

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in Tecnologia Meccanica

*Caratterizzazione dei parametri di permeabilità di
materiali compositi tramite prove sperimentali*

CANDIDATO

Mirco Bartoli

RELATORE

Lorenzo Donati

Anno Accademico 2016/2017

A mio nonno, Mario

Ringraziamenti

Un ringraziamento speciale va al professor Lorenzo Donati, per avermi permesso di lavorare a questo argomento e per tutto il supporto fornitomi durante la realizzazione di questo elaborato.

Ringrazio l'ing. Francesco Rondina e Paolo Proli per avermi seguito ed aiutato durante e dopo l'esecuzione delle prove sperimentali.

Inoltre, vorrei ringraziare Martina Gironi, per il prezioso aiuto fornitomi sia in laboratorio, sia nell'elaborazione dei dati sperimentali fornendomi numerosi dati, spiegazioni e consigli utili.

Ringrazio i miei genitori e mio fratello per avermi sempre supportato e per avermi permesso di raggiungere questo traguardo.

Ringrazio la zia Sonia che mi ha sempre aiutato, anche nei momenti per lei più bui.

Ringrazio il mio ex professore dell'ITIS Giovanni Ghetti per tutti i consigli e l'aiuto prezioso che mi ha fornito lungo questi anni.

Vorrei ringraziare anche i miei amici, per essere stati sempre al mio fianco.

Infine, ringrazio di cuore mio nonno Mario, ovunque sia in questo momento, che ha sempre creduto in me ed è stata la persona che ha insistito maggiormente affinché io arrivassi qui.

Sommario

1	Generalità sui compositi	9
1.1	Le fibre	9
1.1.1	Tipologie di tessuti	12
1.1.2	Altre caratteristiche delle fibre	14
1.2	Tecnologie di produzione	16
1.2.1	La tecnologia RTM	17
1.2.2	RTM, VARTM e varianti	17
1.2.3	Vacuum Infusion Process (VIP)	20
1.2.4	Resin Film Infusion (RFI)	23
2	La permeabilità nei tessuti	25
3	Prove di misura della permeabilità	31
3.1	Descrizione della prova	31
3.1.1	Alterazioni della prova	36
3.2	Risultati sperimentali	39
3.2.1	Tessuto RTM (doppio strato)	39
3.2.2	Tessuto RTM + tessuto unidirezionale	49
4	Conclusioni	57
5	Bibliografia	63

1 Generalità sui compositi

1.1 Le fibre

I rinforzi nei materiali compositi, ovvero la fase discontinua dispersa nella matrice, è solitamente sotto forma di fibre più o meno lunghe, a seconda dell'applicazione. Sono infatti le fibre stesse a sopportare le sollecitazioni meccaniche a cui sarà sottoposto il materiale una volta posto in esercizio.

I materiali principali da cui sono composte le fibre sono:

- vetro
- carbonio
- boro
- tungsteno
- berillio
- allumina
- kevlar

In sede di progettazione, avendo queste fibre caratteristiche e soprattutto costi ben diversi tra loro, è bene scegliere quella più adatta all'utilizzo in analisi.

1.1 - Le fibre

Comparison of Cured Laminate Properties with Those for Metals

Material	Density* (10 ³ Kg/m ³)	Ultimate Tensile Strength* (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Specific Strength (MPa/Kgm ⁻³)	Specific Modulus (GPa/ Kgm ⁻³)
E-Glass	2.08	1103	44.8	0.53	0.022
S-Glass	1.99	1931	51.7	0.97	0.026
Kevlar-49	1.38	1448	75.8	1.05	0.055
Type HMS Graphite	1.63	1172	206.8	0.72	0.127
Type AS Carbon	1.55	1724	137.9	1.11	0.089
Emerging High Strain Graphite	1.63	2413	310.3	1.48	0.190
Aluminum (7075-T6)	2.77	572	68.9	0.21	0.025
Titanium (6A1-4V)	4.43	1103	113.8	0.25	0.026
Steel (4130)	8.00	1379	200.0	0.17	0.025

1- Comparativa proprietà meccaniche tra fibre e metalli, immagine tratta da CompositesBlog

È interessante notare come, con peso specifico incredibilmente più basso, le fibre di questi materiali abbiano resistenze meccaniche anche molto superiori rispetto all'acciaio, da molti anni materiale per antonomasia nella realizzazione di strutture di ogni tipo.

Queste fibre hanno bisogno di essere lunghe per riuscire a trasmettere sollecitazioni più elevate (longitudinalmente), nonostante abbiano sicuramente più difetti interni.

Le fibre corte, infatti, hanno il problema di dover inevitabilmente trasmettere il carico attraverso la matrice, molto meno resistente. Per questo anche se possiedono meno difetti e intagli, generalmente sopportano carichi inferiori.

Solitamente vengono utilizzate sotto forma di tessuto (o di altri semilavorati), che può avere i più svariati stili, a seconda del tipo di sollecitazioni che dovrà sopportare e della forma del prodotto finito.

Principalmente si tratta di intrecciare la *trama* (*weft*, fibre tese orizzontalmente) con l'*ordito* (*warp*, fibre tese verticalmente), mediante macchine apposite simili a telai.

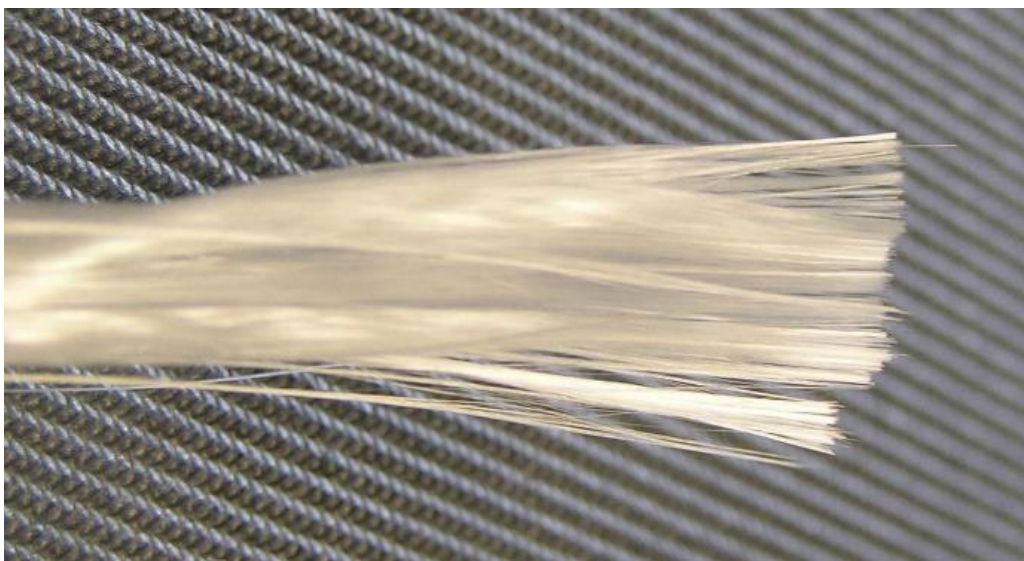
Tessuti più complessi e con fibre fortemente intrecciate tra loro, limitano la capacità di adattarsi alla forma della superficie richiesta (*drappaggio*); tuttavia, tessuti lasciati più “liberi” potrebbero presentare problematiche di resistenza in certe direzioni.

Per questo è bene progettare il materiale composito a seconda della sua futura applicazione: in questo modo si può creare un materiale “ad hoc” che massimizza le caratteristiche meccanico-fisiche richieste per quel determinato utilizzo.

Per via della sua elevata resistenza e del suo costo estremamente basso, la fibra di vetro (in tutte le sue varianti) è il tipo di fibra più largamente utilizzato nella realizzazione di materiali compositi. Per via dell’effetto grandezza, il vetro diventa così un materiale molto resistente, al contrario di quanto si creda prendendo in considerazione ad esempio il pannello di una comune finestra, molto fragile. Infatti, a livello macroscopico questo materiale presenta notevoli difetti di cristallizzazione, punti in cui si concentrano gli sforzi e si formano microfratture.

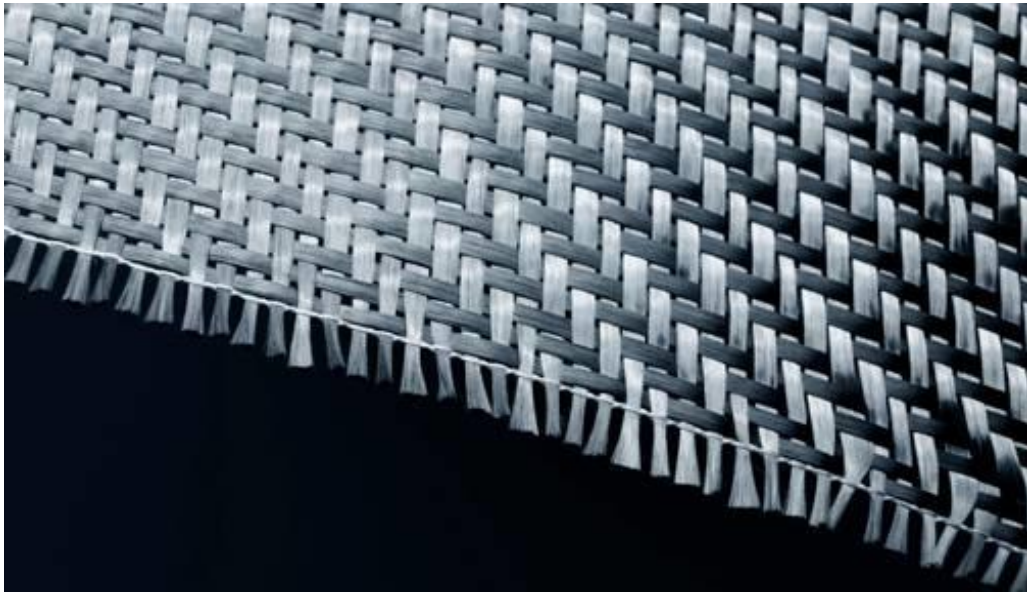
La comune vetroresina (GRP, glass-reinforced plastic) è probabilmente il composito più diffuso a base di fibra di vetro.

La fibra di carbonio è molto più costosa. Raggiunge resistenze meccaniche superiori a quelle della fibra di vetro, presentando un modulo elastico molto più elevato ed è quindi impiegata per la realizzazione di prodotti più rigidi. Resiste molto alla fatica e alla corrosione, ed è un buon isolante termico.



2 – Fibre di vetro, immagine tratta da Wikipedia

1.1 - Le fibre



3 – Tessuto in fibra di carbonio, immagine tratta da BCA Chemistry

1.1.1 Tipologie di tessuti

Le fibre possono essere unite tra loro nei modi più disparati, a seconda dell'applicazione.

Il concetto alla base risiede nella anisotropia di questi materiali: per forza di cose, gli sforzi e le sollecitazioni vengono trasmessi attraverso le fibre soltanto longitudinalmente. Per questo è necessario posizionare i filamenti in direzione parallela alla sollecitazione, per evitare che sia solo la matrice ad essere sottoposta allo sforzo con conseguente rottura.



4 – MAT in fibra di vetro, immagine tratta da Resin Fibre And Glass Supplies

Uno dei semilavorati più utilizzati è il MAT, che non è un tessuto vero e proprio: è formato da diversi strati di fibre corte non tessute, disposte casualmente, fornito secco o pre-impregnato.

È molto utilizzato per via del suo basso costo, e per via della sua isotropia. Tuttavia, non ha proprietà eccezionali e viene utilizzato quando è necessario un peso basso e non una particolare resistenza meccanica.

I cosiddetti *fabrics* sono i comuni tessuti, ottenuti “incrociando” più o meno ortogonalmente la trama (fili tesi trasversalmente) con l’ordito (fili tesi longitudinalmente).

Ci sono molti stili di tessitura che forniscono ai tessuti caratteristiche diverse: ad esempio, inclinando i fili a una certa angolazione, il tessuto potrà sopportare carichi anche in quella direzione, pur risultando meno efficace verso quelle principali.

Esistono poi tessuti cosiddetti “unidirezionali” (o “uniassiali”, UD), ottenuti tessendo insieme fibre orientate in una particolare direzione. Offrono resistenza praticamente nulla se sollecitati non longitudinalmente.

1.1 - Le fibre



5 – Tessuto unidirezionale in fibra di carbonio. immagine tratta da NauticExpo

Tessuti più complessi sono invece i “multiassiali”: consistono in più strati di fibre lunghe orientati diversamente, disposti uno sopra l’altro e poi tessuti insieme. Il vantaggio evidente è che si ottiene un tessuto che ha buone proprietà meccaniche in più direzioni, a seconda del numero di strati dal quale è formato.

I multistrato possono essere formati anche da più tipologie di tessuti uniti tra di loro. Ad esempio, per l’esecuzione delle prove sperimentali presenti in questo elaborato, è stato utilizzato un tessuto (che per comodità verrà chiamato tessuto RTM) formato da un sottile strato di biassiale unito tramite polipropilene (PP) ad uno di MAT.

1.1.2 Altre caratteristiche delle fibre

I tessuti vengono venduti al metro quadro dalle aziende che li producono: ogni prodotto presente nei cataloghi è accompagnato dalla sua *grammatura* (g/m^2), relativa ad un certo spessore. A parità di superficie e spessore, tessuti di uno stesso materiale ma con stili diversi possono quindi avere grammature diverse in relazione alla percentuale di volume di fibra presente. È importante non confondere la grammatura con la densità: un determinato materiale possiede una determinata grammatura al metro quadro solo ed esclusivamente allo

spessore indicato. Campioni di uno stesso materiale, con stesso stile, ma semplicemente con spessori diversi possiederanno grammature diverse (ma le fibre avranno comunque, per forza, la stessa massa volumica). Questo è da tenere in considerazione anche nel caso in cui le fibre vengano compresse e quindi riducano notevolmente il loro spessore.

Una caratteristica dei tessuti per la produzione di materiali compositi da tenere in considerazione risiede nella cosiddetta “*drappabilità*”, ovvero la capacità del tessuto di assumere la forma desiderata (all’interno dello stampo).

Tessuti con fibre fortemente intrecciate tra loro risulteranno più rigidi e scarsamente si adatteranno a superfici irregolari, rendendo la realizzazione della preforma più complicata.

Per questo non è possibile utilizzare proprio tutti i tessuti per realizzare forme molto complesse; questo varia molto a seconda dello stile del tessuto considerato.

Un’altra caratteristica fondamentale dei tessuti è la *permeabilità*, in parole povere quanto facilmente il tessuto si lascia attraversare dalla resina. Tessuti con più spazio tra le fibre risulteranno più permeabili.

Questo influenza notevolmente i processi produttivi dei materiali compositi, soprattutto in termini di costi.

Conoscendo la permeabilità di un determinato materiale, infatti, è possibile simulare al calcolatore l’intero processo. Si possono ricavare dati quali sollecitazioni sulle facce dello stampo (dovute alla pressione), rapporti di impregnazione locale, velocità di impregnazione. Questo passo è necessario per evitare di costruire stampi e attrezzature dall’elevatissimo valore economico non correttamente dimensionati.

1.2 *Tecnologie di produzione*

I materiali polimerici termoindurenti vengono prodotti utilizzando degli stampi più o meno complessi, opportunamente dimensionati e progettati avvalendosi di attente e precise simulazioni al calcolatore.

Uno stampo di questo tipo, infatti, può arrivare a costare anche centinaia di migliaia di euro, per cui è bene testare preventivamente se la soluzione adottata sarà esente da difetti di progettazione.

Gli stampi possono essere principalmente in materiale composito per piccole serie (basso costo, vita utile media), oppure in metallo per le grandi serie (dato l'elevato costo, e per formature che richiedono un riscaldamento).

Sul fondo dello stampo si applica un materiale, detto *distaccante*, che ha lo scopo di rendere isolati stampo e prodotto finito: in questo modo la resina non si potrà “incollare” allo stampo e renderà più semplice l'estrazione del pezzo. Solitamente è composto da cera o altri tipi di resine.

Immediatamente sopra il distaccante viene posto poi il cosiddetto *gelcoat*, avente l'importante scopo di dare la finitura superficiale al prodotto finito. Questo materiale composto da resine, infatti, ricopre completamente la parte più esterna del pezzo e lo protegge dagli agenti atmosferici, dall'acqua e dall'usura superficiale, oltre a donare una certa estetica.

Per oggetti di forma particolare e per produzione in piccola serie, dove non è richiesta particolare precisione nel processo, ancora oggi si utilizza la laminazione manuale: un operatore applica il distaccante e il gelcoat sul fondo dello stampo, per poi sovrapporre il rinforzo in fibra (solitamente in vetro, per questa tecnologia). Successivamente, applica la resina su tutto lo stampo semplicemente versandola sopra o spalmandola con un rullo, oppure tramite spruzzo. Può seguire un eventuale compattazione sottovuoto, a seconda del processo; ancora molto utilizzata oggi per la produzione di scafi di imbarcazioni.

Chiaramente, il limite di questa tecnologia è la ripetibilità e la precisione del prodotto finito: per quanto un operatore possa avere esperienza, non potrà mai realizzare due parti perfettamente uguali tra di loro.

Per avere queste caratteristiche è necessario utilizzare un processo che si avvale dell'utilizzo di macchinari, come ad esempio l'utilizzatissimo RTM e varianti.

1.2.1 La tecnologia RTM

Il processo RTM, acronimo di “*Resin Transfer Moulding*”, è utilizzato in tutte le sue varianti in moltissimi ambiti per la realizzazione di componenti di alta qualità.

Negli ultimi anni, sta cominciando ad essere preso molto in considerazione per via della eccellente precisione e qualità dei pezzi prodotti, della ottima finitura superficiale e per il fatto che sia adottabile per la produzione di componenti molto grandi e complessi.

È un processo che può essere relativamente veloce, a seconda della variante adottata.

Al contrario delle tecnologie manuali, l’RTM è caratterizzato dall’utilizzo di stampi chiusi: infatti, la resina è iniettata (e/o aspirata) all’interno di uno stampo isolato dall’esterno.

Ma la particolarità che più lo contraddistingue dalle altre tecnologie è il fatto che la resina venga iniettata e diffusa *attraverso* la fibra: prende un ruolo molto importante la porosità e quindi la *permeabilità* del tessuto secco che si sta utilizzando.

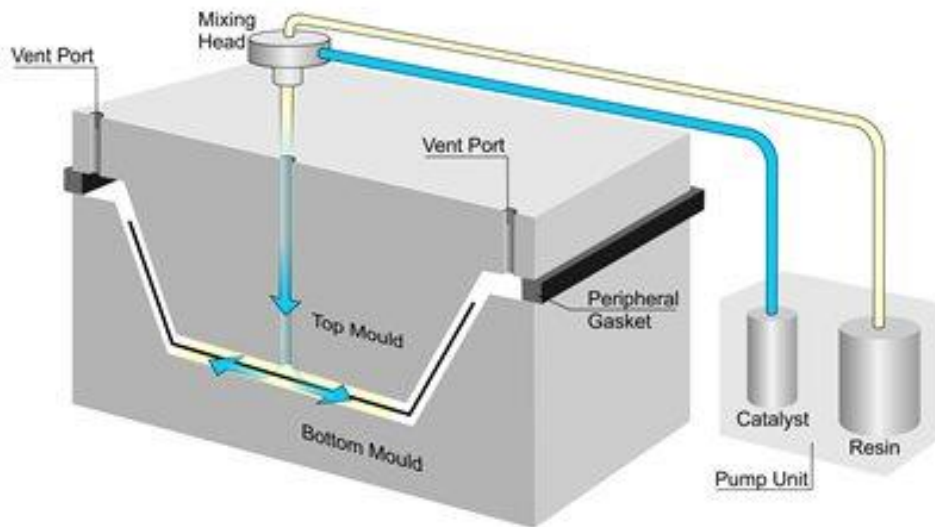
Conoscere la permeabilità del materiale è indispensabile per poter eseguire simulazioni al computer, senza la quale non è possibile stimare la velocità di avanzamento della resina attraverso la fibra. È fondamentale per calcolare pressioni e forze che entrano in gioco nello stampo, e per poterlo quindi dimensionare opportunamente. Fornisce anche informazioni su eventuali zone non impregnate, e quindi sulla qualità del prodotto finito.

1.2.2 RTM, VARTM e varianti

L’RTM tradizionale (o Low Pressure RTM) consiste nell’iniezione in pressione della resina all’interno di uno stampo (formato da due facce che si separano) chiuso e ben isolato, all’interno del quale è già stato posizionato il rinforzo opportunamente modellato, il distaccante e l’eventuale gelcoat.

Il rinforzo, in tessuto secco, è attraversato dalla resina che per via della porosità del materiale che sta attraversando viene diffusa lungo tutto lo stesso nello stampo.

1.2 - Tecnologie di produzione



6 – Schema di un impianto di iniezione per tecnologia RTM, immagine tratta da Nuplex

Le fasi principali di questo processo sono 3:

1. *Realizzazione della preforma*

La preforma è l'insieme dei rinforzi (tessuti secchi o fibre) opportunamente modellati secondo la forma finale che il componente dovrà avere. In pratica è "l'anima" del componente, dove i tessuti possono essere tenuti insieme da speciali collanti polimerici o sono stati realizzati tridimensionalmente con già la forma prestabilita. L'oggetto così ottenuto è pronto per essere impregnato; l'operazione può avvenire anche direttamente nella cavità dello stampo, dopo aver preventivamente cosparso di distaccante l'interno della stessa. Da tenere in considerazione è il riempimento totale della superficie: se non si occupasse correttamente tutto lo spazio disponibile, la resina iniettata non impregnerebbe correttamente l'intera preforma e troverebbe meno resistenza per raggiungere preventivamente il canale d'uscita. Inoltre, si avrebbe una discontinuità nella concentrazione della resina lungo i tessuti secchi, con conseguenti indebolimenti strutturali.



7 – Preforma prima di essere inserita nello stampo, immagine tratta da ABMACO

2. *Iniezione della resina*

Lo stampo viene chiuso e sigillato; la resina viene miscelata con l'agente reticolante (catalizzatore) e viene iniettata in pressione all'interno del canale di entrata.

Per evitare bolle d'aria che comporterebbero porosità non volute nel pezzo finito (punti deboli dal punto di vista della resistenza meccanica), il processo può essere assistito realizzando con una pompa un vuoto d'aria all'interno dello stampo (Vacuum Assisted RTM, VARTM): in questo modo, si evita che eventuale aria possa rimanere intrappolata al suo interno.

In ogni caso, date le conseguenze per nulla trascurabili della presenza di aria durante la polimerizzazione, è opportuno sottoporre la resina a un processo di degasazione prima dell'iniezione stessa. Lo stampo molto spesso è riscaldato per favorire l'afflusso della resina (diminuendo la viscosità).

3. *Cura*

Al termine dell'iniezione, la matrice sta già polimerizzando all'interno dello stampo. Per permettere una completa reticolazione, spesso bisogna fornire energia dall'esterno sotto forma di calore. Questo solitamente avviene mantenendo ad una certa temperatura lo stampo, ad iniezione terminata, per un tempo prestabilito.

Una volta terminata la cura, il prodotto si può estrarre dallo stampo ed è pronto per subire eventuali lavorazioni post-cura.

1.2 - Tecnologie di produzione



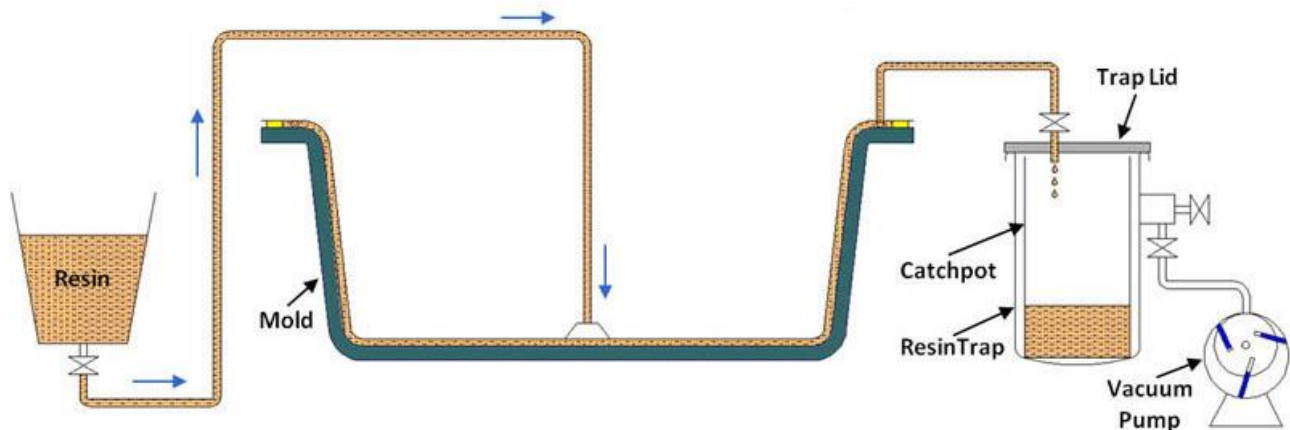
8 – Stampo viene aperto per estrarre il pezzo curato, immagine tratta da Orenco Composites

Esistono anche altre varianti di rilevante importanza di questi processi, come ad esempio l'High Pressure RTM (HP-RTM): è in tutto e per tutto uguale all'RTM, ma la pressione di iniezione è molto elevata (all'interno dello stampo si può raggiungere i 120 bar) e quindi i tempi sono ridotti al minimo. È una tecnologia molto costosa, ma fortemente automatizzabile: è il processo più adatto per massimizzare il volume produttivo, che però si limita a pezzi di piccolo taglio. Inoltre, è praticamente applicabile solo a rinforzi molto resistenti sia termicamente che meccanicamente (fibra di carbonio) per via delle elevate temperature e pressioni a cui è sottoposta la preforma e lo stampo, tassativamente in acciaio per i motivi appena indicati.

1.2.3 Vacuum Infusion Process (VIP)

Il VIP è un processo molto simile a quello tradizionale, ma molto più economico. Si differenzia dall'RTM dalla modalità con la quale avviene l'introduzione della matrice nella preforma: la resina non viene più iniettata in pressione, ma una depressione creata da una pompa richiama la resina stessa all'interno dello stampo.

In questo modo viene eliminato totalmente il problema della presenza di eventuali bolle d'aria intrappolate.



9 – Schema di un processo VIP, immagine tratta da VacMobiles

La caratteristica fondamentale di questa tecnologia è il costo fortemente ridotto. Non essendoci più una iniezione diretta in pressione della resina, le forze che si scaricano sulle facce dello stampo sono molto ridotte. Questo permette di lavorare con uno stampo dalle dimensioni e resistenze notevolmente ridotte, e solo con metà di quest'ultimo: la metà superiore infatti è sostituita da un cosiddetto "vacuum bag", una sacca trasparente che permette, oltre a risparmiare molto denaro, di vedere il fronte di resina che avanza, e controllare quindi lo stato del processo.

1.2 - Tecnologie di produzione



10 – Processo VIP durante la fase di impregnazione (fronte di resina che avanza in verde più scuro), immagine tratta da BoatDesign

La qualità dei componenti (anche con geometrie molto complesse) prodotti con questo metodo è eccezionale, e viene utilizzato anche per creare prodotti di notevoli dimensioni.

Grazie alla sua economicità, è impiegabile facilmente anche per produzioni in piccola serie.

Tuttavia, questo processo non è esente da difetti.

Il volume produttivo è molto basso: infatti, rispetto all'RTM tradizionale, i tempi di infusione sono molto elevati ed è scarsamente automatizzabile.

Inoltre, è utilizzabile soltanto per produrre componenti che devono essere finiti su un solo lato.

Gli stampi per VIP sono solitamente in materiale composito, ma per dimensioni contenute sono spesso in metallo (ad esempio alluminio, date le scarse sollecitazioni a cui sarà sottoposto). Le matrici, invece, devono essere resine poco viscosi per evitare tempi di infusione eccessivi.

Il VIP è la tecnologia utilizzata per l'esecuzione delle prove sperimentali presenti in questo elaborato, per via della facile realizzazione delle attrezzature e del loro costo, unite ad un'ottima resa qualitativa.

1.2.4 Resin Film Infusion (RFI)

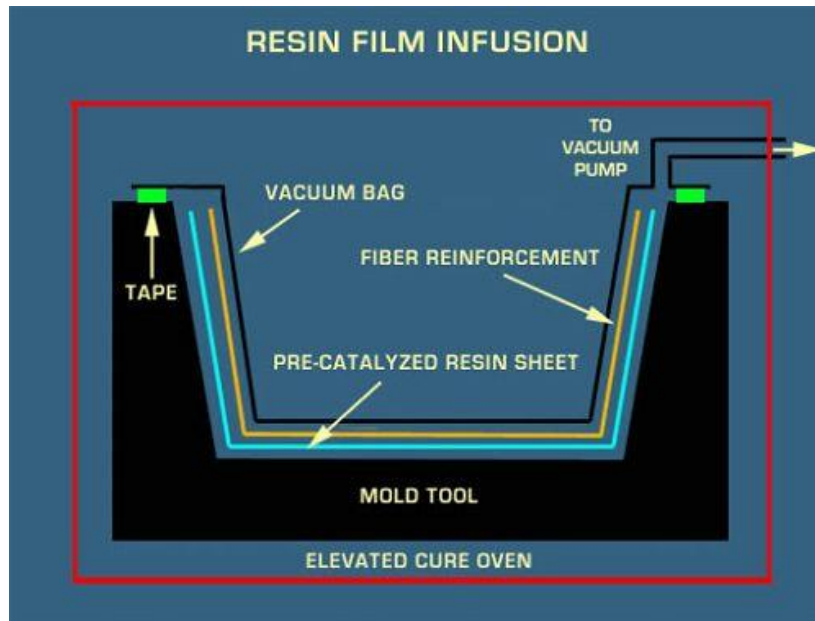
Il tempo necessario per produrre parti di notevoli dimensioni (ad esempio l'ala di un aereo), impregnando tessuti non molto permeabili, sarebbe molto elevato con i metodi visti in precedenza, soprattutto nel caso di resine molto viscosi. Il rischio di non impregnare bene le parti più lontane è molto elevato.

Per fare fronte a queste problematiche, è stata ideata una particolare variante del processo VIP: si posiziona sullo stampo inferiore della resina, che a temperatura ambiente si presenta allo stato solido, e si pone sopra di essa la preforma dei tessuti.

Dopo aver chiuso lo stampo con il vacuum bag, eseguendo l'infusione in autoclave la resina solida si scioglie per via delle pressioni e della temperatura e torna allo stato liquido, impregnando la preforma posizionata sopra di essa. Il percorso della resina è drasticamente ridotto e così anche i tempi di infusione. Si aumenta poi la temperatura nell'autoclave per permettere alla resina di reticolare correttamente, una volta assicurati che l'impregnazione sia stata ultimata.

Per la buona riuscita di questo metodo è necessaria una compattazione ottimale delle fibre e della resina solida all'interno dello stampo.

1.2 - Tecnologie di produzione



11 – Schema di un processo RFI, immagine tratta da VoodooHotRods



12 – Ala in fibra di carbonio realizzata tramite il processo RFI, immagine tratta da CompositeWorld

2 *La permeabilità nei tessuti*

La fase preliminare nello studio di realizzazione di questi impianti produttivi è eseguire una simulazione numerica, che stimi velocità del flusso, sollecitazioni all'interno dello stampo e rapporti di impregnazione locale. Per stimare questi valori, si basa la simulazione sulla legge di Darcy: descrive il moto di un fluido viscoso attraverso un mezzo poroso.

$$\vec{V} = \frac{-K}{\mu} \nabla P$$

Dove:

\vec{V} , velocità del flusso

K, tensore di permeabilità del rinforzo

μ , viscosità della resina

∇P , gradiente di pressione

Il gradiente di pressione è espresso come:

$$\nabla P = \frac{\Delta P}{L}$$

Dove ΔP : differenza di pressione

L: lunghezza del mezzo poroso

Per quanto riguarda la permeabilità K, invece, si parla del tensore:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

2 - La permeabilità nei tessuti

Le permeabilità principali K_1 (K_x) e K_2 (K_y) sono assunte rispettivamente in direzione x e y, cioè longitudinalmente e trasversalmente, mentre K_3 (K_z) in direzione z è lungo lo spessore della pelle.

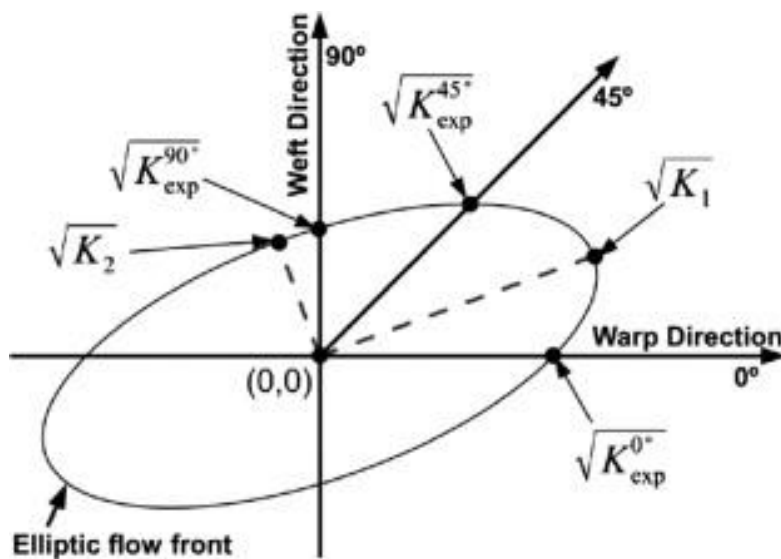
Sperimentalmente, però, non possiamo trovare direttamente questi valori.

Si trova infatti la permeabilità unidirezionale lungo una certa inclinazione della trama del tessuto. Chiamiamo questa permeabilità K_{exp} .

La permeabilità è rappresentabile sotto forma di ellissoide (ellisse se non la si considera lungo lo spessore z), secondo l'equazione di Freeze and Cherry¹:

$$\frac{1}{K_z} = \frac{\cos^2\theta}{K_x} + \frac{\sin^2\theta}{K_y}$$

Si ha quindi al variare dell'inclinazione della trama (weft), una variazione del valore di K_{exp} .



13 – Ellisse di permeabilità, immagine tratta da “Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II”

I rinforzi fibrosi, per via della loro struttura hanno al loro interno molto spazio “vuoto”, occupato da aria: è proprio questo spazio tra le fibre che verrà riempito dalla resina per poi

¹ (Freeze & Cherry, 1979)

reticolare. Riferirsi al volume di un rinforzo fibroso ha quindi poco significato fisico, essendo gran parte di quello stesso volume occupato da aria, e non dal materiale in questione.

A questo punto è importante introdurre una grandezza, chiamata volume di fibra, che espressa in frazione quantifica quanto spazio è effettivamente occupato dalle fibre in un determinato campione di materiale.

Questo volume è esprimibile tramite la relazione:

$$V_f = \frac{m_f}{l * w * h * \rho_f}$$

Dove m_f : massa del campione

l : lunghezza del campione

w : larghezza del campione

h : altezza (spessore) del campione

ρ_f : massa volumica delle fibre da cui è composto il campione

Conoscendo il volume di fibra è direttamente derivabile la porosità libera del rinforzo fibroso, ovvero la parte occupata in frazione da aria (o dal vuoto) all'interno del campione:

$$\phi = 1 - V_f$$

Chiaramente, questa sarà percentualmente la parte che verrà occupata dalla resina una volta che le pelli saranno impregnate.

A valle di queste considerazioni, si può procedere con il calcolo delle permeabilità unidirezionali sperimentali, dopo aver estrapolato la posizione del fronte di fluido in relazione al tempo impiegato.

2 - La permeabilità nei tessuti

Si è seguito il metodo SFF (Square Flow Front)², valido solo in caso di iniezione e/o infusione a *pressione costante*:

$$K_{exp} = \frac{x_{ff}^2 * \phi * \mu}{2 * P_{inj} * t}$$

Dove x_{ff} : posizione del fronte di fluido all'istante t

ϕ : porosità libera del rinforzo fibroso

μ : viscosità del fluido

P_{inj} : pressione di infusione

Basterà fare una media dei valori calcolati a ogni istante t per avere una stima del valore di permeabilità nella direzione analizzata.

Successivamente, si può risalire ai valori di permeabilità nelle direzioni principali:

$$K_1 = K_{exp}^0 \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 - \frac{\alpha_2}{\cos(2\beta)}} \quad K_2 = K_{exp}^{90} \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{\cos(2\beta)}}$$

Dove:

$$\alpha_1 = \frac{K_{exp}^0 + K_{exp}^{90}}{2} \quad \alpha_2 = \frac{K_{exp}^0 - K_{exp}^{90}}{2}$$

Per quanto riguarda l'orientazione β dell'ellisse invece:

$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_2^2}{\alpha_2 * K_{exp}^{45}} \right)$$

² (Vernet, Ruiz, & Advani, 2014)

La permeabilità del mezzo poroso influenza direttamente la resistenza all'attraversamento del fluido: un mezzo con elevata permeabilità si fa attraversare senza difficoltà; come si può però facilmente dedurre dalla legge di Darcy, questa caratteristica è opposta alla viscosità, che invece si oppone drasticamente all'aumentare della stessa.

La problematica principale in questa relazione resta la determinazione sperimentale del valore della permeabilità: nonostante negli ultimi anni siano stati fatti molti passi in avanti a riguardo, rimane comunque una parte molto ostica nello studio delle tecnologie RTM. Questo perché il rischio di commettere errori è molto alto, ed è necessario un banco prova appositamente costruito per poter eseguire le misure.

2 - La permeabilità nei tessuti

3 Prove di misura della permeabilità

3.1 Descrizione della prova

Lo scopo di questo progetto è di individuare tramite prove sperimentali, il valore di permeabilità di alcuni tessuti in fibra di vetro (tessuto RTM e tessuto RTM+UD), con fibre orientate a 0°, 45° e 90°.

Per ogni orientazione delle fibre sono state eseguite tre prove per ridurre al minimo le casualità e fornire il più possibile dati precisi.

Il banco prova utilizzato è costituito da una base rettangolare in alluminio, con entrambi i lati lavorati per ottenere due “stampi”, il primo con dimensioni 450x100x6 mm e il secondo con dimensioni 450x100x4 mm. Le pelli utilizzate hanno rispettivamente dimensioni 400x100x3.2 mm nel caso di tessuto RTM e 400x100x1 mm per il tessuto unidirezionale.



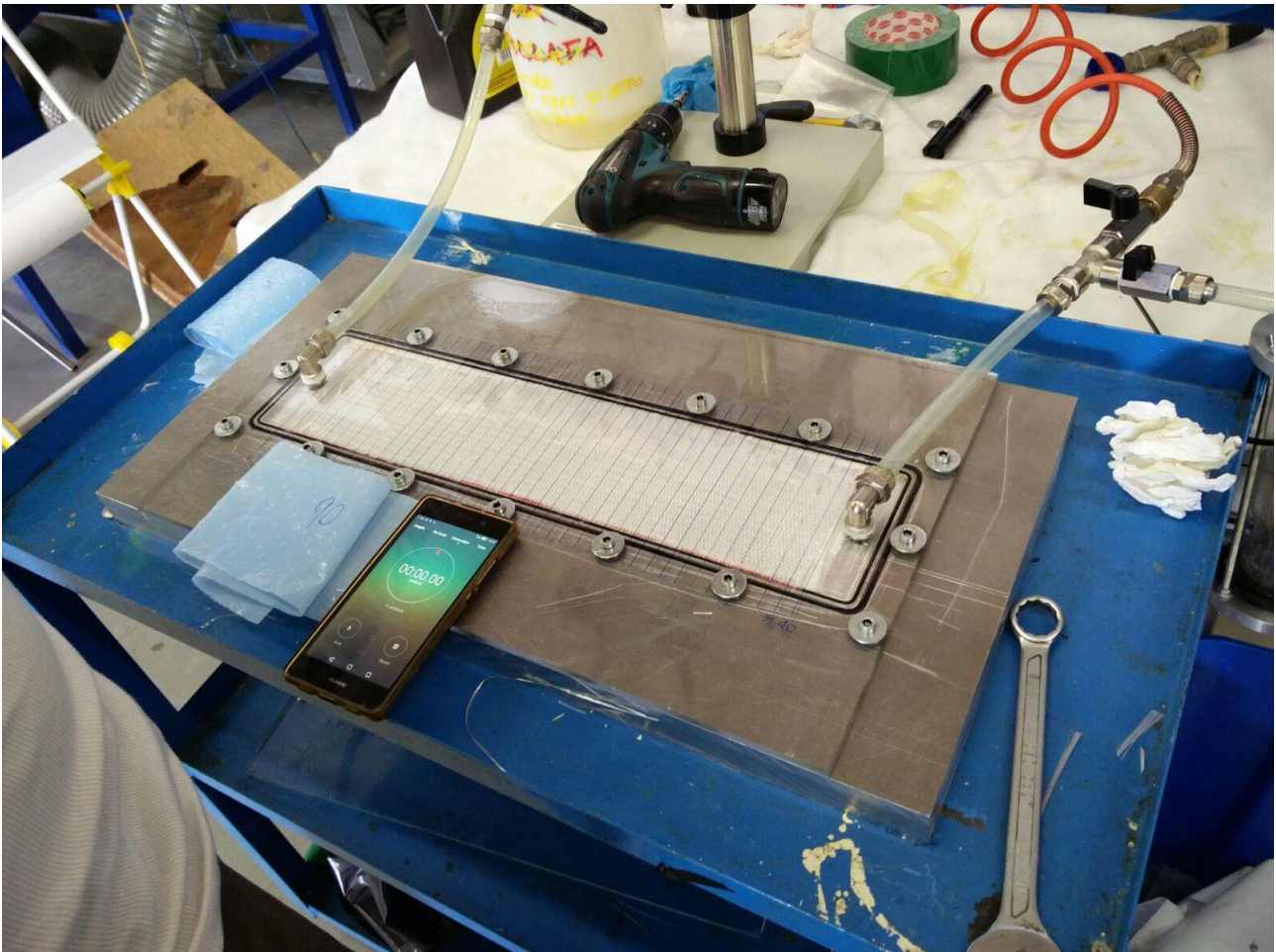
14 - Attrezzatura per misure di permeabilità (base in alluminio con cavità lavorata CNC)

Con le pelli secche già disposte all'interno, per chiudere lo stampo viene utilizzato un pannello in plexiglass opportunamente imbullonato per poter monitorare a ogni istante la

3.1 - Descrizione della prova

posizione del fronte di fluido, che viene richiamato all'interno della cavità mediante una depressione creata da una pompa del vuoto.

Per raccogliere i dati, le prove vengono filmate e successivamente analizzate estrapolando a intervalli regolari il tempo in relazione allo spazio percorso dal fronte di fluido.



15 - Attrezzatura per misure di permeabilità (banco prova completamente montato in opera)

Il tessuto RTM (fibra di vetro) utilizzato, come precedentemente anticipato, è formato da tre strati: il primo è tessuto biassiale (grammatura 600 g/m^2), il secondo polipropilene (grammatura 18 g/m^2) e il terzo MAT (grammatura 450 g/m^2). Complessivamente, lo spessore del tessuto a secco è di $3,2 \text{ mm}$ (indicato dal produttore e verificato).

Il tessuto unidirezionale utilizzato nella seconda parte delle prove è invece di spessore 1 mm (grammatura 600 g/m^2).

3.1 - Descrizione della prova

Nella prima parte della prova, si utilizzano due strati di tessuto RTM sovrapposti. Lo spessore della cava risulta essere di 6 mm esatti mentre lo spessore delle due pelli sovrapposte è 6,4 mm: imbullonando sopra il pannello in plexiglass, le pelli vengono leggermente compresse riducendo il loro spessore complessivo anch'esse a 6 mm. Così facendo si ha la certezza che vi sia perfetto contatto tra pelli e pannello, evitando eventuali fughe di fluido che potrebbero avvenire superiormente.

È ora necessario ricavare il valore esatto del volume di fibra contenuto nelle pelli compresse nella cava. Dopo aver ritagliato un campione del tessuto in esame di dimensioni note (52x78x 3,2 mm), si calcola il suo volume totale (non compresso) che risulta semplicemente essere:

$$V_t = 0.052m * 0.078m * 0.0032m = 1.298 * 10^{-5} m^3$$

Questo volume, chiaramente, considera anche tutte le parti “vuote” all'interno del campione. Successivamente, si è immerso il campione in esame in un cilindro graduato con errore molto basso contenente 100 ml di acqua. Cercando di eliminare eventuale aria rimasta intrappolata con una bacchetta di vetro, si è misurato un dislivello di 4 ml, corrispondente quindi a un volume soltanto di fibre:

$$V_1 = 4 * 10^{-6} m^3$$

È ora possibile ottenere la frazione di volume di fibre presenti nel campione di questo tessuto RTM, quando questo non è compresso in alcun modo ma rimane allo spessore di 3,2 mm:

$$V_{f1} = \frac{V_1}{V_t} = \frac{4 * 10^{-6} m^3}{1.298 * 10^{-5} m^3} = 0.308$$

Il tessuto in questione risulta avere quindi, al suo interno, circa il 30,8% di fibre e la restante parte vuota.

Considerando il fatto che una volta poste le pelli nell'attrezzatura queste verranno leggermente compresse, ci si aspetta che il valore di V_f incrementi leggermente (essendo le fibre più compattate).

3.1 - Descrizione della prova

Si calcola quindi il volume delle fibre contenute nelle pelli sovrapposte e compattate all'interno dello stampo (ricordando che le pelli hanno dimensione 400x100 mm):

$$V_2 = 2 * Area\ pelle * \frac{V_1}{Area\ campione}$$
$$= 2 * 0.1\ m * 0.4\ m * \frac{4 * 10^{-6}\ m^3}{0.052\ m * 0.078\ m} = 7.890 * 10^{-5}\ m^3$$

Il volume totale delle pelli sovrapposte e compattate nella tasca invece risulta essere (supponendo quindi lo spessore complessivo delle due pelli sovrapposte di 6 mm):

$$V_s = 0.4\ m * 0.1\ m * 0.006\ m = 2.4 * 10^{-4}\ m^3$$

Si può infine calcolare la frazione di volume di fibre contenuta nelle pelli compattate all'interno dello stampo:

$$V_{f2} = \frac{V_2}{V_s} = \frac{7.890 * 10^{-5}\ m^3}{2.4 * 10^{-4}\ m^3} = 0.329$$

E quindi si avrà:

$$\phi_{RTM} = 1 - V_{f2} = 1 - 0.329 = 0.671$$

Questo dato indica come nelle pelli all'interno dello stampo già chiuso si abbia circa il 67,1% di spazio vuoto, spazio che ovviamente verrà riempito dall'olio durante la prova.

Nella seconda parte della prova, si hanno invece sovrapposti uno strato di tessuto RTM e uno di tessuto unidirezionale UD, con modalità analoga alla precedente: il tessuto RTM è 3,2 mm mentre il tessuto UD 1 mm. Complessivamente risulteranno essere 4,2 mm con uno spessore

3.1 - Descrizione della prova

di cava 4 mm; anche qui si lascia un po' di spessore nelle pelli per compattarle e farle aderire bene con il pannello superiore. Sarà il MAT del tessuto RTM a diminuire il suo spessore per via della sua minore rigidità confronto al tessuto UD.

Per individuare ora la frazione di volume di fibre del tessuto RTM + UD, si utilizza la seguente relazione:

$$V_f = \frac{g_{RTM}}{h_{RTM} * \rho_{RTM}} + \frac{g_{UD}}{h_{UD} * \rho_{UD}}$$

dove rispettivamente g_{RTM} e g_{UD} sono le grammature dei due materiali, h_{RTM} e h_{UD} l'altezza delle pelli nella cavità e ρ_{RTM} e ρ_{UD} le loro masse volumiche.

Dividendo così la formula in due parti, rispettivamente la prima parte che considera il contributo del RTM ($h_{RTM} = 3\text{mm}$) e la seconda parte che considera il contributo dell'UD ($h_{UD} = 1\text{mm}$), è possibile eseguire correttamente il calcolo senza trascurare nessun fattore.

Sostituendo i valori:

$$V_f = \frac{(0.600 + 0.450 + 0.018)\text{kg/m}^2}{0.003\text{m} * 2200\text{kg/m}^3} + \frac{0.600\text{kg/m}^2}{0.001\text{m} * 2500\text{kg/m}^3} = 0.402$$

Si ottiene così il 40,2% di volume in fibra complessivo durante le prove RTM+UD.

Di conseguenza:

$$\phi_{RTM+UD} = 1 - V_f = 1 - 0.402 = 0.598$$

Come fluido è stato utilizzato un olio motore con viscosità 188 cPs a 26,6°C, data la facilità di reperimento e di pulizia dello stampo dopo ogni prova.

Le prove sono state eseguite a una temperatura ambientale di circa 26°C, e con una depressione di 0,5 bar.

3.1 - Descrizione della prova

In corrispondenza delle estremità del pannello in plexiglass, sono presenti due fori: il primo, è collegato tramite un tubo di gomma al serbatoio dell'olio; il secondo invece, è collegato alla pompa del vuoto che crea la depressione in grado di richiamare l'olio all'interno.

La prova viene fermata non appena l'olio raggiunge il foro d'uscita, dopo aver attraversato completamente le pelli.

3.1.1 *Alterazioni della prova*

Nella preparazione delle pelli, bisogna prestare particolare attenzione a ritagliarle con le corrette dimensioni: l'altezza e la larghezza delle stesse devono essere perfettamente compatibili con quelle dello stampo, in modo da costringere il fluido a passarci attraverso.

Nel caso questa condizione non venga rispettata, l'olio troverebbe una via preferenziale per attraversare lo stampo, e la prova sarebbe falsificata.

È bene specificare che, per quanto si possa essere scrupolosi nella realizzazione dei campioni, non è possibile eliminare alcune perturbazioni dai dati.

Ci sono poi due ulteriori effetti³ da tenere in considerazione:

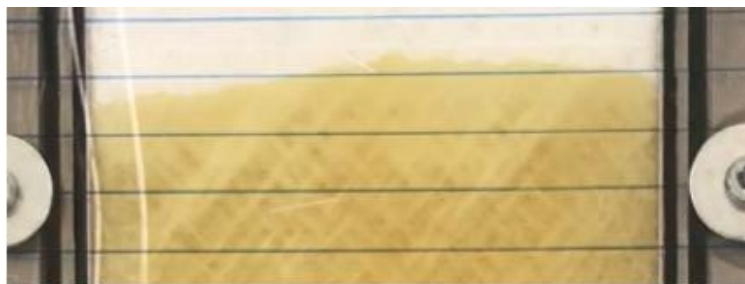
- 1) *Mold Wall Effect*: esiste una perdita di carico per attrito dovuta allo strisciamento del fluido sui bordi dello stampo. Questa perdita è stata stimata sperimentalmente, ed è circa tre ordini di grandezza inferiore alla pressione interna allo stampo. Questo effetto quindi può essere trascurato e non falsifica la prova, ma è da tenere conto che introdurrà una piccola percentuale di errore sul valore finale di permeabilità trovato.
- 2) *Preform Injection Edge Effect*: i bordi della preforma sono zone "perturbate" in cui la permeabilità del materiale potrebbe non essere quella del tessuto in questione. Infatti, tagliando la preforma e posizionando gli strati uno sopra l'altro, si va ad alterare la permeabilità locale del materiale in queste zone. Per ovviare a questo problema, basterà iniziare l'analisi dei dati poco dopo l'ingresso del fluido nel materiale, e analogamente

³ (Ferland, Guittard, & Trochu, 1996)

3.1 - Descrizione della prova

terminarla poco prima della sua fine. In questo modo, si escludono le zone critiche alle estremità. Chiaramente, non è possibile eliminare completamente questo effetto tra le superfici di contatto delle pelli sovrapposte; compattando le fibre, però, si cerca di minimizzarlo.

Nell'analisi dei dati relativi alle prove sperimentali, si è posta particolare attenzione alla posizione del fronte di fluido che avanza: spesso quest'ultimo non è perfettamente allineato e quindi la posizione effettiva del fluido è da "interpretare" a occhio. Questo inevitabilmente ha portato ad una piccola percentuale di errore sul risultato finale.



16 – Fronte di olio irregolare, immagine tratta da una prova con doppio tessuto RTM



17 – Fronte di olio irregolare, immagine tratta da una prova con tessuto RTM + UD

Nelle immagini, è evidenziato molto bene il problema in questione, rispettivamente nel caso di doppio strato di tessuto RTM e poi di singolo strato di tessuto RTM + UD: il fronte di fluido avanza più velocemente in certe zone (poiché la permeabilità locale è alterata) ed è quindi difficile interpretare quando il fluido è effettivamente alla posizione interessata.

3.1 - Descrizione della prova

Nel caso del tessuto unidirezionale (UD), il taglio non perfetto delle pelli ha contribuito notevolmente alla propagazione laterale del fronte di olio; essendosi sfibrate esternamente, hanno creato per il fronte una via preferenziale.

Nella prima parte delle prove il fronte di fluido è influenzato fortemente dall'ingresso nelle pelli, e la permeabilità locale è per cui alterata. Ad incrementare quest'ultima si aggiunge anche il fattore umano: le prime rilevazioni cronometriche sono a pochi decimi di secondo le une dalle altre. È difficile individuare il tempo esatto e pochi centesimi di secondo di errore possono modificare notevolmente il valore di permeabilità locale in questi punti. Inoltre, la rilevazione cronometrica è strettamente dipendente dal software utilizzato e dai frame per secondo con i quali sono stati registrati i video, che in questo caso rappresentano quindi la sensibilità nella misura del tempo.

I video sono stati registrati a 60 frame per secondo, che corrispondono quindi a una sensibilità di:

$$S = \frac{1}{60} = 0.017s$$

Chiaramente, questi effetti sono da sommare all'irregolarità del fronte di fluido, al Mold Wall Effect e al Preform Injection Edge Effect, sopracitati.

Ci si aspetta, quindi, che almeno nella prima parte delle prove (dove la rilevazione del tempo è difficoltosa e agiscono più disturbi) la misura della permeabilità sia alterata.

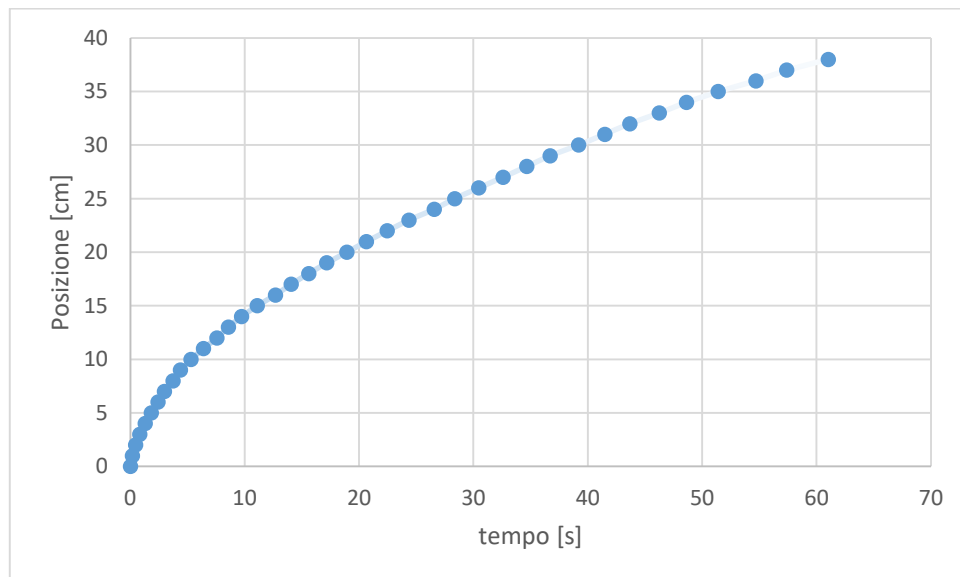
3.2 Risultati sperimentali

Vengono riportati ora i risultati delle prove sperimentali.

Ricapitolando i valori utilizzati nell'elaborazione dati:

Dati	Simbolo	Valore
Dimensioni prima cavità [mm]	$L*b*h$	450x100x6
Dimensioni seconda cavità [mm]	$L*b*h$	450x100x4
Viscosità olio (a 26,6°C) [cPs]	μ	188
Porosità libera tessuto RTM (in frazione)	ϕ_{RTM}	0,671
Porosità libera tessuto RTM + UD (in frazione)	ϕ_{RTM+UD}	0,598
Pressione di infusione [bar]	P_{inj}	0,5

3.2.1 Tessuto RTM (doppio strato)



18 - Posizione del fronte, 0° RTM, prova 1

3.2 - Risultati sperimentali

Dati acquisiti, 0° RTM, prova 1

x_{ff} [cm]	t [s]
0	0
1	0,18
2	0,45
3	0,83
4	1,31
5	1,84
6	2,41
7	2,99
8	3,73
9	4,39
10	5,31
11	6,39
12	7,57
13	8,57
14	9,73
15	11,09
16	12,69
17	14,06
18	15,59
19	17,17

x_{ff} [cm]	t [s]
20	18,93
21	20,64
22	22,46
23	24,36
24	26,57
25	28,36
26	30,45
27	32,6
28	34,65
29	36,7
30	39,2
31	41,48
32	43,67
33	46,24
34	48,64
35	51,39
36	54,69
37	57,39
38	61,02

Per passare dai dati acquisiti (posizione all'istante t) alla permeabilità, bisogna utilizzare per ogni punto il metodo SFF precedentemente enunciato:

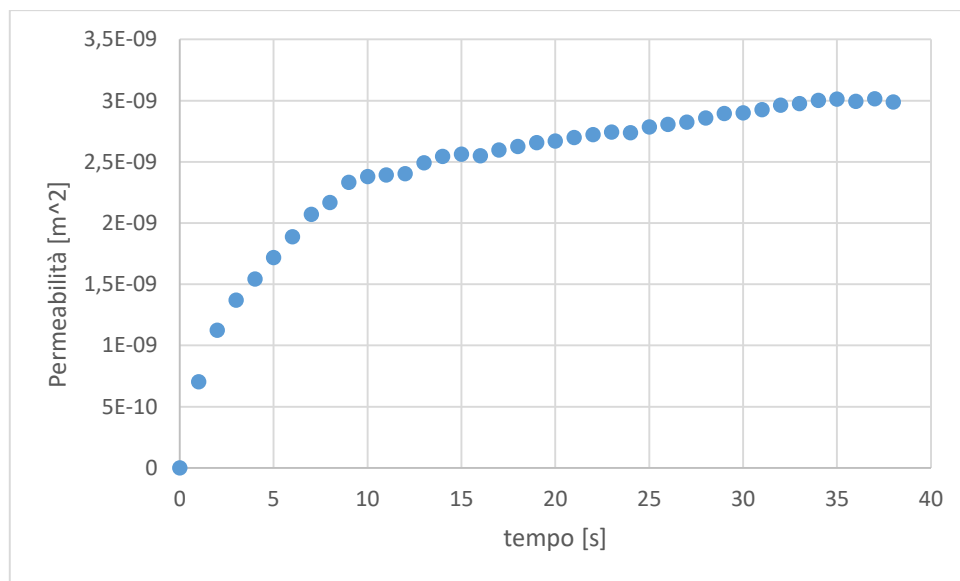
$$K_{exp} = \frac{x_{ff}^2 * \phi * \mu}{2 * P_{inj} * t}$$

Inserendo nella formula ogni posizione x_{ff} in relazione al tempo t (considerando tutti gli altri parametri costanti), si ottengono così i valori di permeabilità locale per ogni punto in analisi:

Permeabilità in relazione ai dati acquisiti, 0° RTM, prova 1

x_{ff} [cm]	t [s]	K_{exp} [m ²]
0	0	0
1	0,18	7,02E-10
2	0,45	1,12E-09
3	0,83	1,37E-09
4	1,31	1,54E-09
5	1,84	1,72E-09
6	2,41	1,89E-09
7	2,99	2,07E-09
8	3,73	2,17E-09
9	4,39	2,33E-09
10	5,31	2,38E-09
11	6,39	2,39E-09
12	7,57	2,40E-09
13	8,57	2,49E-09
14	9,73	2,55E-09
15	11,09	2,56E-09
16	12,69	2,55E-09
17	14,06	2,60E-09
18	15,59	2,63E-09
19	17,17	2,66E-09

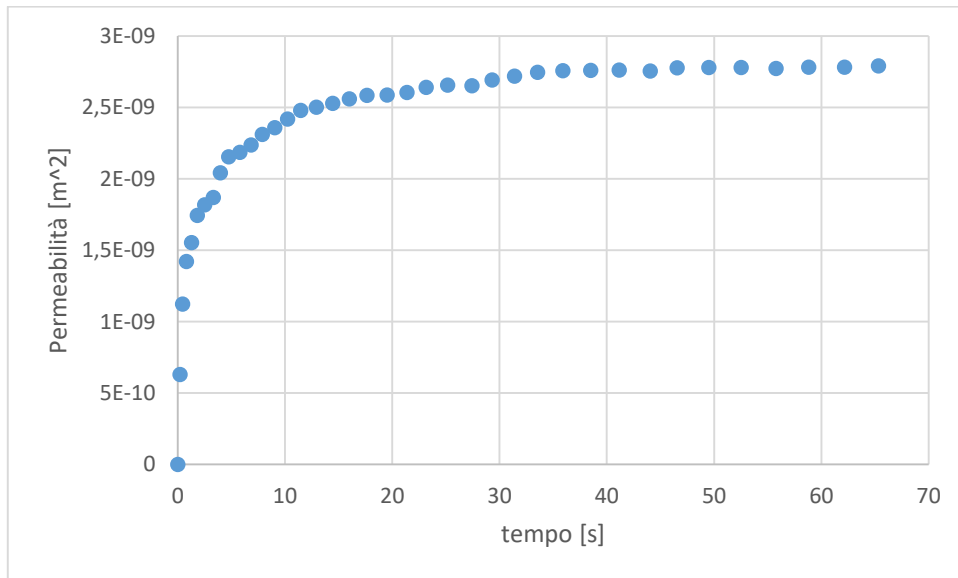
x_{ff} [cm]	t [s]	K_{exp} [m ²]
20	18,93	2,67E-09
21	20,64	2,70E-09
22	22,46	2,72E-09
23	24,36	2,74E-09
24	26,57	2,74E-09
25	28,36	2,78E-09
26	30,45	2,81E-09
27	32,6	2,83E-09
28	34,65	2,86E-09
29	36,7	2,90E-09
30	39,2	2,90E-09
31	41,48	2,93E-09
32	43,67	2,96E-09
33	46,24	2,98E-09
34	48,64	3,00E-09
35	51,39	3,01E-09
36	54,69	2,99E-09
37	57,39	3,01E-09
38	61,02	2,99E-09



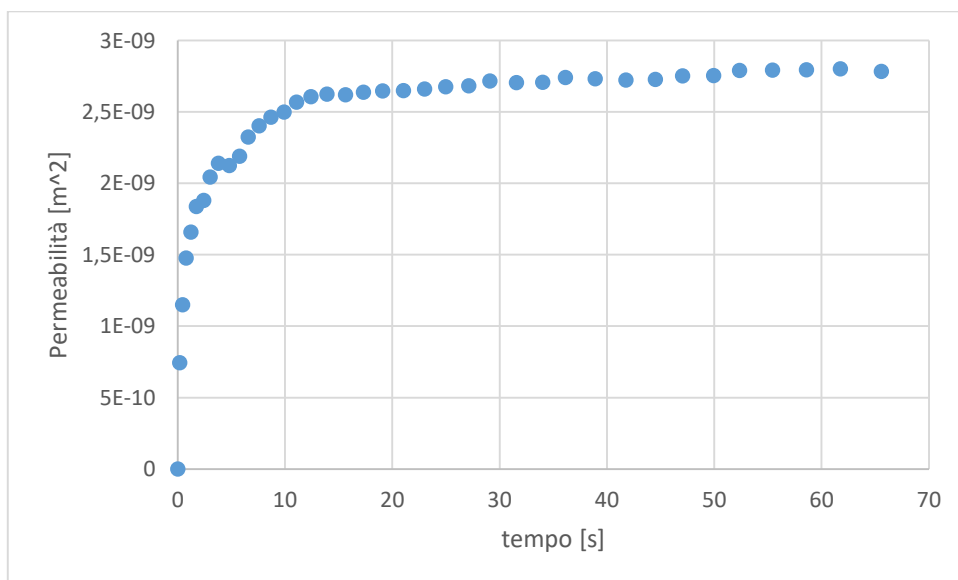
19 - Permeabilità locale, 0° RTM, prova 1

3.2 - Risultati sperimentali

Il procedimento viene ripetuto per tutte le prove, utilizzando l'opportuno valore di ϕ durante i calcoli, a seconda del tessuto in analisi.

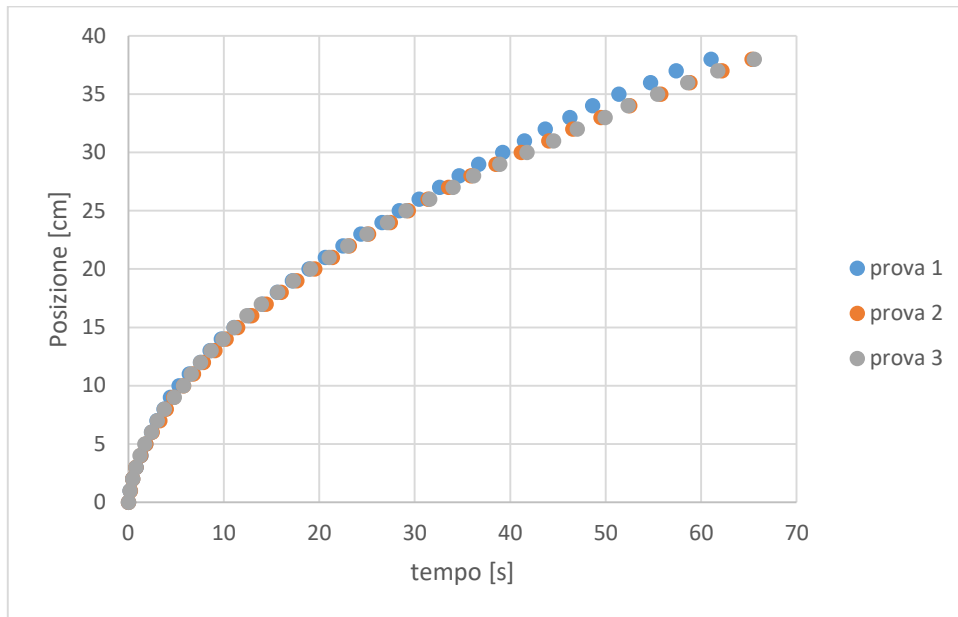


20 - Permeabilità locale, 0° RTM, prova 2

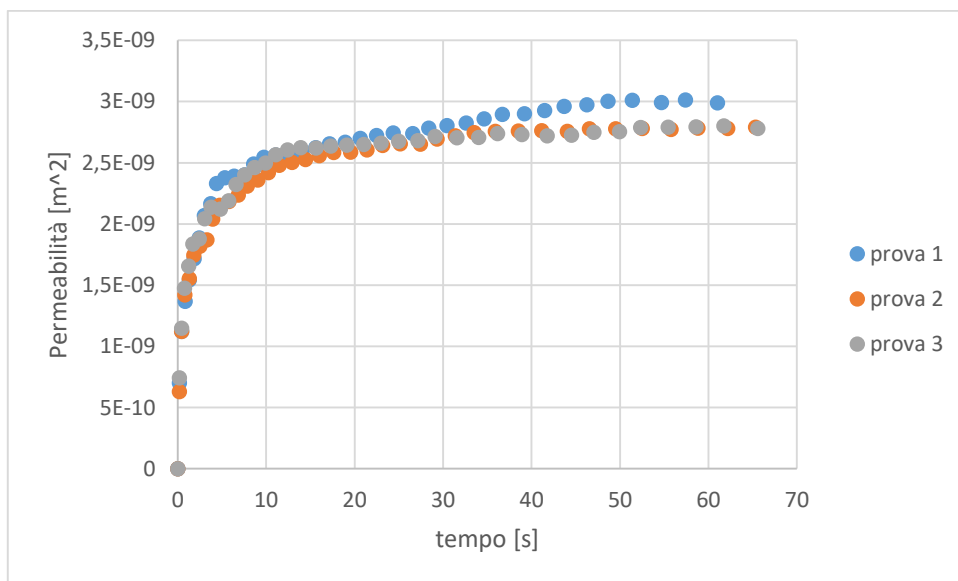


21 - Permeabilità locale, 0° RTM, prova 3

3.2 - Risultati sperimentali



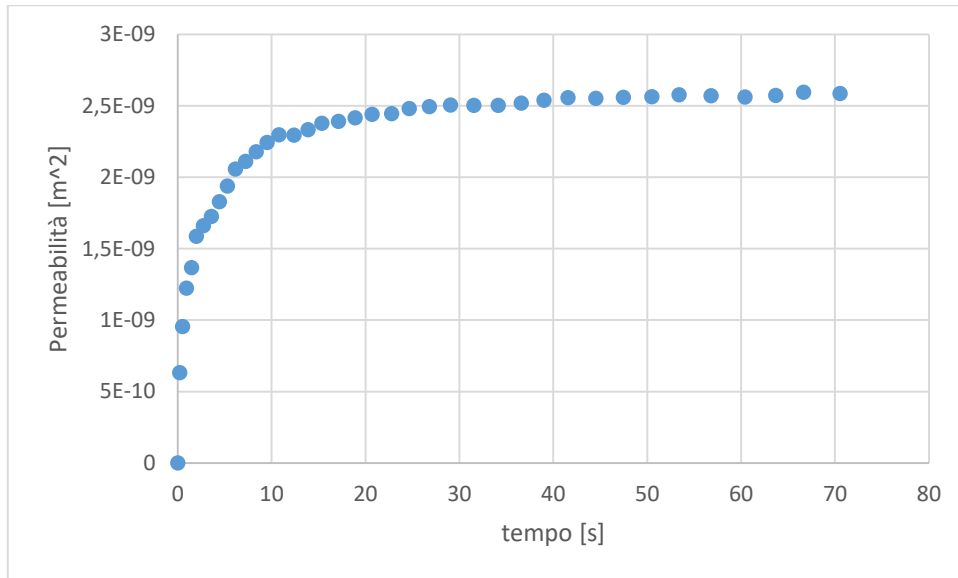
22 - Posizione del fronte, 0° RTM, comparativa prove



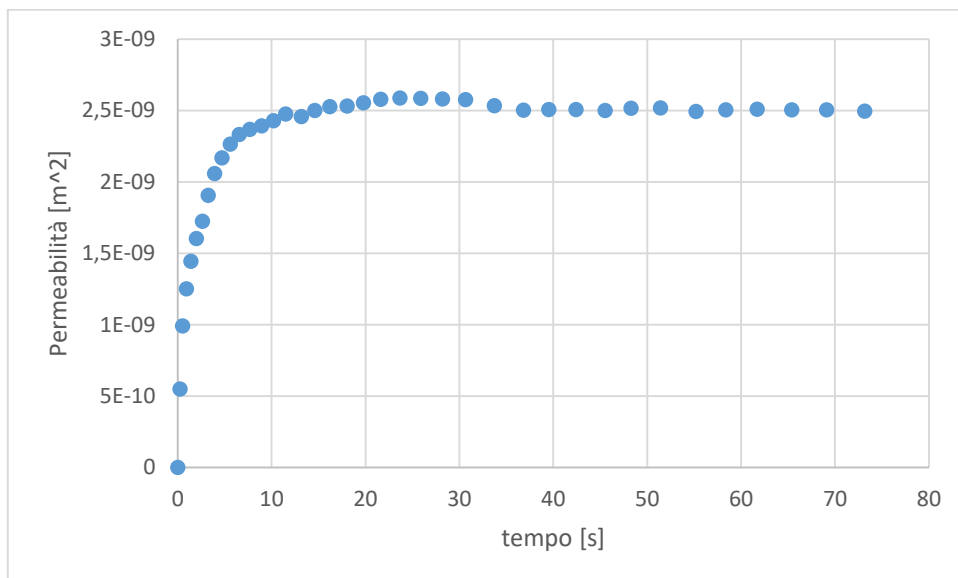
23 - Permeabilità locale, 0° RTM, comparativa prove

3.2 - Risultati sperimentali

Mentre la seconda e la terza prova presentano curve abbastanza piatte dopo circa 20 secondi dall'inizio dell'impregnazione, la prima prova a 0° del doppio tessuto RTM è influenzata fortemente da un fronte di fluido molto irregolare, che non permette una corretta valutazione della permeabilità. In tutti i casi, come precedentemente ipotizzato, la prima parte della prova è soggetta ad alterazioni del valore di permeabilità locale.

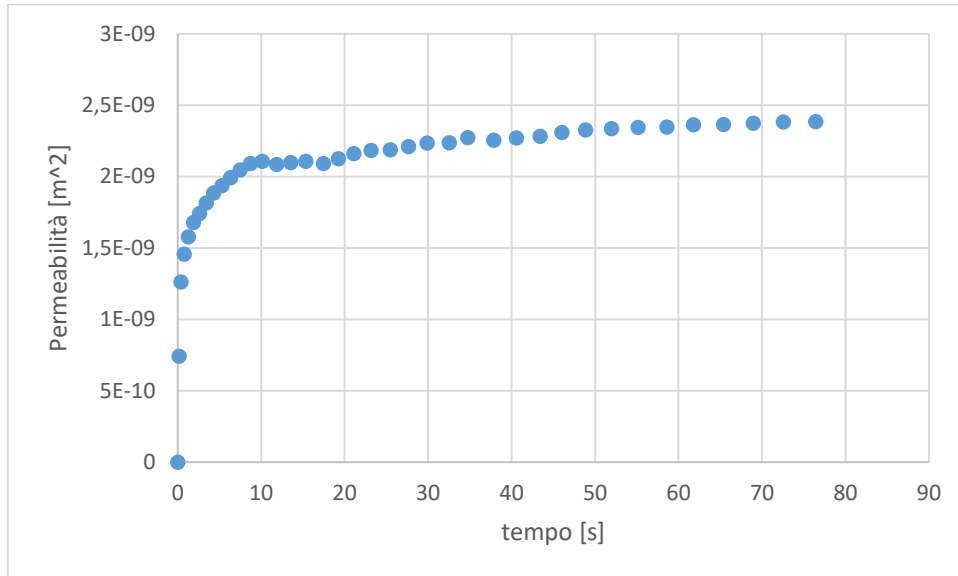


24 - Permeabilità locale, 45° RTM, prova 1

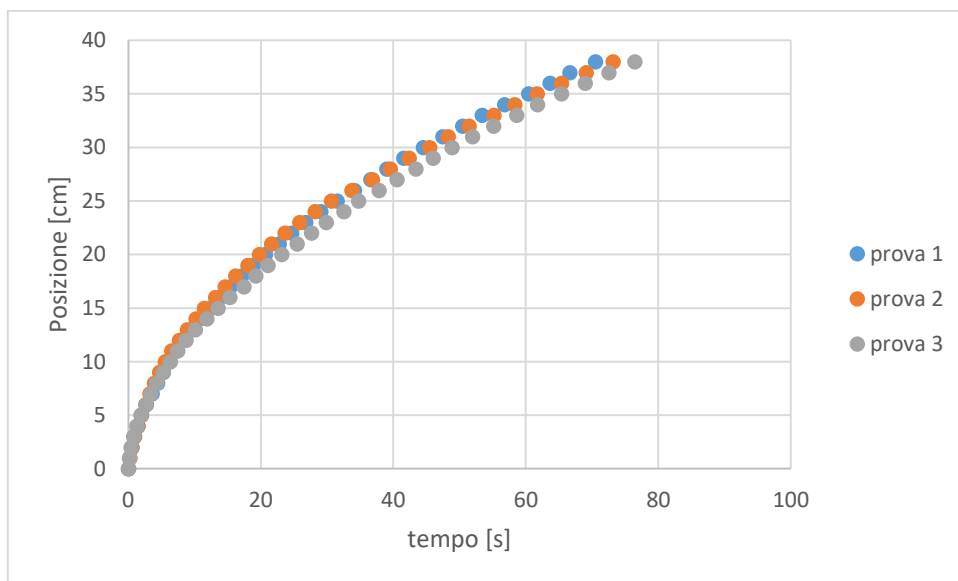


25 - Permeabilità locale, 45° RTM, prova 2

3.2 - Risultati sperimentali

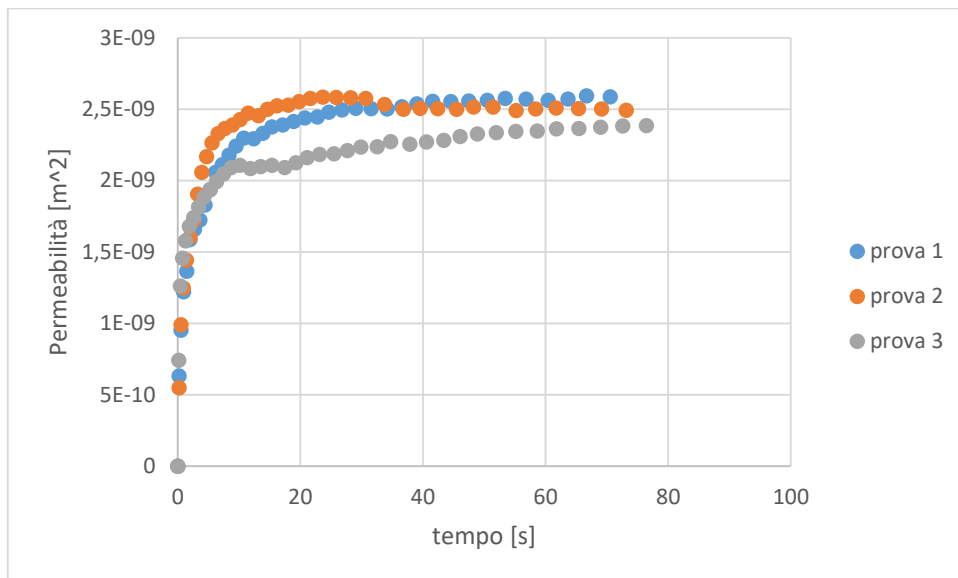


26 - Permeabilità locale, 45° RTM, prova 3



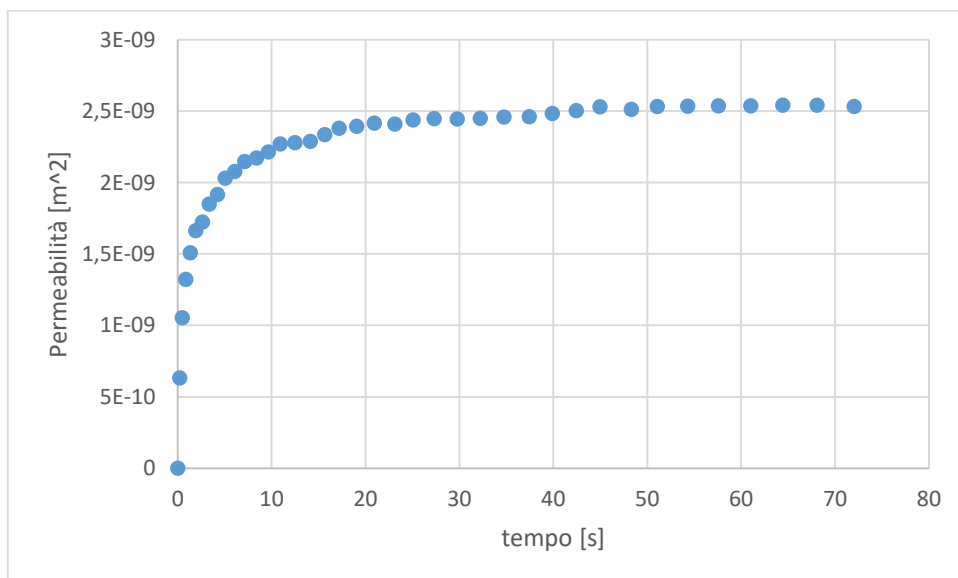
27 - Posizione del fronte, 45° RTM, comparativa prove

3.2 - Risultati sperimentali



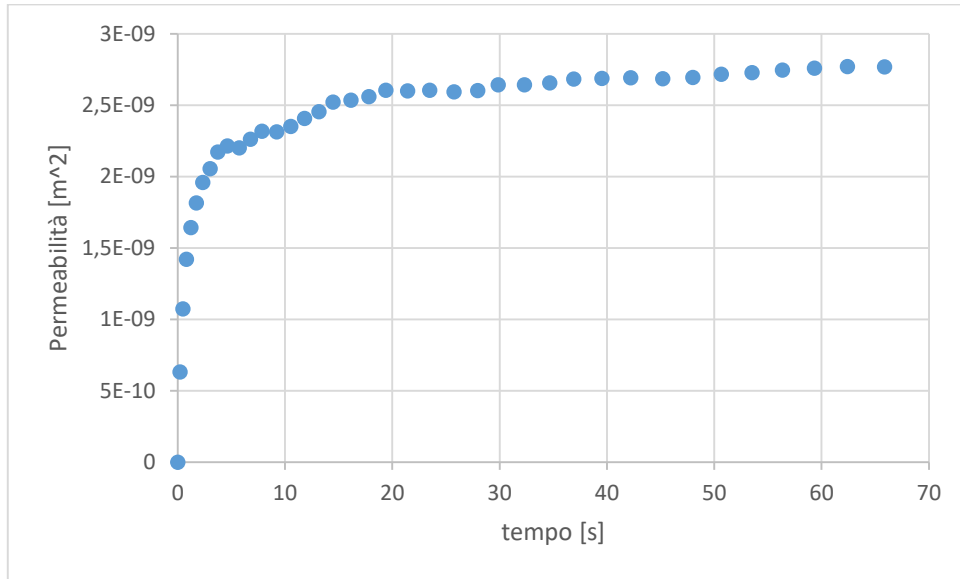
28 - Permeabilità locale, 45° RTM, comparativa prove

Per quanto riguarda le prove a 45°, i risultati ottenuti sono molto vicini tra loro. Ci sono state poche alterazioni, infatti tutte e 3 le prove tendono ad un valore molto simile di permeabilità (circa $2,5E-09$ m^2).



29 - Permeabilità locale, 90° RTM, prova 1

3.2 - Risultati sperimentali



30 - Permeabilità locale, 90° RTM, prova 2

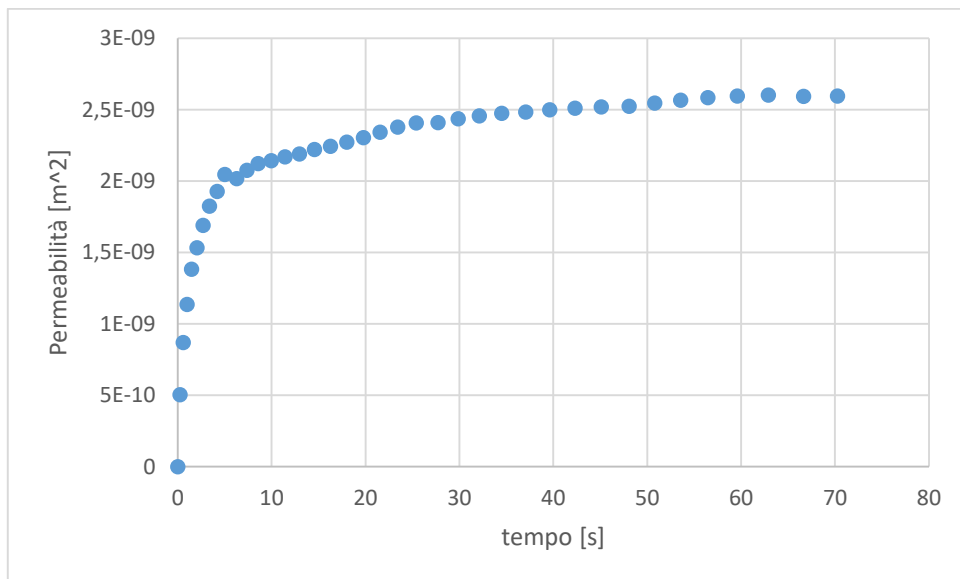
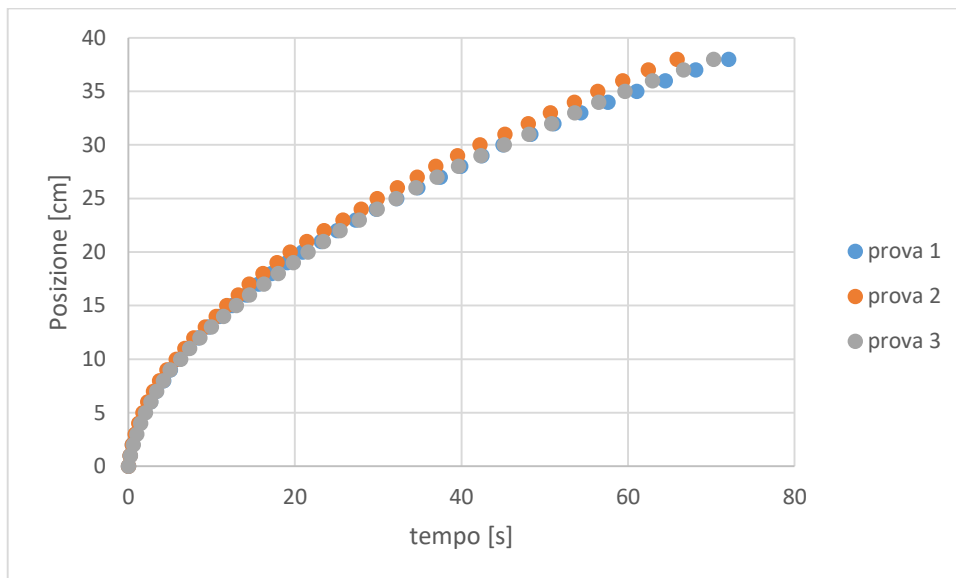
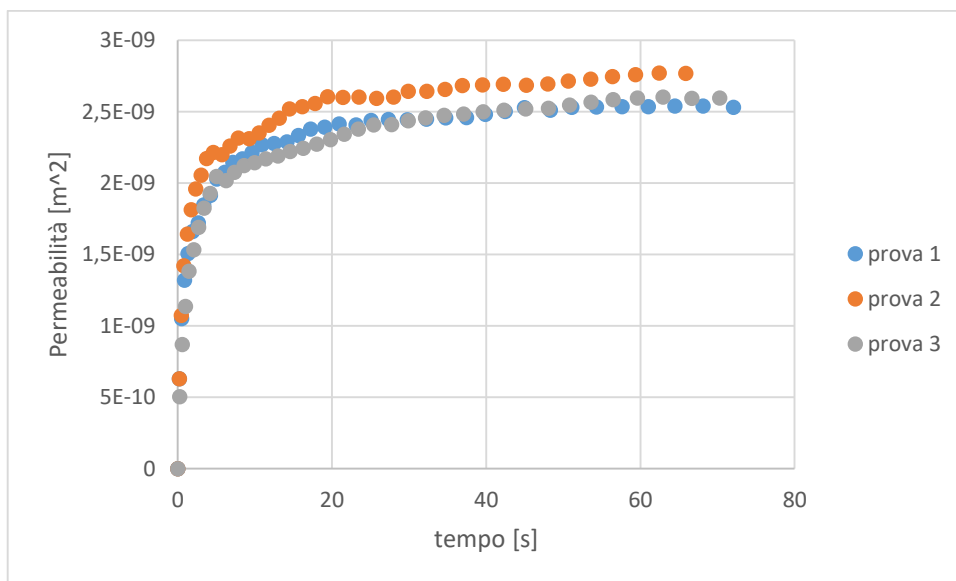


Figura 31 - Permeabilità locale, 90° RTM, prova 3

3.2 - Risultati sperimentali



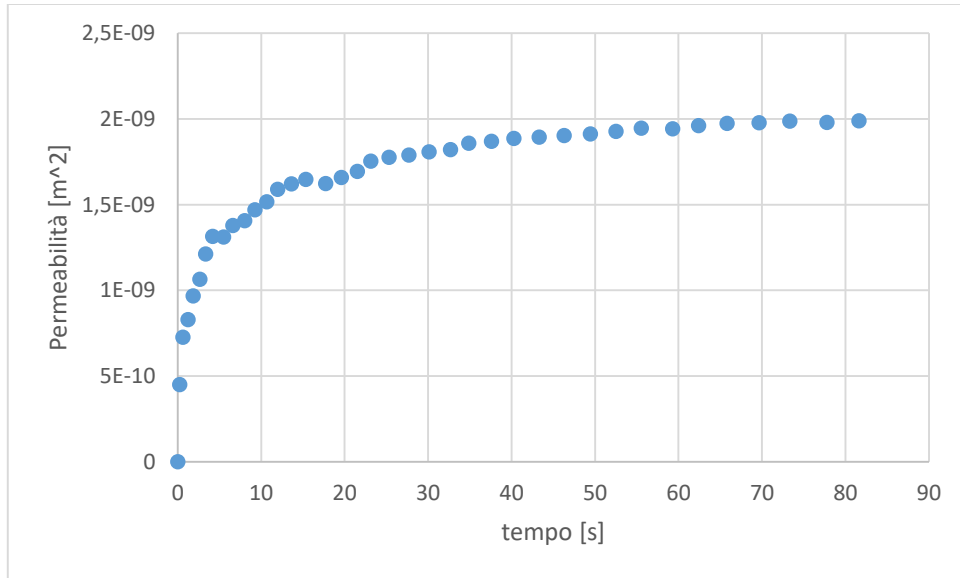
32 - Posizione del fronte, 90° RTM, comparativa prove



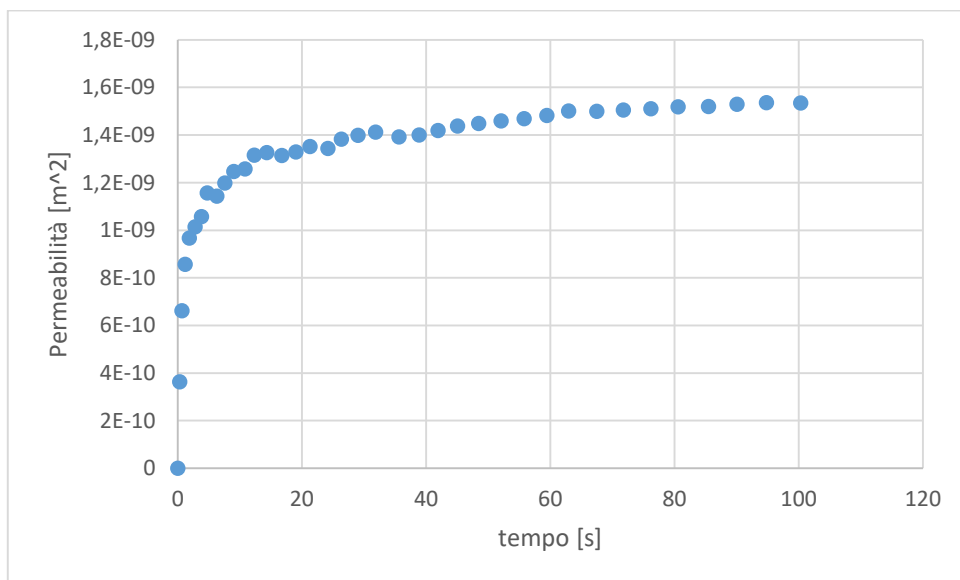
33 - Permeabilità locale, 90° RTM, comparativa prove

Anche nel caso delle fibre orientate a 90°, i risultati sono molto simili tra loro. Soltanto la seconda prova dà un valore leggermente più elevato di permeabilità, probabilmente dovuto a qualche alterazione.

3.2.2 Tessuto RTM + tessuto unidirezionale

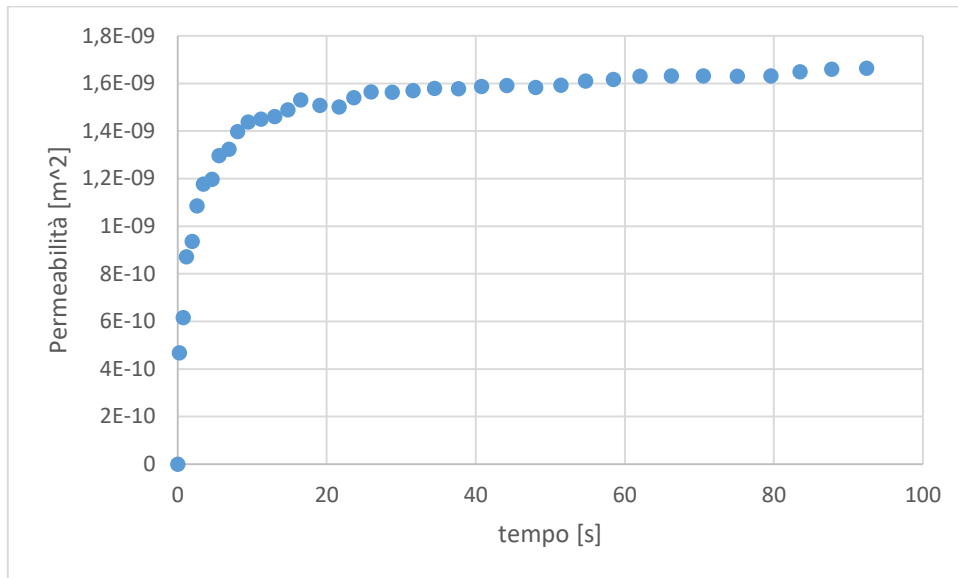


34 - Permeabilità locale, 0° RTM+UD, prova 1

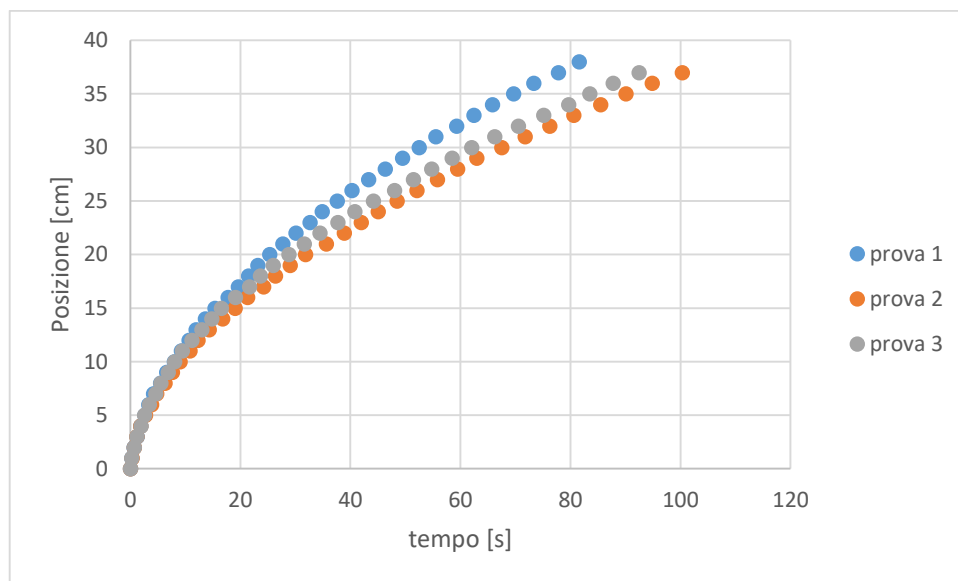


35 - Permeabilità locale, 0° RTM+UD, prova 2

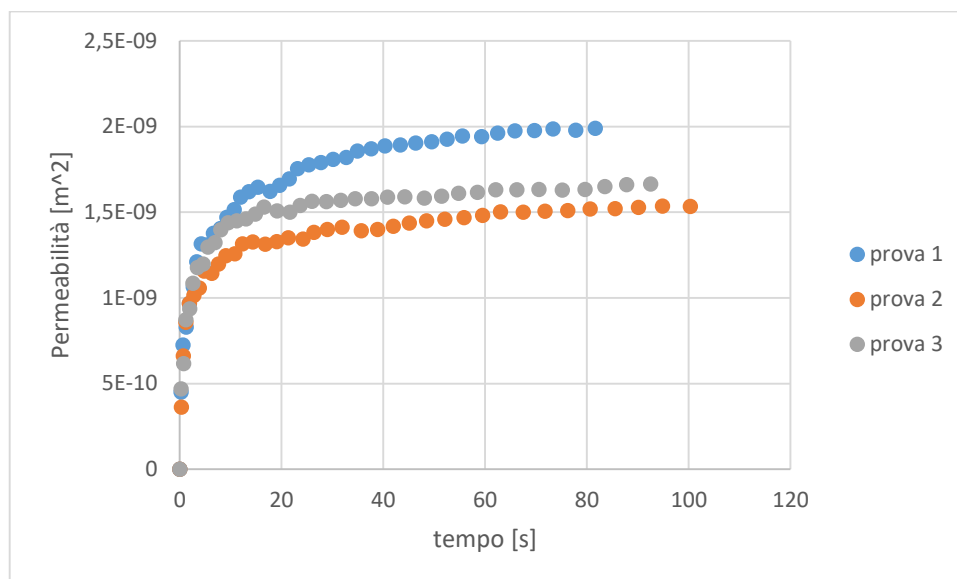
3.2 - Risultati sperimentali



36 - Permeabilità locale, 0° RTM+UD, prova 3



37 - Posizione del fronte, 0° RTM+UD, comparativa prove

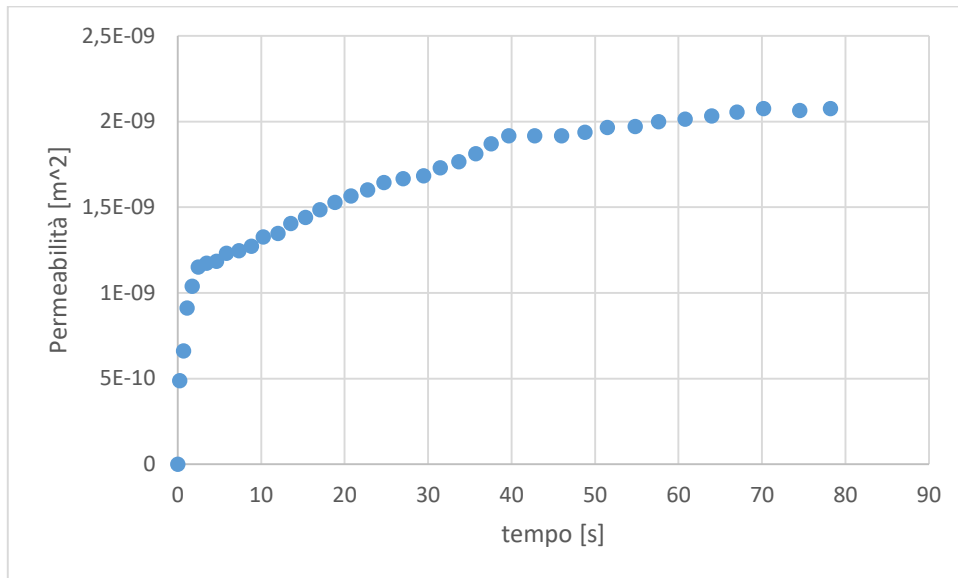


38 - Permeabilità locale, 0° RTM+UD, comparativa prove

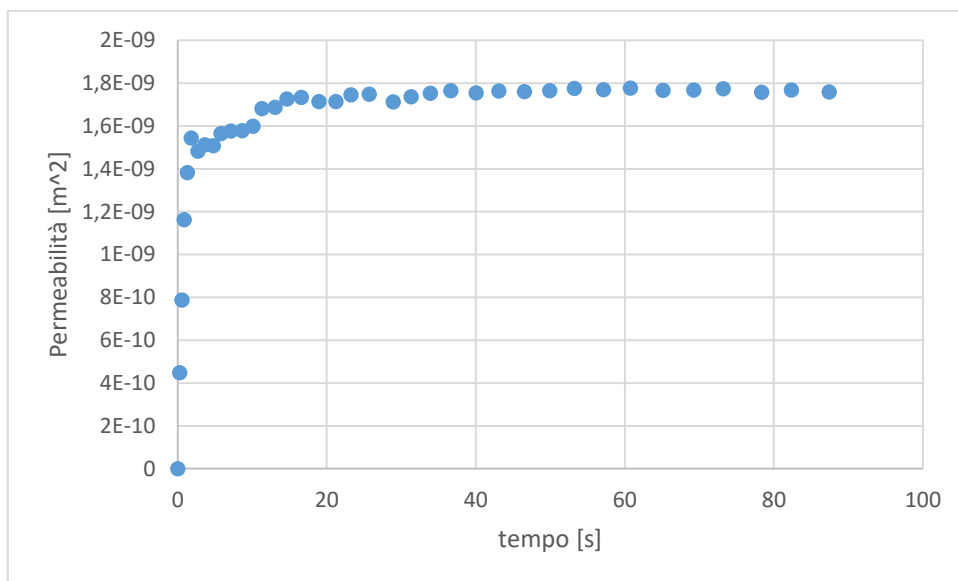
Nel caso delle prove con uno strato di tessuto RTM e uno di tessuto unidirezionale, bisogna prestare particolare attenzione nel momento in cui le pelli vengono tagliate. È molto facile “sfibrare” l’UD, materiale che teoricamente presenterebbe una resistenza all’avanzamento del fronte di fluido molto più elevata rispetto al MAT, e quindi influenzare pesantemente la prova.

È riportato questo fenomeno proprio nella prima prova a 0° con tessuto RTM+UD: il valore trovato è notevolmente incrementato poiché le pelli rovinate favoriscono l’avanzamento del fronte di fluido che riesce a trovare una via preferenziale, facendo risultare quindi una permeabilità maggiore di quella reale.

3.2 - Risultati sperimentali

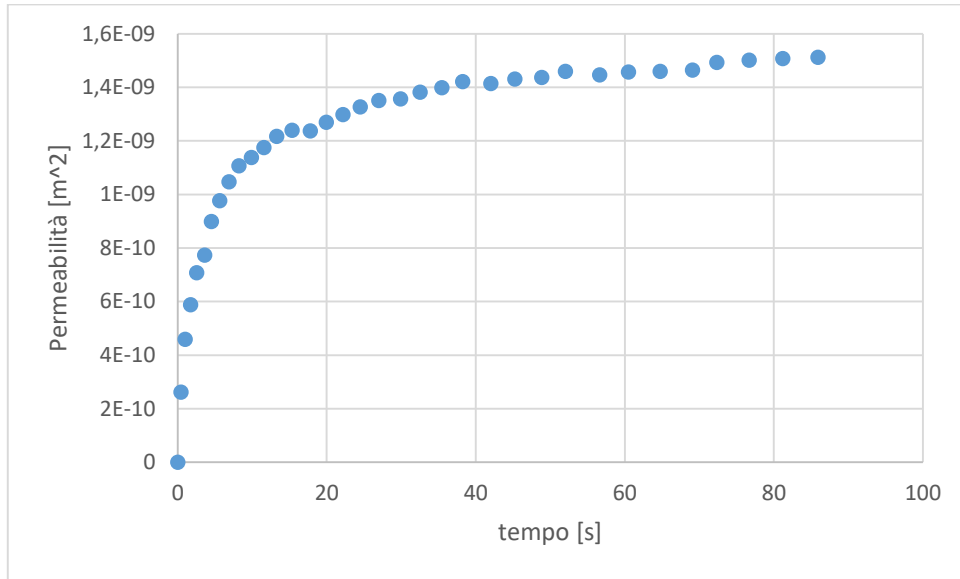


39 - Permeabilità locale, 45° RTM+UD, prova 1

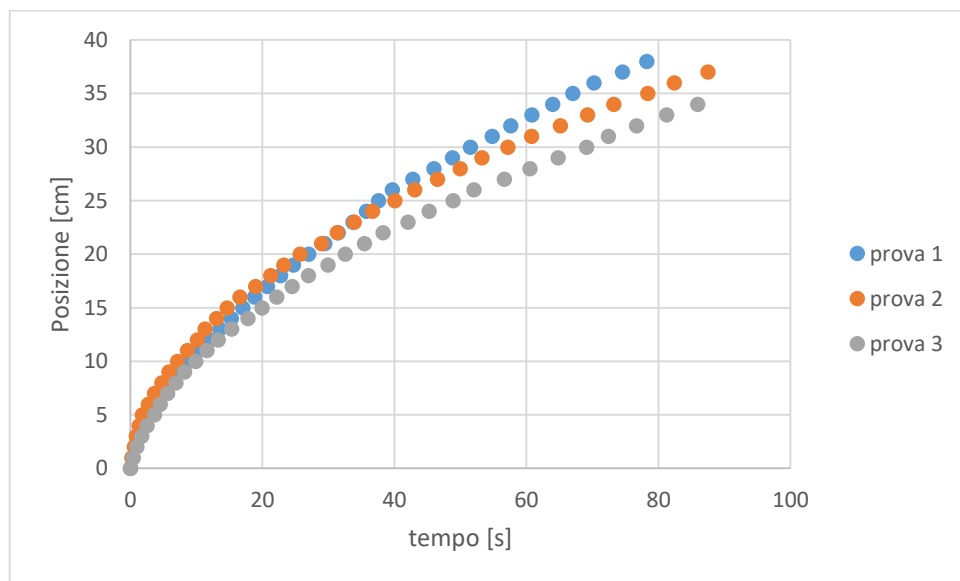


40 - Permeabilità locale, 45° RTM+UD, prova 2

3.2 - Risultati sperimentali

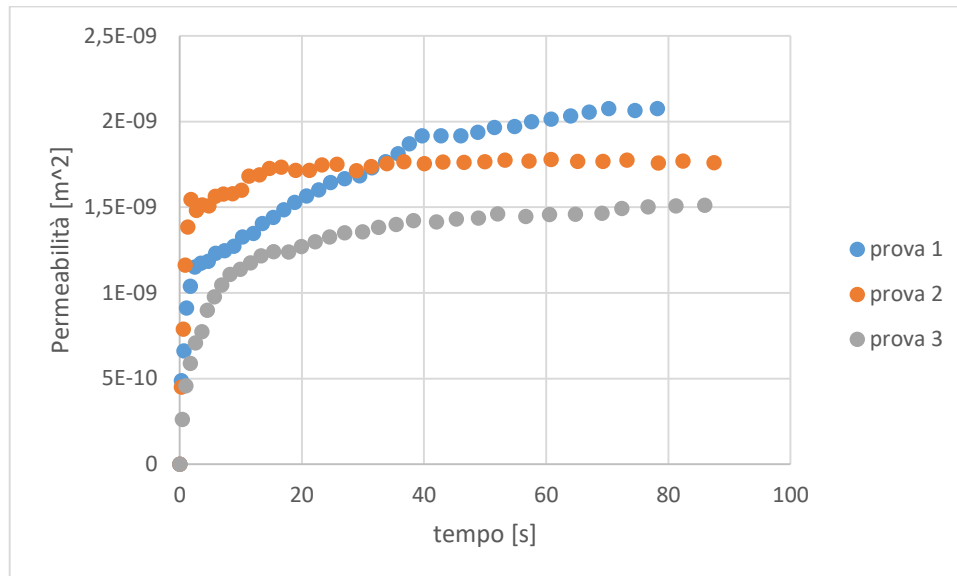


41 - Permeabilità locale, 45° RTM+UD, prova 3



42 - Posizione del fronte, 45° RTM+UD, comparativa prove

3.2 - Risultati sperimentali

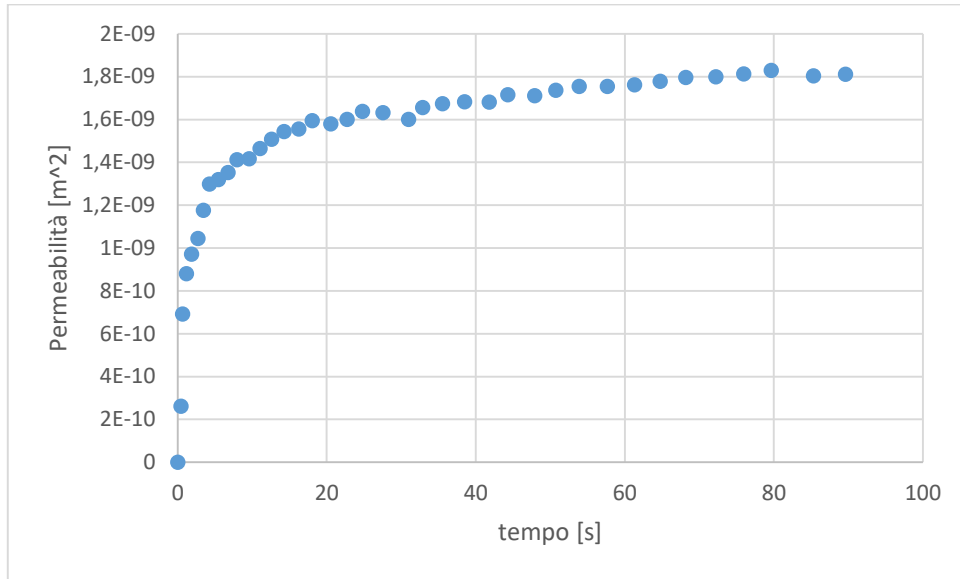


43 - Permeabilità locale, 45° RTM+UD, comparativa prove

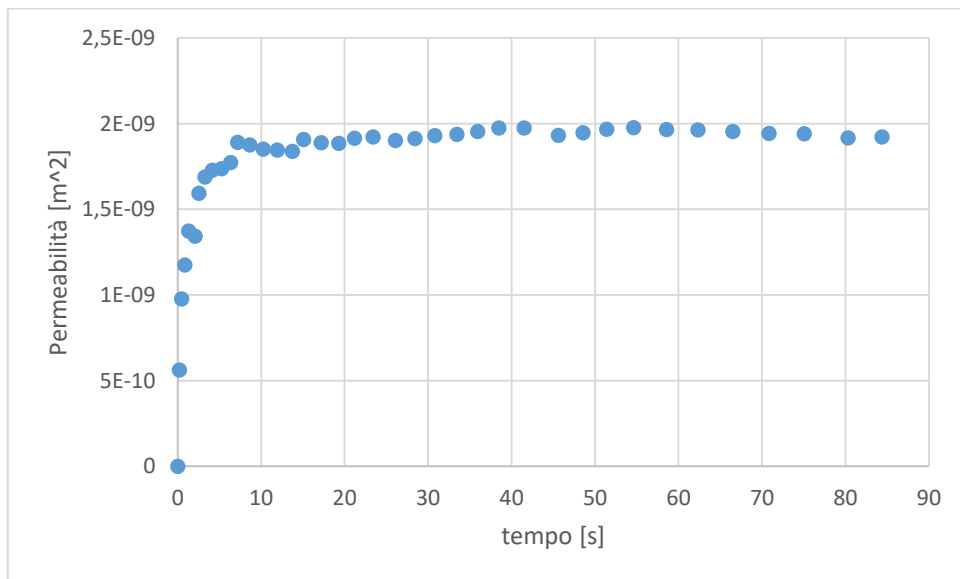
Anche in questo caso, la prima prova è stata fortemente alterata: la permeabilità addirittura aumenta quasi linearmente con il procedere della prova.

La seconda prova a 45°, invece, è stata probabilmente la prova che più si avvicina ai modelli teorici di permeabilità. Il fronte procede molto lineare, le pelli sono state tagliate molto bene e non ci sono rilevanti alterazioni esterne. Il risultato è un grafico che fin dall'inizio (appena superata l'inevitabile perturbazione dovuta all'ingresso del fluido nelle pelli) è estremamente piatto e assestato su un valore ben preciso di permeabilità.

3.2 - Risultati sperimentali

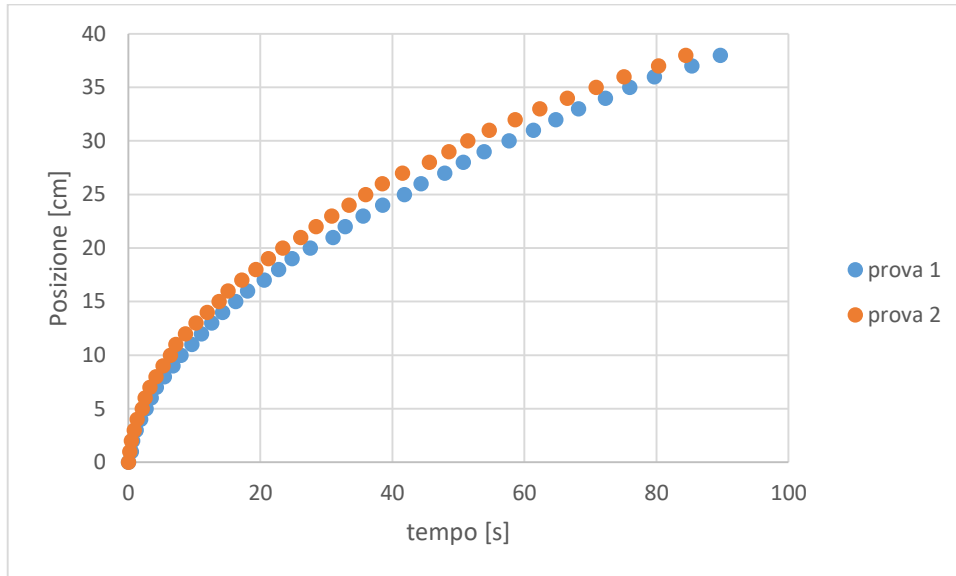


44 - Permeabilità locale, 90° RTM+UD, prova 1

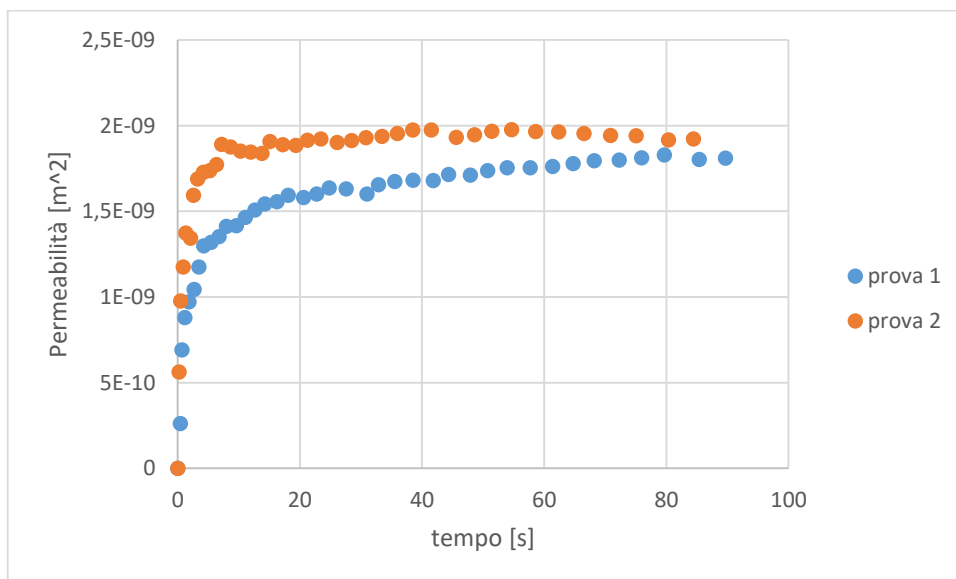


45 - Permeabilità locale, 90° RTM+UD, prova 2

3.2 - Risultati sperimentali



46 - Posizione del fronte, 90° RTM+UD, comparativa prove



47 - Permeabilità locale, 90° RTM+UD, comparativa prove

Le ultime prove a 90° risultano entrambe molto buone, con poche alterazioni e con valori di permeabilità abbastanza simili.

4 Conclusioni

Vengono qui riportate le medie dei risultati ottenuti, tenendo in considerazione la presenza di eventuali prove falsate:

Orientazione delle fibre		K_{exp} [m ²]	Errore standard [m ²]
0°, RTM		2,859E-09	7,17E-11
45°, RTM		2,485E-09	5,91E-11
90°, RTM		2,629E-09	6,51E-11
0°, RTM+UD	NO 1° PROVA	1,591E-09	1,35E-10
45°, RTM+UD	NO 1° PROVA	1,631E-09	1,10E-10
90°, RTM+UD		1,936E-09	6,24E-11

Dai risultati sperimentali, si può confermare come le permeabilità siano effettivamente influenzate dall'orientazione delle fibre, senza presentare però grosse variazioni.

Il fluido ha riscontrato più difficoltà nell'attraversamento del tessuto unidirezionale, con una conseguente diminuzione della permeabilità complessiva. Le prove con tessuto RTM+UD, infatti, impiegano mediamente dai 15 ai 25 secondi in più per essere completate rispetto alle precedenti con doppio tessuto RTM.

Per quanto riguarda le permeabilità nelle direzioni principali e le rispettive ellissi di permeabilità:

4 - Conclusioni

Permeabilità, tessuto RTM

α_1 [°]	α_2 [°]	β [°]
2,744E-09	1,15E-10	-33,8598
K_1 [m ²]	K_2 [m ²]	
3,0796E-09	2,4665E-09	

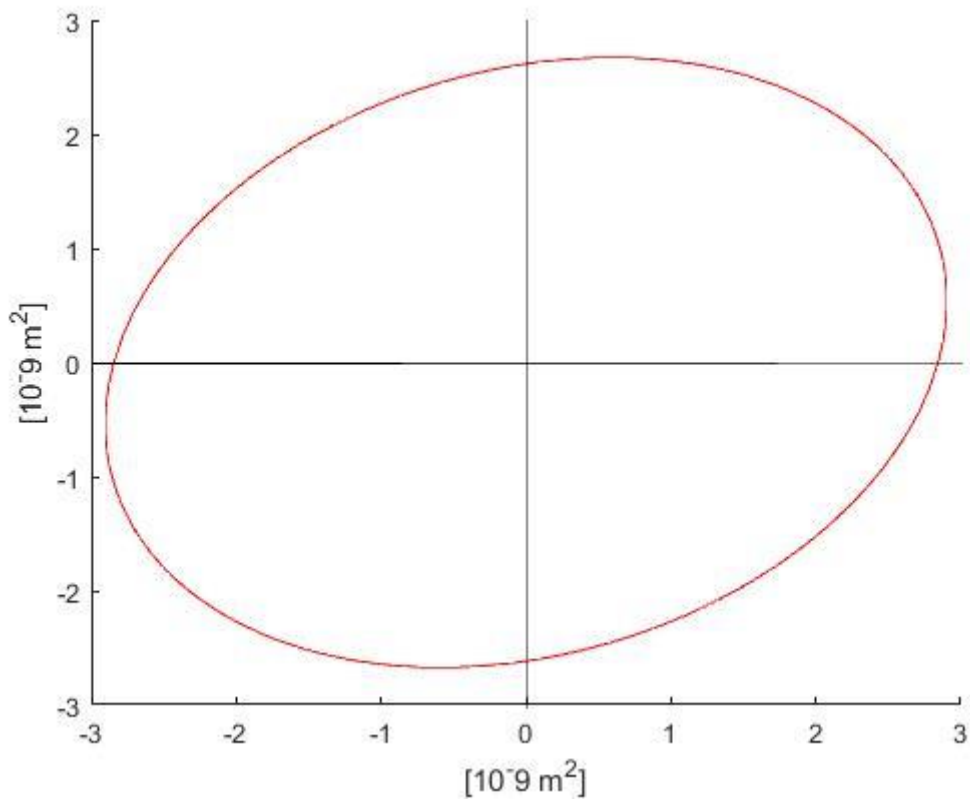


Figura 48 - Ellisse di permeabilità, tessuto RTM

Permeabilità, tessuto RTM+UD

α_1 [°]	α_2 [°]	β [°]
1,7635E-09	-1,725E-10	17,967
K_1 [m ²]	K_2 [m ²]	
1,5584E-09	1,9866E-09	

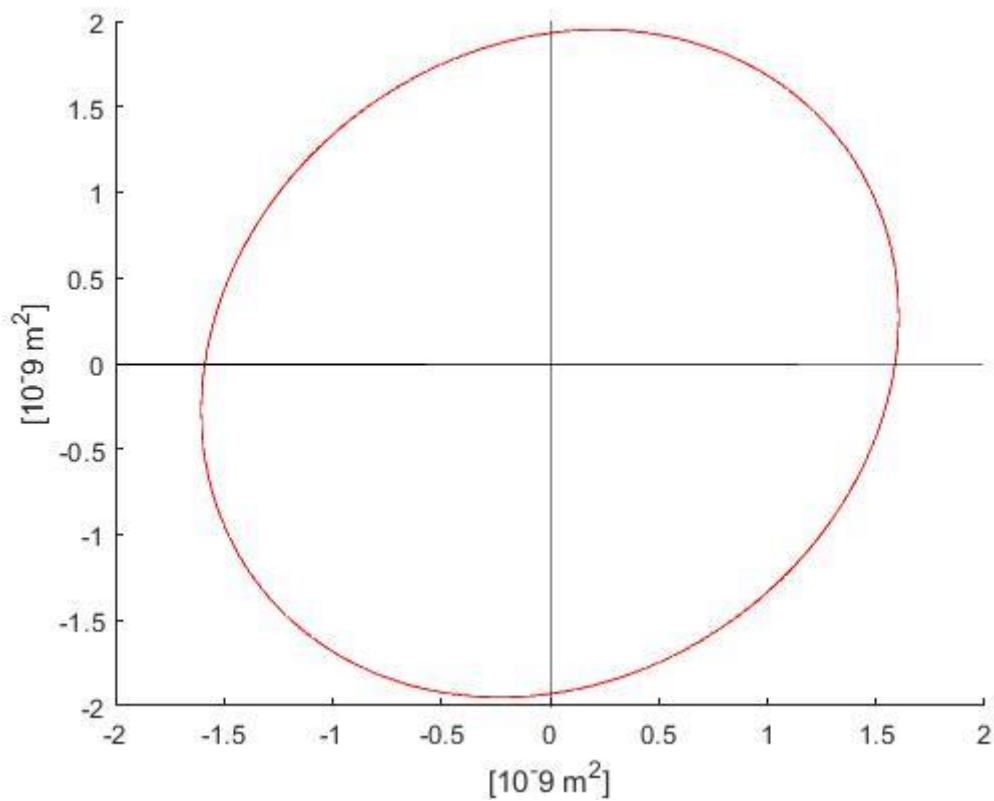


Figura 49 - Ellisse di permeabilità, tessuto RTM + UD

Nel caso delle prove con tessuto unidirezionale, i valori trovati sono sicuramente soggetti ad errori più elevati, principalmente per via dell'imprecisione nel taglio delle pelli.

4 - Conclusioni

Otteniamo qui dei valori di permeabilità principali nettamente inferiori, con permeabilità K_2 superiore a K_1 . Questo avviene perché la permeabilità con le fibre del tessuto unidirezionale orientate a 90° (fluido che attraversa le fibre trasversalmente) è superiore rispetto alla permeabilità a 0° (fluido che attraversa le fibre longitudinalmente).

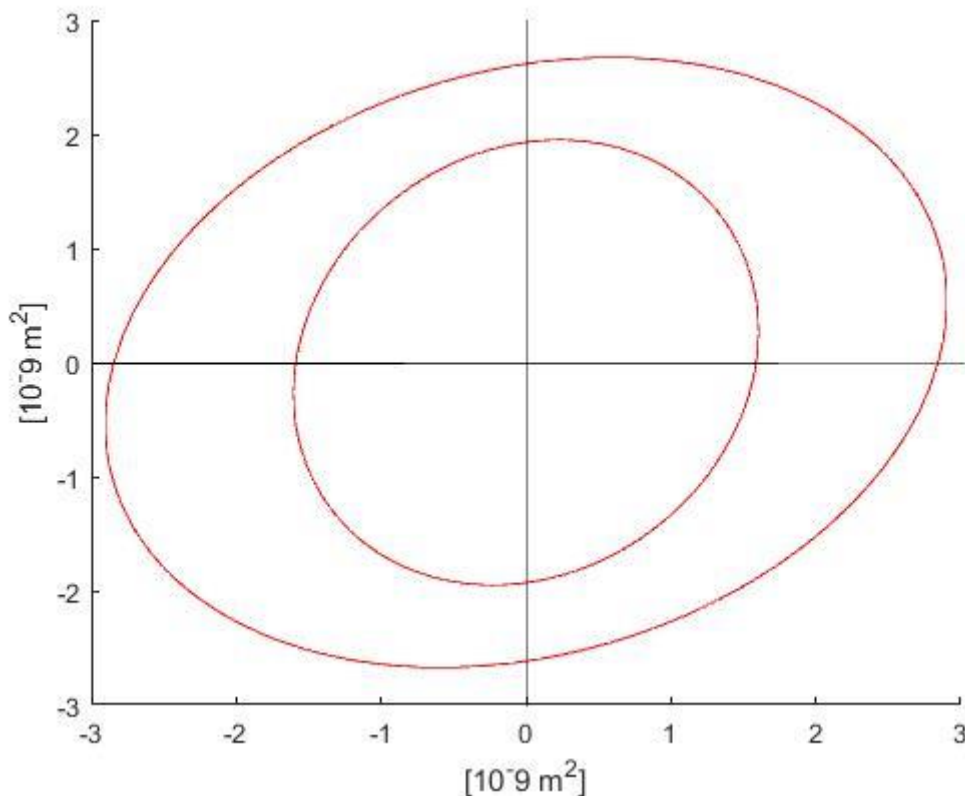


Figura 50 - Confronto tra le due ellissi di permeabilità (tessuto RTM - tessuto RTM + UD)

Mettendo a confronto le due ellissi di permeabilità, risulta evidente come la sostituzione di uno strato di tessuto RTM con uno di tessuto unidirezionale abbassi drasticamente il valore di permeabilità complessivo.

Avendo caratterizzato questi materiali, e conoscendone quindi i valori di permeabilità, è ora possibile eseguire simulazioni del processo di iniezione, ad esempio per la realizzazione di un componente tramite tecnologia RTM.

Valori più elevati di permeabilità (tessuto RTM) daranno tempi di iniezione inferiori e viceversa, permeabilità inferiori (tessuto RTM + UD) risulteranno in tempi di iniezione maggiori.

4 - Conclusioni

5 *Bibliografia*

Ferland, P., Guittard, D., & Trochu, F. (1996). *Concurrent Methods for Permeability Measurement in Resin Transfer Molding*. *Polymer Composites*, 149-158.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.

Naik, N. K., Sirisha, M., & Inani, A. (2013). *Permeability characterization of polymer matrix composites*.

Vernet, N., Ruiz, E., & Advani, S. (2014). *Experimental determination of the permeability of engineer textiles: Benchmark II*.

Composite Material Blog: <http://www.compositesblog.com>

Wikipedia: <https://it.wikipedia.org/wiki>

BCA Chemistry: <https://bcachemistry.wordpress.com>