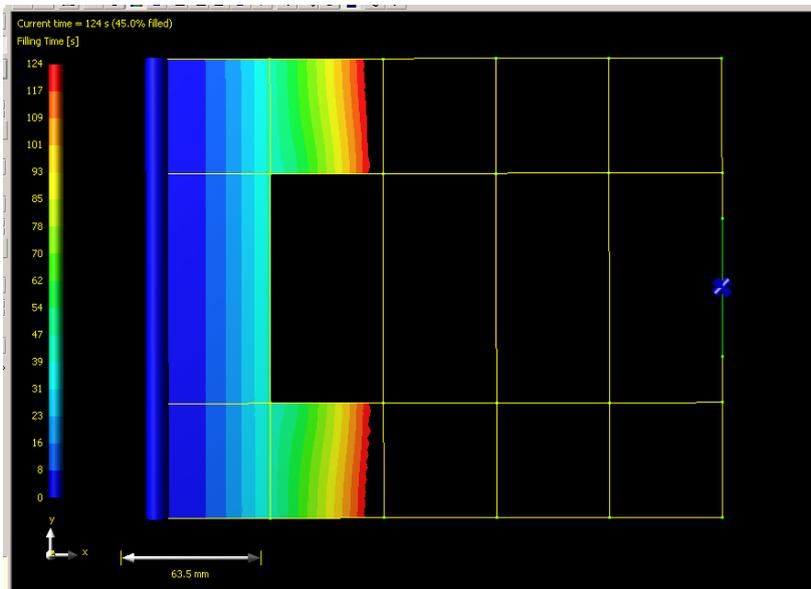
Poligoni di controllo associati ai nodi

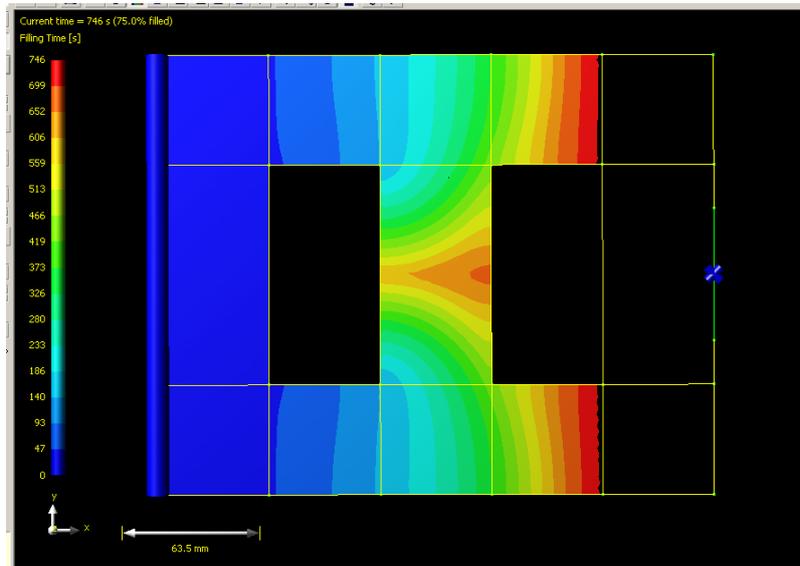






Fattore di riempimento in MATLAB





Fattore di riempimento in RTM WORX

Dalle figure precedenti si nota come il flusso in MATLAB segue lo stesso andamento di quello previsto in RTMWORX. Nella tabella che segue è possibile valutare il confronto temporale tra i due software.

LA SIMULAZIONE NUMERICA IN MATLAB

Distanza x [cm]	Tempo t1 [s]	Tempo t2 [s]	Tempo t3 [s]	
5	26	26	26	MATLAB
	42,5	42,5	42,5	RTM-Worx
10	140		140	MATLAB
	145		145	RTM-Worx
15	403	702	403	MATLAB
	408	705	408	RTM-Worx
20	735		735	MATLAB
	755		755	RTM-Worx
25	1210	1598	1210	MATLAB
	1215	1610	1215	RTM-Worx
Confronto dei risultati per laminato con finestre distanti 0.05m				

Anche in questo caso le differenze temporali sono minime. Ciò conferma la bontà dell' algoritmo implementato in MATLAB. Inoltre c'è da sottolineare che l' algoritmo generato in MATLAB essendo un codice aperto può essere continuamente aggiornato. Quindi possono essere tenuti in considerazione anche ulteriori modelli matematici che consentono di approssimare sempre più la fisica dello stampaggio per impregnazione di resina. Ciò si aggiunge al grandissimo vantaggio che tutto ciò può essere effettuato a costo zero, cosa che invece richiederebbe, nel caso di software commerciali, l' impiego di notevoli risorse economiche.

CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati analizzati i processi RTM ed RIFT. Tale tecnologie, se non affrontate nel modo corretto, possono portare ad un notevole dispendio di risorse economiche. Infatti una corretta esecuzione di esse obbliga ad una serie di prove sperimentali che possono avere un notevole costo. In quest'ottica assumono notevole importanza i software di simulazione. Tali software sono fondamentali perché riducono notevolmente i tempi ed i costi di produzione, riuscendo ad identificare le criticità con largo anticipo.

In questo lavoro è stato implementato, ricorrendo all'uso di MATLAB, un codice per la simulazione del processo di impregnazione. Il software scritto in questo lavoro è stato confrontato con i modelli teorici disponibili in letteratura e con i risultati forniti da un software commerciale, quale RTM WORX. In entrambi i casi il software si è dimostrato valido; infatti in termini temporali, nel peggiore dei casi, le differenze sono state di pochi secondi, cosa che risulta trascurabile quando i processi durano diversi minuti. Tuttavia è necessario sottolineare che i software oggi in commercio sebbene possano prevedere gran parte della casistica che riguarda il processo RTM o RIFT sono chiusi e quindi il codice che li caratterizza non può subire modifiche da parte dell'operatore. Da qui è stata forte l'esigenza di sviluppare un software che aperto e che consenta quindi, in qualsiasi momento, di poterne migliorare i contenuti; quindi inserendo variabili di cui tener conto, o modelli matematici che possono contribuire a meglio approssimare la fisica del problema. In quest'ottica è chiaro quanto sia importante avere a disposizione un codice numerico che consenta di intervenire senza alcun limite e soprattutto senza l'impiego di notevoli risorse economiche e temporali.

DIRECT REFERENCES

- 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
 - Seeman, W. “Unitary vacuum bag and process for making the same”, World Patent No. W094/2078, filed 7 February 1994
 - H. Darcy. 1856. *Les Fontaines Publique de la Ville de Dijon*. Paris: Dalmont.
 - 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.
 - Tucker III CL. *Fundamentals of computer modelling for polymer processing*, Munich: Hanser Publishers, 1989.
 - William JG, Morris CEM, Ennis BC. Liquid Flow through aligned fiber beds. *Polym Engng Sci* 1974;14(6):413.
 - Carman P. C.. *Fluid Flow Through Granular Beds*, *Transactions of the Institute of Chemical Engineers* 1, 1937, 150 – 166.
 - Carman P. C.. *Some Physical Aspects of Water Flow in Porous Media*, *Discussions of the Faraday Society* (3), 1948, 72 – 77.
 - Dullien F. A. L.. *Porous Media—Fluid Transport and Pore Structure*, 2nd edn, Academic Press, California, 1992.
 - P. C. Carman. 1937. *Fluid Flow through Granular Beds*, *Trans. Int. Chem. Eng.*, 15:150 – 166.
 - Sullivan R. R. and Hertel K. L.. *The Flow of Air through Porous Media*, *Journal of Applied Physics* 11, 1940, 761 – 765.
 - 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.
 - 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.
 - 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.
 - 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.
 - Dullien F. A. L.. *Porous Media—Fluid Transport and Pore Structure*, 2nd edn, Academic Press, California, 1992.
 - Gauvin G., Kerachni A. and Fisa B.. *Compaction and Permeability of Multilayers of Mats*, ANTEC 1993, pp. 841 – 843.
 - Batch G. L. and Cumiskey S.. *Multilayer Compaction and Flow in Composites Processing*, 45th Annual Conference, Composites Institute, 1990.
 - 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.
-

BIBLIOGRAFIA

- Gutowski T. G.. A Resin Flow/Fiber Deformation Model for Composites, SAMPE Quarterly, 1985, 58.
 - Barnes, F. “Composites Reinforcement of Steel Structural Members”, Proceedings of Institute of Mechanical Engineers seminar, London, 17 November 1994, pp.5
 - Paddle Lite, Martin Tooling & Laminates Inc. RR 2 Box 106, Freeport, ME 04032 USA
 - Gutowski T. G., T. Morigaki and Z. Cai. The Consolidation of Laminate Composites, The Journal of Composite Materials, 21:172 – 188 (1987).
 - 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.
 - Gutowski TG, Morigaki T, Cai Z. The Consolidation of Laminate Composites. J Compos Mater 1987;21:172–88.
 - 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.
 - 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.
 - 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.
 - 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.
 - Robitaille F, Gauvin R. Compaction Of Textile Reinforcements for Composites Manufacturing I: Review Of Experimental Results. Polym Compos 1998;19(2):198–216.
 - Saunders RA, Lekakou C, Baderng. 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.
 - Luo Y, Verpoest I. Compressibility and Relaxation of a New Sandwich Textile Preform For Liquid Composite Molding. Polym Compos 1999; 20(2):179–91.
 - Van Wyk CM. Note on The Compressibility of Wool. J Textile Inst 1946;37:285–92.
 - 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.
 - 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.
 - 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.
 - 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.
-

BIBLIOGRAFIA

- Gutowski TG, Cai Z, Kingery J, Wineman SJ. Resin Flow/Fiber Deformation Experiments. *Sampe Q* 1986;17(4):54–8.
 - Gutowski T. G.. A Resin Flow/Fiber Deformation Model for Composites, *SAMPE Quarterly*, 1985, 58.
 - Songani and Yao, Transport process in random arrays of cylinders, II *Viscous Flow*, 1998,31 (9), 2433 – 2444.
 - 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.
 - Pfund, B. Resin Infusion in the US marine industry, *Reinforced Plastics* December 1994,32,34
 - Barnes, F. “Composites Reinforcement of Steel Structural Members”, *SAMPE UK Club Presentation*, 25 November 1994
 - 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 – 1 June 1995, pp. 293 – 304
 - Chan A W, Morgan RJ. Sequential multiple port injection for resin transfer moulding of polymer composites,. *SAMPE Quarterly*; 1992 October: 45 –9
 - Chan AW, Morgan RJ. Tow impregnation during resin transfer moulding of bi – directional non woven fabrics. *Polymer Composites* 1993; 14(4): 335 – 40
 - Shih C-H, L. J. Lee Effect of fiber architecture on permeability in liquid composite moulding. *Polymer Composites* 1998; 19(5):626-39.
 - Patel N, RohatgiV, 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.
 - Ludstrom TS. Void Formation and Transport in RTM. Technical Report, Swedish Institute of Composites; 1993.
 - 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.
 - R. S. Parnas, A. J. Salem, T. A. K. Sadiq, H. P. Wang and S. G. Advani. *Compos. Structures*, 27, 93 (1994).
 - R. S. Parnas and F. R. Phelan. *SAMPE Q.*, 22, 53 (1991).
 - 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. Brusckhe. eds., National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5373 (1994).
 - J. Happel and H. Brenner, *Low Reynolds Number Hydrodynamics*, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1983).
 - K. L. Adams and L. Rebenfeld. *Textile Res. J.*, 57, 647 (1987).
 - K. L. Adams, B. Miller and L. Rebenfeld. *Polym. Eng. Sci.*, 26, 1434 (1986).
 - C. A. Fracchia, MS thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign (1990).
 - J. G. Williams, C. E. M. Morris and B. C. Ennis. *Polym. Eng. Sci.* 14, 413 (1974).
 - 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).
-

BIBLIOGRAFIA

- L. Trevino, K. Rupel, W. B. Young, M. J. Liou and L. J. Lee. *Polym. Compos.* 12, 20 (1991).
 - G. Q. Martin and J. S. Son, in *Proc. ASM / ESD Second Conference on Advanced Composites*, ASM International, Materials Park, Ohio (1986).
 - Parnas 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.
 - Parnas RS, Phelan Jr. FR. The effect of heterogeneous porous media on mold filling in RTM. *Sampe Quarterly* 1991; January:53-60.
 - Lundstrom TS, Geban BR. Influence from different process parameters on void formation in RTM. *Polymer Composites* 1993; 15:25-33
 - Patel N, Lee U. Effects of fiber mat architecture :on void formation and removal in liquid composite moulding. *Polymer Composites* 1995; 16:386-99
 - Papathanasiou TD. A structure orientated micromechanical model for viscous flow through square arrays of fibres. *Composites Science and Technology* 1996;56:1055-69
 - 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
 - Gebart BR. Permeability of unidirectional reinforcements for RTM. *Journal of Composite Materials* 1992;26:1100-33
 - Phelan Jr FR, Spaid MAA. Modeling of unsaturated flow dynamics in composite processing. *Fifth International Conference on Automated Composites*. Glasgow. UK,1997
 - Kolodziej JA, Dziecilak R, Konczak Z. Permeability tensor for heterogeneous porous medium of fibre type. *Transport in Porous Media* 1998;32:1-99
 - 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
 - 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
 - Sadiq T., Advani S., Parnas R., Experimental investigation of transverse flow through aligned cylinders. *International Journal of Multiphase Flow* 1995;21(5):755-74.
 - Larson RE, Higdon JLL. Microscopic flow near the surface of two-dimensional porous media. *Journal of Fluid Mechanics* 1986;166:449-72.
 - Parnas RS, Salem AJ, Sadiq TAK, Wang H-P, Advani SG. The inter – action between micro and macroscopic flow in RTM preforms. *Composite Structures* 1994;27:93-107.
 - 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.
 - Cai Z. Analysis of the non-viscous flow effect in liquid moulding process. *Journal of Composite Materials* 1995;29(2):257-78.
 - Lekakou C., Bader MG. Mathematical modelling of macro and micro infiltration in resin transfer moulding (RTM). *Composites:.. Part A* 1998; 29A:29-37.
-

BIBLIOGRAFIA

- 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.
 - 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.
 - Molnar JA, Trevino L, Lee U. Liquid flow in moulds with prelocated fibre mats. *Polymer Composites* 1989; 10(6):414-23.
 - 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
 - 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.
 - 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.
 - Lin C-Y, Slattey 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.
 - Rudd C D, Long A.C., Kendall K.N., Mangin C-G.E., *Liquid moulding technologies*.1997 :Woodhead Publishing Limited.
 - Pamas 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.
 - Diallo M.L., Gauvin R., Trough F. Key factors affecting the permeability measurement in continuous fibre reinforcements in ICCM-II 1997.
 - Lekakou C., Johari M.A.K., Norman D., Bader M.G., Measurement techniques and effectson in plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding. *Composites: Part A*, 1996.27 A: p.401-408.
 - 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.
 - Gebart B.R., Lidstrom P. Measurement of in plane permeability of anisotropic fiber reinforcements. *Polymer Composites*, 1996.17 (1):p.43-51.
 - Bates P. J., Taylor D. and Gunningham M. F.. Compaction and Transverse Permeability of Glass Roving, *Applied Composite Materials* 8, 2001, 136 – 178.
 - Von Horten, K. Production by RTM, in composites materials in maritime structure. Chapter 4, ed R.A. Svenai Cambridge University, 1993, pp. 86-126.
 - 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.
 - Happel, J., Viscous flow relative to arrays of cylinders. *A.I.Ch.E. Journal*, 1959.pp. 174-177.
 - 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.
-

-
- Speilman, L., Goren, S.L., Model for predicting pressure drop and filtration efficiency in fibrous media. *Environmental Science and Technology*, 1968.3: pp. 279-287.
 - Lundgren, T.S., Slow flow through stationary random beds and suspension of spheres. *Journal of fluid mechanics*, 1971. 51 : pp. 273-299.
 - 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.
 - Gebart, B.R., Permeability of unidirectional reinforcements for RTM. *Journal of Composite Materials*, 1992.26: pp. 1100-1133 .
 - Lundstrom, T.S., Gebart, B.R., Effect of perturbation of fibre architecture on permeability inside fibre tows. *Journal of composite materials*, 1995.29 . pp. 424-443.
 - Higdon, J.J.L., Ford, G.D., Permeability of three-dimensional models of fibrous porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996.308: pp.341-361.
 - Howells, I.D., Drag on fixed beds of fibres in slow flow . *Journal of Fluid Mechanics*, 1998.355 : pp. 163-192.
 - Rohatgi, V., Patel, N., James, L., Experimental investigation of flow induced micro voids during impregnation of unidirectional stitched fibre glass mat . *Polimer Composites* 1996, 17(2): pp.161-170.
 - 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.
 - 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.
 - Long AC , Rudd CD. Simulation of reinforcement deformation during the production of preforms for liquid moulding processes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B: Journal of Engineering Manufacture* 1994; 208 (4): 269-78
 - Summerscales, J. A model for the effect of fiber clustering on the flow rate in the resin transfer moulding, *Composites Manufacturing* 1993,4 (1), 27-31
 - Tbirion JM, Girardy H, Waldvogel U. New developments in resin transfer moulding of high-performance composite parts *Materials information translations service series C: engineered materials. Composites (Paris)* 1988; 28 (3):81-4.
 - 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.
 - 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.
 - 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.
 - 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

- Guild FJ. Davy PJ. HoggPJ. A model for unidirectional composites in longitudinal tension and compression. *Composites Science and Technology* 1989; 36 8(1): 7-26
 - Basfordd m. Griffin PR. Grove SM. Summerscales J. Research report: relationship between mechanical performance and microstructure in composites fabricated with flowenhancing fabrics. *Composites* 1995; 26 (9):615-9
 - Summerscales J.Green d, Guild FJ. Effect of processing dwell-time on the microstructure of a fibre-reinforced composite. *Journal of Microscopy* 1993;169 (2rI73-82.
 - Pearce NRL. Guild FJ, Summerscales J. An investigation into the effects of fabric architecture of the processing and properties (fibre reinforced composites produced by RTM - *Composites Part-* 1998;29A (I/2):19-27.
 - Pearce NRL. Guild FJ, Summerscales J. A study of the effects of convergent flow frontson the properties of fibre-reinforced composites produced by RTM - *Composites Part A*
 - Pearce NRL, Summerscales J. Guild F1- The use of automated imagic analysis for the investigationof fabric architecture on the processing and properties of fibre-reinforced composites produced by RTM. *Composites Part A* 1998; 29A (7):829-37
 - Pearce NRL. Summerscales J., Guild F1- The modification of fabric architecture to improve the processing of continous 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.
 - Pearce NRL. Guild FJ, Summerscales 1-The effect of flow-enhancement tows on the mechanical properties of composites produced the RTM process. Fifth International Conference on Deformation: Fracture of Composites, Institute of Materials, London 18-19 Ma 1999, p. 101-10.
 - Curtis Pf. CRAG test methods for the measurement of the engineering properties of fibre reinforced plastics. Royal Aero-space Establishment Technical Report 88012, Farnborough, February 1988.
 - Lundstrom, Void formation in RTM. In proceedings of SPI Composite Institute 47th Annual Conference, 1992, New York
 - S. and C. U1 trasonic attenuation as a measure of voide content in carbon-fibre reinforced plastics, 1975,8 (3),pp. 137-145
 - Cortis. CRAG test methods for the determination of the engineering properties of fibre reinforced plastics. Royal Aerospace Establishment Thecnical Report, 88012, February, 1988.
 - 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.
 - 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.
 - Lai CL, Young WB. Model resin Permeation of fibre reinforcements after shear deformation. *Polym Compos* 1997;18(5):642–8.
-

-
- Slade J, Sozer EM, Advani SG. Fluid Impregnation of Deformed Preforms. *J Reinf Plast Compos* 2000;19(7):552 – 68.
 - Heardman E, Lekakou C, Bader MG. In-plane permeability of sheared fabrics. *Composites, Part A* 2001;32:933–40.
 - 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.
 - Berker B, Sun JQ. Permeability estimation in resin transfer molding. *J Mater Process Manfact Sci* 1998;6:205–11.
 - Simacek P, Advani SG. Permeability estimation in resin transfer molding. *J Mater Process Manfact Sci* 1998;6:205–11.
 - 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.
 - 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.
 - Basset RJ, Postle R. Fabric mechanical and physical properties. *Int J Clothing Sci Technol* 1990;2(1):26–31.
 - Van der Weeën F. Algorithms for draping fabrics on doubly curved surfaces. *Int J Numer Methods Engng* 1991;31:1415–26.
 - 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 Manfact* 1994;208(B4):269 – 78.
 - 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.
 - Shanahan WJ, Lloid DW, Hearle JWS. Characterizing the Elastic Behaviour of Textile Fabrics in Complex Deformations. *Textile Res J* 1978; 48(9):495 – 505.
 - 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.
 - Kang TJ, Yu WR. Drape Simulation of Woven Fabric by Using the Finite-Element Method. *J Textile Inst* 1995; 86(4):635 – 48.
 - Lloyd DW. The analysis of complex fabric deformations. In: *Mechanics of flexible fibre assemblies*, Alphen: Sijthoff and Noordhoff;1980.
 - 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.
 - 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.
 - Chan AW, Hwang ST. Anisotropic in-plane permeability of fabris media. *Polym Engng Sci* 1991;31(6):1233–9.
 - 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.
-

-
- 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.
 - 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.
 - K. L. Adams and L. Rebenfeld. Permeability Characteristics of Multilayer Fiber Reinforcements: I. Experimental Observations. *Polym. Comp.*, 12 (1991) 179 – 185.
 - 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.
 - 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.
 - 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.
 - 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.
 - K. L. Adams and L. Rebenfeld. Permeability Characteristics of Multilayer Fiber Reinforcements: II. Theoretical Model. *Polym. Comp.*, 12 (1991) 186 – 190.
 - M. V. Brushke and S. G. Advani. Flow of Generalized Newtonian Fluids Across a Periodic Array of Cylinders. *J. Rheol.*, 37 (1993) 479 – 498.
 - 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.
 - 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.
 - P. Lindström. SICOMP Technical Report 92-013, Swedish Institute of Composites (1992).
 - R. S. Parnas and A. J. Salem. *Polym. Compos.*, 14, 383 (1993).
 - 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.
 - E. J. Carter, A. W. Fell and J. Summerscale. A Simplified Model to Calculate the Permeability Tensor
 - A. W. Chan and S-T Hwang. Anisotropic In-Plane Permeability of Fabric Media. *Polymer Engineering and Science* 1991;31(16):1233 – 1239.
 - 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.
 - 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.
-

- 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.
- 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.
- K. L. Adams and L. Rebenfeld. Polym. Compos., 12, 179 (1991).
- K. L. Adams and L. Rebenfeld. Polym. Compos., 12, 186 (1991).
- R. C. Lam and J. L. Kardos. Polym. Eng. Sci., 31, 1064 (1991).
- R. S. Parnas and Y. Cohen. Chem. Eng. Comm., 53, 3 (1987).
- J. C. Slattery. AIChE J., 15, 866 (1969)
- Y. R. Kim, S. P. McCarthy, J. P. Fanucci, S. C. Nolet and C. Koppernaes, SAMPE Q. 22, 16 (1991).
- 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.
- 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.
- Adams KL, Rebenfeld L. In-Plane Flow of Fluids in Fabrics: Structure/Flow Characterization. Text Res J 1987;57:647–54.
- 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.
- Morano U. “Analisi dei Parametri Tecnologici in un Processo RIFT” (2005).
- I. Crivelli Visconti, M. Durante, A. Langella, U. Morano. Flow Front Analysis In Resin Infusion Process. Intelligent Production Machines and Systems, 2006, Pages 223-228.
- Mario Putti: Implementazione metodo FEM: calcolo della topologia della matrice di rigidità
- Mario Putti: Implementazione metodo FEM: soluzione dell'equazione di Poisson
- A. Koorevaar, 7. Int. Techtexil Symposium 1995, Lecture No. 338.
- A. Koorevaar, 2èmes Journées RTM, les 5 et 6 Juin 1997 à l'ISITEM à Nantes.
- O.C. Zienkiewicz, The Finite Element Method (3rd ed.), McGraw-Hill, 1977.

ALTRI TESTI CONSULTATI

I. Crivelli Visconti, G. Caprino, A. Langella – *Materiali Compositi* – Biblioteca tecnica Hoepli (2009).
