



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

---

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica**

**Studio teorico e sperimentale di una linea di  
impregnazione di tessuti per la realizzazione di  
preimpregnati**

**Theoretical and experimental study of a fabric  
impregnation line for preparation of prepregs**

Relatore: Chiar.mo  
**Archimede Forcellese**

Tesi di Laurea di:  
**Christian Di Sabatino**

Correlatore: Chiar.mo  
**Antonio Colarossi**

A.A. 2019/2020



# Indice

Premessa.....	4
Introduzione teorica.....	6
1. Materiali compositi e classificazione.....	6
2. PMC.....	8
2.1 Metodi di fabbricazione dei PMC.....	11
3. Preimpregnati.....	12
3.1 Fabbricazione e metodi di conservazione.....	12
4. La linea di impregnazione.....	14
4.1 Filmatrice.....	14
4.2 Macchina di impregnazione.....	17
4.3 Linea di impregnazione.....	22
Prove sperimentali.....	23
1. Filmatrice.....	23
2. Macchina di impregnazione.....	26
3. Linea di impregnazione.....	29
Analisi dei risultati.....	34
1. Filmatrice.....	34
1.1 Modello spinta sui rulli.....	34
1.2 Modello teorico di deposizione della resina.....	69
1.3 Modello reale deposizione resina.....	76
1.4 Modello Progressivo.....	79
2. Macchina di impregnazione.....	82
2.1 S-Wrap.....	83
2.2 Pressa.....	83
Conclusioni.....	86
References.....	89
1. Articoli e studi.....	89
2. Sitografia.....	89
3. Bibliografia.....	89

## **Premessa**

Negli ultimi anni i materiali compositi hanno acquisito una notevole importanza nell'ambito della progettazione meccanica: sono infatti cresciute in numero ed importanza le soluzioni progettuali sviluppate con i compositi che ad oggi dominano il campo dei materiali non convenzionali.

Il loro utilizzo permette di ottenere notevoli vantaggi rispetto ai materiali classici, essi infatti presentano ottime caratteristiche meccaniche nonostante siano molto leggeri e possiedono proprietà specifiche per l'applicazione per la quale vengono realizzati.

Attualmente vengono utilizzati in molti settori anche piuttosto diversificati tra loro come quello dei trasporti, del mondo racing, dell'aerospazio fino alla realizzazione di attrezzature sportive.

Parallelamente a questa crescita si sono sviluppati i diversi processi per la realizzazione delle parti in composito, i principali basano il proprio funzionamento sulla sovrapposizione di fibre, impregnate prima o dopo la laminazione, fino al raggiungimento dello spessore desiderato.

Dal processo di impregnazione delle fibre, che può essere manuale o automatizzato, dipende buona parte delle proprietà finali del composito.

Per ottenere le migliori caratteristiche possibili quindi si fa spesso ricorso a fibre precedentemente impregnate con una quantità nota di matrice. Questi semilavorati prendono il nome di preimpregnati e vengono prodotti tramite appositi processi e successivamente utilizzati in fase di realizzazione della parte. L'impiego dei preimpregnati fa aumentare il costo di produzione, dato che è necessario un ulteriore step produttivo, ma diminuisce il costo complessivo dell'intero ciclo di vita della parte.

In questo settore si inserisce il progetto, oggetto di studio, di Comec innovative. Comec è una SME italiana che conta circa 50 impiegati fondata nel 1965. L'azienda è passata dalle prime produzioni di tools per la meccanica di precisione fino, agli inizi degli anni 90', alla progettazione e alla messa in servizio di intere linee di produzione automatizzate equipaggiate con sistemi di controllo che garantiscono uno standard elevato di produttività e qualità, obiettivi principi che l'azienda si è prefissata di raggiungere.

Negli anni 2000 la Comec ha deciso di trasferire l'esperienza acquisita sui processi relativi ai materiali compositi. Ad oggi, i 50 anni di esperienza nella produzione e i quasi 20 nel campo

dei compositi permettono all'azienda di progettare e mettere in servizio linee per la realizzazione di processi con elevati standard OEE (Overall Equipment Efficiency).

Nel seguente elaborato viene affrontato lo studio di una linea di produzione di preimpregnati, realizzata da Comec per un cliente, che sfrutta un processo di fusione a cado. Questo tipo di processo è suddiviso in due step: nella prima fase la resina viene depositata su un foglio di carta siliconata, nella seconda la carta resinata è accoppiata con il tessuto secco per realizzare l'impregnazione.

Abbiamo quindi analizzato come i vari parametri di processo influenzino le caratteristiche del prodotto finito con l'obiettivo di ricavare un modello teorico ed uno sperimentale che descrivessero nella maniera più accurata possibile il funzionamento della macchina. I modelli così ottenuti assumerebbero una notevole importanza nella fase operativa velocizzando la scelta dei parametri di processo e aumentando quindi la produttività generale della linea.

# Introduzione teorica

## 1. Materiali compositi e classificazione

I materiali compositi sono materiali eterogenei, ovvero costituiti da due o più fasi chimicamente distinte con proprietà fisiche-meccaniche diverse, le cui proprietà sono molto migliori di quelle delle fasi che li costituiscono.

Le fasi che si distinguono sono identificate generalmente in due tipi: *matrice* e *rinforzo*.

La *matrice* è la fase che tiene insieme il rinforzo, lo protegge dagli effetti ambientali e vi trasferisce i carichi esterni. Essa può avere diversa natura, si trovano infatti compositi con matrice ceramica, metallica o polimerica, e dalle caratteristiche di ognuna di esse e dall'efficacia dell'interfaccia matrice/rinforzo, dipendono le proprietà meccaniche in direzione normale all'estensione del rinforzo. La matrice inoltre svolge il compito di assorbire l'energia, che si genera ad esempio a causa di impatti, aumentando la tenacità del composito.

Il *rinforzo* a sua volta si trova disperso nella matrice ed è la fase con le migliori caratteristiche meccaniche. Essa determina quelle che sono le proprietà fisico-meccaniche del composito.

Indipendentemente della forma, il rinforzo deve avere almeno una dimensione nell'ordine di grandezza del  $\mu\text{m}$ . La scelta del tipo di rinforzo, dell'orientamento, della quantità e la verifica della compatibilità con la matrice sono di fondamentale importanza per l'ottenimento delle prestazioni desiderate.

Per definizione il *modulo di Young* del rinforzo deve essere almeno quattro volte superiore a quello della matrice:

$$E_f / E_m = 4$$

I principali vantaggi di questa classe di materiali derivano dal fatto che il loro utilizzo consente di realizzare parti con elevati valori di *rigidezza* e *resistenza meccanica specifiche* e con proprietà dedicate alla specifica applicazione per la quale vengono realizzate.

I materiali compositi sono tipicamente classificati su più livelli:

- Primo livello in base alla matrice utilizzata: le principali sono ceramica, metallica e polimerica
- Secondo livello basato sulla forma del rinforzo: essenzialmente di due tipologie, discontinua come particelle, fibre corte e whiskers oppure continua come ad esempio le fibre lunghe.

Un'ulteriore classificazione dei materiali compositi è basata sulla disposizione del rinforzo all'interno della matrice. In riferimento a tale classificazione troviamo:

- Fibre disposte lungo direzioni preferenziali;
- Fibre organizzate in tessuti con uno o più strati;
- Fibre disperse casualmente nella matrice;
- Organizzate in strutture tridimensionali.

Nella realizzazione dei materiali compositi ha una notevole importanza il processo d'impregnazione del rinforzo con la matrice. Da questo processo dipendono quelle che saranno le proprietà finali della parte realizzata. Un'impregnazione corretta consente di apportare al rinforzo la giusta quantità di matrice e fa sì che essa sia omogeneamente distribuita lungo tutta la sua superficie. Una eccessiva presenza di matrice rende il composito meno resistente, mentre una sua mancanza lo renderebbe più fragile poiché non ci sarebbe l'azione tenacizzante della matrice.

Per ottenere una buona impregnazione è necessario che la matrice abbia una bassa viscosità per penetrare più facilmente nel rinforzo. Il funzionamento del processo di impregnazione è governato e spiegato dalla *Legge di Darcy*:

$$v = -(1/\mu) * [K] * \nabla p$$

Questa legge descrive l'andamento del flusso di un fluido all'interno di un mezzo poroso quale il rinforzo. Osservando la formula si vede come la velocità di diffusione del fluido dipenda in maniera direttamente proporzionale alla permeabilità del mezzo poroso e al gradiente di pressione applicato, mentre in maniera inversamente proporzionale alla sua

viscosità. Per ottenere una migliore impregnazione bisogna quindi, oltre che diminuire la viscosità della matrice, applicare una forte azione di compressione.

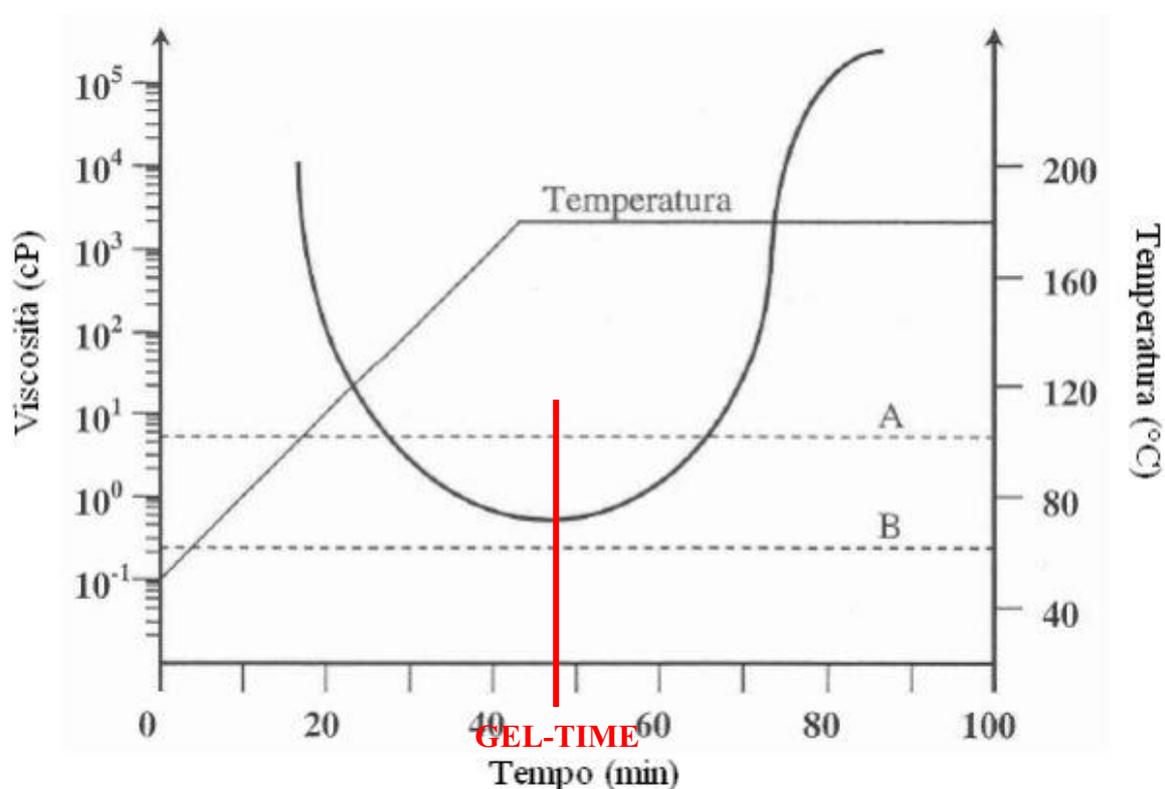
## 2. PMC

I compositi maggiormente utilizzati e che sono stati analizzati in questo elaborato hanno una matrice *polimerica* (Polymeric Matrix Composite, PMC). Nello specifico la matrice è una resina.

Le *resine* sono dei composti organici senza un punto di fusione preciso e con un elevato peso molecolare. Esse si classificano in *termoindurenti* e *termoplastiche*.

Una *resina termoindurente* è tipicamente liquida a temperatura ambiente. L'indurimento è dovuto ad un processo di polimerizzazione, chiamato *cura*, che modifica chimicamente la resina in maniera irreversibile: i monomeri si legano a formare una catena polimerica, ovvero un'unica molecola. Per facilitare la cura, alla resina viene aggiunto un catalizzatore chiamato *indurente*.

La viscosità delle resine termoindurenti varia con l'aumentare della temperatura e del tempo secondo il seguente andamento



Dal grafico riportato si nota una iniziale diminuzione della viscosità, fondamentale per l'impregnazione, con l'aumentare della temperatura fino al raggiungimento del gel-time. Il gel-time rappresenta il momento in cui si forma un'unica molecola e il processo di impregnazione deve essere completato prima di raggiungere questa condizione. Dopo il gel-time infatti si verifica un immediato innalzamento della viscosità che renderebbe l'impregnazione impossibile.

A causa della presenza del catalizzatore la viscosità della resina tende ad aumentare dopo un certo tempo anche se si mantenesse la temperatura costante, si rende necessario quindi identificare con molta attenzione l'intervallo entro il quale è possibile effettuare l'impregnazione. A temperature più basse si raggiungeranno viscosità più elevate ma gel-time più lunghi.

I compositi con questo tipo di matrice hanno ottime proprietà meccaniche che vengono mantenute anche ad elevate temperature fino al raggiungimento di  $T_{max}$ , temperatura alla quale si verifica la degradazione della resina.

Una *resina termoplastica* è tipicamente solida a temperatura ambiente. Il riscaldamento dopo l'indurimento per polimerizzazione porta a una diminuzione di viscosità passando dallo stato vetroso a quello fluido in maniera reversibile senza subire alcuna variazione a livello chimico. Queste resine hanno prestazioni minori ma possono subire diversi cicli di fusione/solidificazione senza che si verifichi una diminuzione delle loro prestazioni. Assumono notevole rilevanza nell'ottica del DFE (Design For Environment) considerando la loro riciclabilità, ma hanno proprietà generalmente inferiori a quelle delle resine termoindurenti e il loro utilizzo è ostacolato dalla bassa temperatura di esercizio.

I rinforzi utilizzati nei PMC si trovano tipicamente sottoforma di *fibre: di vetro, di carbonio, aramidiche e naturali*.

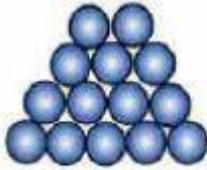
Le *fibre* sono elementi, di un determinato materiale, caratterizzati da una quasi totale assenza di difetti dovuta alle dimensioni estremamente ridotte. Questa perfezione strutturale porta le fibre ad avere proprietà meccaniche molto vicine a quelle teoriche del materiale di cui sono costituite.

Le fibre sono presenti sul mercato in varie forme:

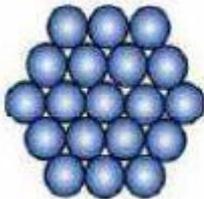
- Singolo filamento: elemento base dal diametro di circa  $10\mu\text{m}$



- Fascio di filamenti (*Tow*): elemento costituito da un fascio di singoli filamenti paralleli tra loro e assemblati senza torsione;



- Filato (*Yarn*): fascio costituito da un numero elevato (migliaia) di filamenti assemblati mediante torsione;



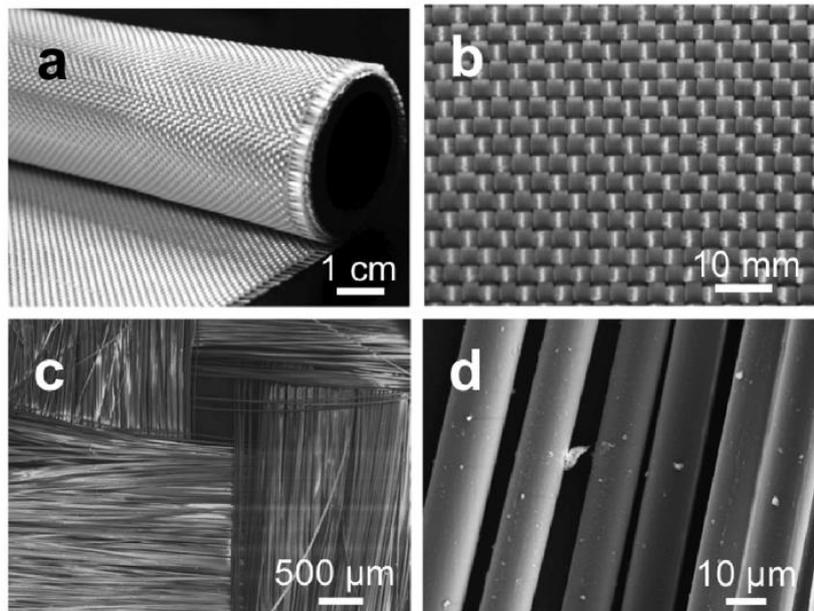
- Filo assemblato (*Roving*): fascio ottenuto assemblando senza torsione un certo numero di filati, disposti parallelamente tra loro;



Le fibre possono inoltre essere organizzate in *tessuti*. Essi vengono ottenuti intrecciando in maniera opportuna una certa quantità di fibre. L'utilizzo di un tessuto piuttosto che delle semplici fibre facilita la fase laminazione nella formazione di una parte e fornisce a questa una certa isotropia planare delle caratteristiche fisico-meccaniche a discapito delle proprietà massime ottenibili da quel materiale se le fibre fossero disposte lungo un'unica direzione.

I parametri che definiscono le caratteristiche di un tessuto sono:

- Spessore: variabile tra 0.02 a più di 1 mm
- Grammatura: definita dal rapporto tra peso e superficie del tessuto, compresa tra 80 e 600 g/cm<sup>2</sup>
- Composizione: quantificata dal numero di fili di trama e ordito
- Titolo: definito dal peso per unità di lunghezza del filato ( $\text{Tex} = \text{g}/103\text{m}$ )
- Armatura: intesa come il tipo di intreccio nel filato
- Carico a rottura: espresso come forza per unità di lunghezza



**Figura 2.0.1** Struttura di un tessuto

## **2.1 Metodi di fabbricazione dei PMC**

Per questa tipologia di compositi esistono diversi metodi di fabbricazione, quelli più comunemente utilizzati sono di tipo additivo. Questa metodologia consiste nella sovrapposizione di strati di fibre impregnate (prima o dopo la sovrapposizione) fino al raggiungimento dello spessore desiderato. Una volta ottenuta la forma della parte da realizzare essa viene sottoposta ad elevate temperature consentendo la polimerizzazione della resina e il suo conseguente indurimento.

Per facilitare questi processi, e ottenere prodotti con caratteristiche migliori, si fa spesso ricorso all'utilizzo dei *Preimpregnati* o *prepreg*.

### 3. Preimpregnati

I preimpregnati sono dei semilavorati ottenuti impregnando le fibre con una quantità di resina nota miscelata con un'opportuna quantità di indurente. I vantaggi principali ottenuti dall'utilizzo dei prepreg derivano dalla costanza del rapporto fibra/matrice e dalla diminuzione del costo complessivo relativo all'intero ciclo vita del prodotto a discapito di un incremento di costo nella fase produttiva.

Conoscere con certezza la quantità di resina in rapporto con la fibra garantisce un miglior controllo sulle proprietà delle parti realizzate. È proprio grazie all'utilizzo dei preimpregnati, con le qualità appena descritte, che si ottengono i prodotti con le migliori caratteristiche meccaniche.

Concorrono alla formazione di parti con ottime proprietà meccaniche altri aspetti vantaggiosi, derivanti dall'utilizzo dei preimpregnati, quali: migliore controllo del peso finale, impregnazione uniforme in tutta la parte, semplicità e rapidità di lavorazione, pulizia della lavorazione poiché non si usano resine liquide e miglioramento delle condizioni di sicurezza del lavoro.

I prepreg hanno infine la possibilità essere utilizzati per la realizzazione di strutture a sandwich grazie alle eccellenti proprietà di adesione delle resine e alla loro bassa viscosità che garantiscono incollaggi ottimali con anime a struttura alveolare (honeycomb).

#### 3.1 Fabbricazione e metodi di conservazione

I prepreg che si trovano in commercio vengono venduti in rotoli con frazione matrice/rinforzo variabili e con fibre in formato sia unidirezionale (towpreg) che di tessuto.

I preimpregnati vengono realizzati mediante due tipologie di processi produttivi:

- *Processo di fusione a caldo*: processo costituito da due fasi. Il primo stadio prevede la formazione di un sottile film di resina riscaldata su un supporto di carta. Il materiale di rinforzo e la resina vengono poi messi in contatto nella macchina di impregnazione. Grazie all'applicazione di pressione e calore, la resina viene impregnata nella fibra con conseguente formazione del prepreg, che viene infine avvolto su un nucleo.
- *Processo di immersione con solvente*: solo i preimpregnati di tessuto possono essere prodotti utilizzando questo processo, che prevede la dissoluzione della resina in un bagno di solvente e l'immersione del tessuto di rinforzo nella soluzione di resina. Utilizzando un forno di essiccazione, il solvente viene quindi evaporato dal prepreg.

In entrambi i processi la matrice presente viene parzialmente reticolata in modo tale da tenere insieme il rinforzo e facilitarne la manipolazione.

Le bobine di prepreg devono essere conservate in celle frigorifere a T di circa  $-15^{\circ}\text{C}/-20^{\circ}\text{C}$ , e una volta estratti devono essere utilizzate entro un tempo massimo tipicamente intorno alle 72h dato che il calore accelera la polimerizzazione. La parte di rotolo non utilizzata deve essere riposta in frigo tenendo conto del tempo di permanenza alla  $T_{\text{amb}}$ .

Per i preimpregnati prodotti che vengono immessi sul mercato esiste un range di accettabilità della grammatura del  $\pm 3\%$ .

## 4. La linea di impregnazione

In questo elaborato è stato effettuato uno studio teorico e sperimentale di una linea di impregnazione di tessuti per la realizzazione di preimpregnati mediante un processo di *fusione a caldo*.

Come precedentemente descritto, in questo processo la resina viene dapprima depositata su un supporto di carta siliconata da una macchina chiamata *resinatrice* o *filmatrice*. Lo scopo di questa fase è quello di depositare sulla carta una quantità di resina tale da garantire la grammatura finale del preimpregnato.

In un secondo momento la carta resinata viene messa in contatto con il tessuto nella *macchina di impregnazione*. Grazie all'applicazione di pressione e calore, la resina penetra nella fibra con conseguente formazione del prepreg finale, che viene accoppiato ad un foglio di polietilene e infine avvolto su un nucleo.

Di seguito vengono illustrati nello specifico i funzionamenti delle due macchine.

### 4.1 Filmatrice

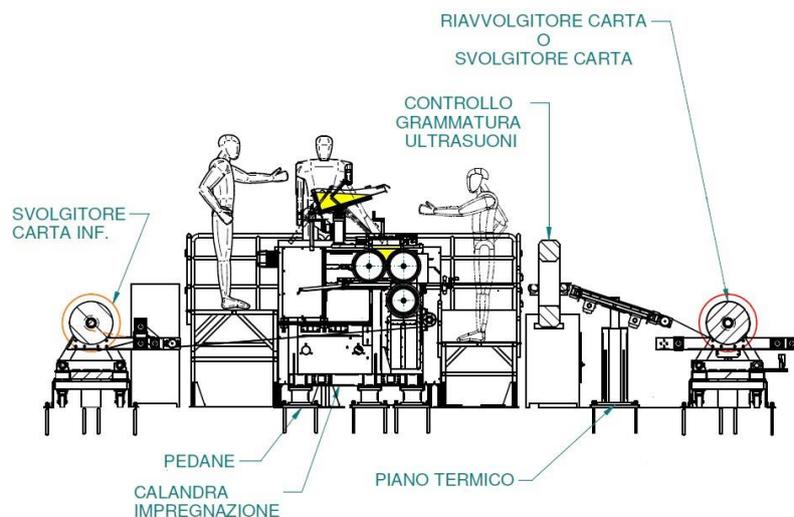


Figura 4.1.1 Schema della filmatrice

La *resinatrice* è la prima macchina presa in esame che, come vedremo in seguito, può essere considerata un modulo della *linea di impregnazione*. Essa è costituita da diverse componenti:

- Svolgitore carta siliconata;
- Calandra di impregnazione;
- Rullo in gomma;
- Strumento di misura della grammatura ad ultrasuoni;
- Piano termico;
- Riavvolgitore carta resinata.

### *Svolgitore carta siliconata*

Il processo inizia posizionando la carta siliconata vergine sul primo svolgitore presente nella resinatrice. Il rotolo viene svolto manualmente e guidato attraverso il percorso evidenziato in figura fino a raggiungere il secondo svolgitore/riavvolgitore.

Lo svolgitore della carta siliconata è una macchina dotata di una struttura in metallo a sostegno di un mandrino frenato che permette lo svolgimento della bobina di carta. Il mandrino è realizzato in metallo e per fissare le bobine presenta dei supporti in gomma espandibili azionati da un sistema ad aria compressa. Per fissare la bobina bisogna sparare l'aria compressa all'interno del mandrino tramite l'apposita valvola.

Su questo svolgitore è posizionato in oltre un sistema di rulli mobili collegati ad una cella di carico la quale permette di controllare la tensione della carta durante il funzionamento della macchina.

Lo svolgitore è dotato di un sistema di auto allineamento della carta.

### *Calandra di impregnazione*

La calandra di impregnazione costituisce il cuore di questa macchina, da essa dipende infatti la deposizione della resina sulla carta.

La calandra è composta da una coppia di rulli di metallo riscaldati internamente grazie alla circolazione di olio diatermico ad alta temperatura. L'olio è riscaldato da un chiller posizionato al lato della linea dal quale è possibile impostare direttamente la temperatura.

Sulla calandra viene posizionata la resina già alla temperatura di deposizione, i rulli riscaldati consentono di mantenere tale temperatura per tutta la durata del processo.

I rulli sono mantenuti ad una certa distanza grazie all'azione di due pistoni pneumatici collegati alle estremità dei rulli e che, quando azionati, vanno in battuta su dei supporti meccanici. La particolare geometria di questi supporti unita al fatto che sono montati su un sistema a vite senza fine con vite micrometrica consente la regolazione della distanza presente tra i rulli. Girando la vite è possibile variare la posizione verticale dei supporti. La distanza in ogni momento può essere letta da due display in corrispondenza dei volantini di manovra, collegati a dei comparatori che misurano la posizione delle estremità dei rulli.

È possibile regolare, oltre che la distanza tra i rulli, la larghezza di deposizione: ai lati della calandra sono montate delle paratie mobili che possono scorrere orizzontalmente grazie ad un sistema a vite senza fine permettendo di regolare tale parametro.

Mettendo in moto il rullo che si trova in posizione più avanzata si dà inizio al processo. Il rullo che viene movimentato prende il nome di *master* poiché la sua velocità viene regolata e direttamente indicata nella plancia di comando. Le velocità delle altre parti della linea sono anch'esse regolabili, ma indicate come percentuale della velocità del master.

A questo punto possiamo quindi dire che per regolare la quantità della resina depositata si può agire su tre diversi parametri dipendenti dalla calandra:

- Sulla velocità del master;
- Sulla distanza tra i rulli, *gap sup*;
- Sulla larghezza di deposizione,  $L$ ;

#### *Rullo in gomma*

Il rullo in gomma è il sistema di trazionamento della macchina. Tra il rullo in gomma e la calandra è presente un gap, *gap inf*, che rappresenta un ulteriore parametro del processo di impregnazione. Anche in questo caso, come per la calandra, il rullo in gomma è mantenuto in posizione grazie all'azione di due pistoni pneumatici che, andando in battuta su dei supporti meccanici regolabili, permettendo di variare il *gap inf*. La distanza tra il master e il rullo in gomma viene riportata su due display collegati a due comparatori posti in corrispondenza dei pistoni.

La velocità di rotazione del rullo in gomma regola quella che è la velocità di avanzamento della linea e viene indicata come percentuale della velocità del rullo *master*.

Da questo componente si ricavano altri due parametri di processo:

- La distanza tra rullo in gomma e master *gap inf*
- Velocità di linea,  $V_{lin}$ .

#### *Strumento di misura della grammatura ad ultrasuoni*

All'uscita dalla calandra la carta siliconata con lo strato di resina depositato passa attraverso uno strumento di misura ad ultrasuoni che permette di determinarne il peso e, conoscendo il peso della carta pulita, ci fornisce la grammatura della resina.

Questo strumento permette di controllare durante tutto il funzionamento della macchina la grammatura che si sta ottenendo con i parametri di processo impostati.

### *Piano termico*

Il sistema carta più resina prima di essere riavvolto passa sopra un piano freddo. Questo permette di diminuire la tack della resina e di riavvolgere la carta senza correre il rischio di rovinare il film ottenuto.

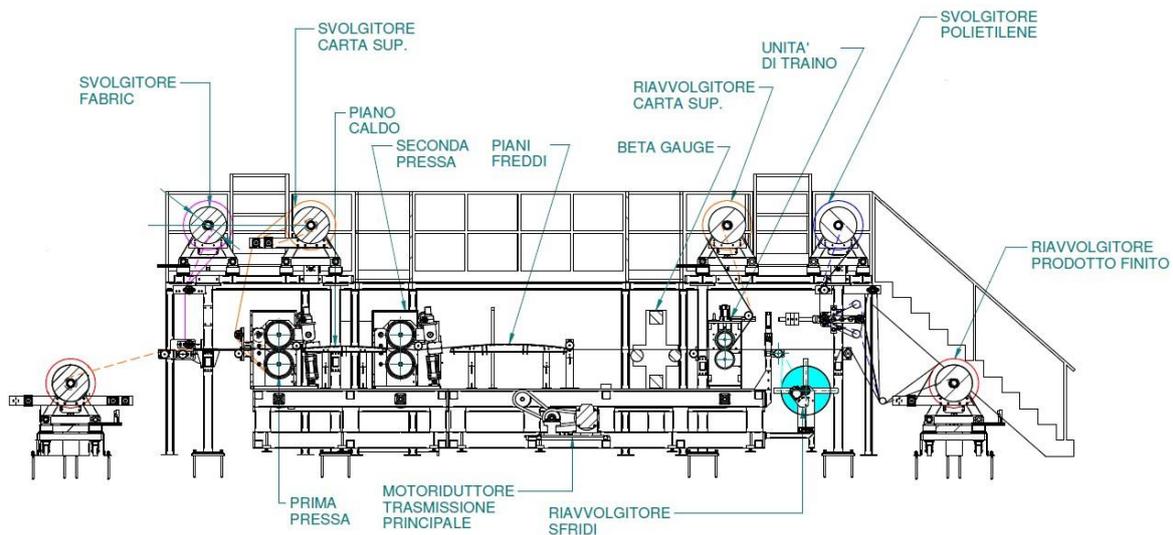
Il piano è inclinato in modo tale che la carta rimanga in contatto con esso per il tratto più lungo possibile. Il piano è regolabile in inclinazione e altezza agendo su dei bulloni avvitati sulla sua base.

### *Riavvolgitore carta resinata*

Alla fine del processo la carta resinata viene avvolta su un avvolgitore simile al primo svolgitore. La differenza sostanziale sta nel fatto che mentre il mandrino dello svolgitore è frenato quello del riavvolgitore è motorizzato al fine di consentire l'avvolgimento della carta. Il motore del riavvolgitore è controllato in coppia e questo consente di mantenere un determinato tensionamento della carta durante l'esecuzione del processo.

Le bobine di carta siliconata resinata ottenute dal processo di filmatura possono essere conservate in frigo oppure immediatamente riutilizzate nella *macchina di impregnazione* per realizzare l'impregnazione del rinforzo.

## **4.2 Macchina di impregnazione**



**Figura 4.2.1.** Schema macchina di impregnazione

La macchina di impregnazione è la seconda macchina analizzata e costituisce il secondo modulo della *linea di impregnazione*. Essa realizza l'accoppiamento tra il tessuto di rinforzo secco e la carta resinata al fine di ottenere il preimpregnato finale. L'applicazione combinata

di calore e pressione abbassa la viscosità della resina e le permette di impregnare il tessuto.

Questa macchina è costituita dai seguenti componenti:

- Svolgitore carta resinata inferiore;
- Svolgitore fabric;
- Svolgitore carta resina superiore;
- Prima pressa;
- Piano caldo;
- Seconda pressa;
- Piano freddo;
- Beta gauge;
- Unità di traino;
- Riavvolgitore carta superiore;
- Unità di taglio;
- Riavvolgitori sfridi;
- Svolgitore polietilene;
- Sistema ballerino;
- Riavvolgitore prodotto finito.

#### *Svolgitore carta resinata inferiore/superiore*

Le bobine di carta resinata vengono disposte sugli svolgitori della carta inferiore e superiore. Questi svolgitori sono del tutto analoghi a quelli della prima macchina. Hanno strutture di metallo a sostegno di un mandrino frenato che opponendo una certa resistenza consente di svolgere la carta mantenendola in tensione.

La carta inferiore e quella superiore vengono portate manualmente all'ingresso della prima pressa dove vengono accoppiate con il tessuto in arrivo dallo *svolgitore del fabric*.

#### *Svolgitore fabric*

Questo svolgitore è posizionato in alto prima dello svolgitore della carta superiore. Anche questo, come tutti gli altri svolgitori, è frenato.

Il fabric viene accoppiato alle due carte, e il sistema carta inf – tessuto – carta sup viene trainato manualmente fino all'unità di traino, seguendo il percorso evidenziato in figura, prima che la macchina venga messa in funzione.

### *Prima pressa*

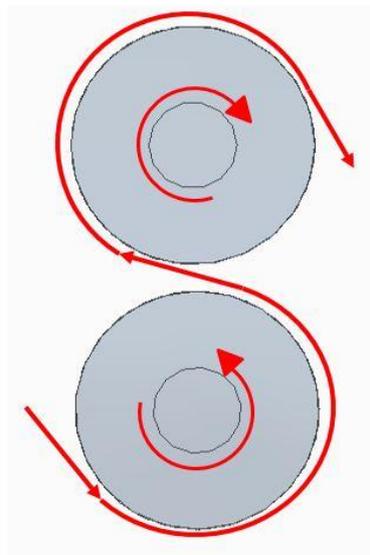
All'inizio del suo percorso nella macchina di impregnazione il prodotto passa attraverso una prima pressa realizzata da due rulli riscaldati. Questa pressa può avere due diverse configurazioni:

- S-wrap;
- Pressa.

L'*s-wrap* è un sistema molto diffuso in questo tipo di linee. Questa configurazione presenta infatti alcuni notevoli vantaggi.

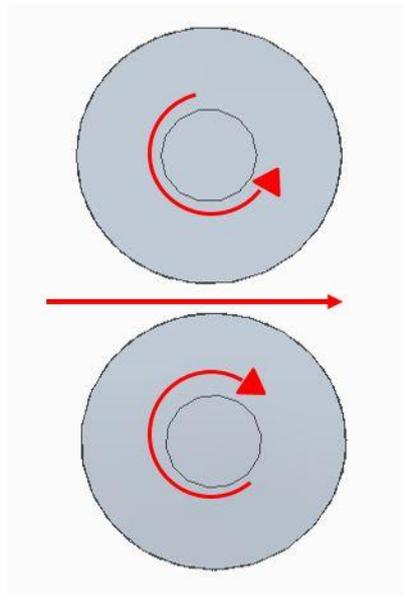
Utilizzando l'*s-wrap* entrambe le carte resinare rimangono per lungo tempo a contatto con i rulli riscaldati, questo garantisce alla resina di raggiungere la temperatura di impregnazione senza la necessità di un piano caldo.

Inoltre, la conformazione del percorso che si segue nell'*s-wrap* consente di applicare una discreta pressione al prodotto facilitando l'impregnazione.



**Figura 4.2.2** Schema funzionamento S-Wrap

La configurazione *pressa* si ottiene modificando il verso di rotazione del rullo superiore. In questo modo sul prodotto viene applicata una forte pressione ma si verifica la necessità di scaldare la resina alla temperatura di impregnazione prima dell'ingresso in pressa.



**Figura 4.2.3** Schema funzionamento pressa

#### *Piano caldo*

Dopo la prima pressa è posizionato un piano caldo che ha lo scopo di mantenere la resina alla temperatura di impregnazione prima che il prodotto giunga alla seconda pressa.

All'interno del piano sono posizionate due serpentine in cui scorre olio ad elevata temperatura. Il calore generato da tali serpentine scalda molto velocemente le superfici di alluminio del piano.

#### *Seconda pressa*

Anche la seconda pressa applica una forte pressione al prodotto grazie all'azione di due rulli riscaldati. I rulli sono riscaldati dalla circolazione la loro interno di olio caldo.

L'azione di compressione nasce come conseguenza del fatto che le carte con il tessuto vengono spinte a passare nel gap, molto stretto, presente tra i rulli.

Il gap è regolabile e viene solitamente impostato pari allo spessore del solo tessuto secco.

#### *Piano freddo*

In uscita dalla seconda pressa il processo di impregnazione del tessuto secco è completo, quindi il prodotto passa su un piano freddo con l'obiettivo di portare la resina alla temperatura ambiente prima di rimuovere la carta superiore. Raffreddare la resina fa diminuire la sua tack evitando che questa rimanga attaccata alla carta.

### *Unità di traino*

L'unità di traino della macchina di impregnazione è rappresentata da una coppia di rulli in gomma posizionati dopo il piano freddo. I rulli sono sollevati da una coppia di pistoni pneumatici prima che la macchina entri in funzione e vengono ingaggiati sul prodotto quando questo vi sopraggiunge. A quel punto i rulli vengono messi in funzione e iniziano a trainare la carta.

### *Riavvolgitore carta superiore*

Questo riavvolgitore è strutturalmente identico agli altri e come gli altri avvolgitori presenta un mandrino motorizzato che gli permette di riavvolgere la carta superiore, rimuovendola dal preimpregnato, a mano a mano che questo avanza verso la fine della macchina.

Prima di avviare il processo, su questo avvolgitore viene posizionata un'anima vuota alla quale viene attaccato il primo capo della carta da rimuovere.

### *Sistema di taglio*

Una volta distaccata la carta il prodotto viene tagliato lateralmente permettendo di ottenere diversi tagli di preimpregnati. Il taglio viene effettuato da due lame, poste a distanza regolabile, montate su una struttura mobile in direzione verticale. La struttura è mossa da un pistone pneumatico che alza e abbassa le lame.

### *Riavvolgitore sfridi*

Gli sfridi ottenuti dal taglio dei preimpregnati vengono riavvolti in due bobine laterali motorizzate.

### *Svolgitore polietilene*

Dopo aver tagliato il preimpregnato, esso deve essere accoppiato con un foglio di materiale distaccante. Nel nostro caso specifico il materiale distaccante utilizzato è il polietilene.

Il polietilene è posizionato sull'apposito svolgitore frenato e prima di entrare in contatto con il preimpregnato passa attraverso un sistema a ballerino.

### *Sistema a ballerino*

Il sistema a ballerino è stato progettato in maniera tale da mantenere il polietilene in tensione durante il funzionamento della macchina. Infatti, esso è dotato di una cella di carico che fornisce il valore della forza applicata su di esso. Se la tensione è troppo elevata o troppo bassa il sistema oscilla in modo tale da ripristinare il valore desiderato.

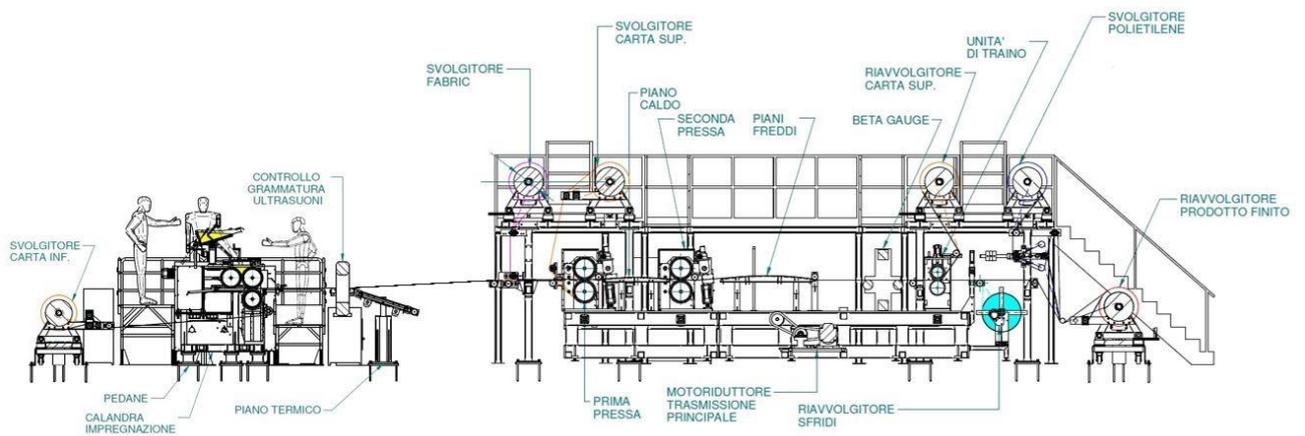
### *Avvolgitore prodotto finito*

Una volta applicato il polietilene il prodotto finito viene riavvolto. Su questo avvolgitore motorizzato è inizialmente posizionata un'anima vuota sul quale viene attaccato il primo capo del prodotto finito.

### **4.3 Linea di impregnazione**

Le due macchine precedentemente descritte possono inoltre lavorare in linea e per questo sono anche considerate come due moduli di una stessa *linea di impregnazione*.

In questa configurazione la carta siliconata in uscita dalla *filmatrice* non viene riavvolta ma entra direttamente nella *macchina di impregnazione*.



**Figura 4.3.1** Schema linea di impregnazione

La linea di impregnazione permette di realizzare il prodotto finito in un unico step, bypassando la formazione delle bobine di carta resinata.

# Prove sperimentali

## 1. Filmatrice

Le prime prove sperimentali sono state effettuate sulla filmatrice. Su questa macchina abbiamo analizzato diverse condizioni di processo al fine di trovare una relazione tra queste, le grammature ottenibili e la qualità finale del film. Per ogni prova è stata poi eseguita una campionatura per verificare le grammature e cercare di ottenere un modello.

La campionatura è stata effettuata prelevando dal rotolo di carta resinata dei provini di dimensioni note (150 mm x 300 mm) che venivano poi pesati grazie all'ausilio di una bilancia con risoluzione del centesimo di grammo.

Dal peso ottenuto veniva quindi rimosso il peso della carta pulita così da ricavare la grammatura del solo film di resina.

Di seguito è riportata la procedura seguita e successivamente le prove effettuate:

1. Accendere la macchina impostando la temperatura dei rulli della calandra di impregnazione;
2. Regolare il gap superiore e il gap inferiore;
3. Raggiunta la temperatura impostata posizionare la resina sui rulli caldi della calandra di impregnazione e attendere che raggiunga la viscosità desiderata;
4. Posizionare la carta siliconata pulita sullo svolgitor;
5. Posizionare un'anima vuota sul mandrino del riavvolgitor;
6. Svolgere la carta pulita facendole seguire il percorso attraverso la filmatrice fino a portarla al riavvolgitor finale;
7. Attaccare con del nastro adesivo l'estremità della carta con l'anima vuota;
8. Attivare la coppia del motore sul mandrino del riavvolgitor e il freno sullo svolgitor;
9. Avviare l'impregnazione mettendo in moto i rulli della calandra e il rullo in gomma;
10. Raggiunto l'obiettivo di metri di carta da filmare interrompere il funzionamento della macchina, rimuovere la resina in eccesso ed eseguire una pulizia approfondita della calandra di impregnazione e di qualsiasi altra parte della macchina sia venuta in contatto con la resina;
11. Rimuovere il rotolo di carta filmata;
12. Prelevare i campioni;
13. Eseguire la pesatura e riportare i dati sul PC.

Nelle prove è stata utilizzata una resina che per motivi di riservatezza verrà indicata con il nome di Resina A.

### *Prova 1*

Resina: Resina A

Gap sup = 0.3 mm

Gap inf = 0.1 mm

$T_{rulli} = 73 \text{ }^\circ\text{C}$

$\mu = 70 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

Coppia motore avvolgitore = 130 N

$V_{master} = 0.5\text{m/min}, 1\text{m/min}, 3\text{m/min}$

$V_{lin} = 100\% V_{master}$

Con queste condizioni abbiamo filmato circa un paio di metri per ogni  $V_{master}$  presa in esame in modo tale da poter prelevare per ciascuna di esse almeno 3 campioni.

### *Prova 2*

Resina: Resina A

Gap sup = 0.3 mm

Gap inf = 0.1 mm

$T_{rulli} = 73^\circ\text{C}$

$\mu = 70 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

Coppia motore riavvolgitore = 200 N

$V_{master} = 0.5 \text{ m/min}$

$V_{lin} = 60\% V_{master}$

Abbiamo modificato il tensionamento della carta, che risultava poco tirata, aumentando la coppia del motore del riavvolgitore.

In questa prova abbiamo utilizzato un'unica  $V_{master}$  ma con  $V_{lin}$  pari al 60% della  $V_{master}$ .

Dopo aver verificato il funzionamento generale della macchina con le prime due prove ne abbiamo effettuate delle altre, variando i diversi parametri, per provare a ricavarne un modello.

### *Prova 3*

Resina: Resina A

Gap sup = 0.1 mm

Gap inf = 0.0 mm

$T_{rulli} = 84^{\circ}\text{C}$

$\mu = 25 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

Coppia motore riavvolgitore = 200 N

$V_{master} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}, 3 \text{ m/min}$

$V_{lin} = 80\% V_{master}, 100\% V_{master}, 120\% V_{master}$

### *Prova 4*

Resina: Resina A

Gap sup = 0.2 mm

Gap inf = 0.1 mm

$T_{rulli} = 84^{\circ}\text{C}$

$\mu = 25 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

Coppia motore riavvolgitore = 200 N

$V_{master} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}, 3 \text{ m/min}$

$V_{lin} = 80\% V_{master}, 100\% V_{master}, 120\% V_{master}$

### *Prova 5*

Resina: Resina A

Gap sup = 0.3 mm

Gap inf = 0.1 mm

$T_{rulli} = 84^{\circ}\text{C}$

$\mu = 25 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

Coppia motore riavvolgitore = 200 N

$V_{master} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}, 3 \text{ m/min}$

$V_{lin} = 80\% V_{master}, 100\% V_{master}, 120\% V_{master}$

In questa prova abbiamo dovuto aumentare il gap inf poiché non consentiva di far passare la quantità elevata di resina depositata dal gap sup.

## *Prova 6*

Resina: Resina A

Gap sup = 0.4 mm

Gap inf = 0.2 mm

$T_{rulli} = 84^{\circ}\text{C}$

$\mu = 25 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

Coppia motore riavvolgitore = 200 N

$V_{master} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}, 3 \text{ m/min}$

$V_{lin} = 80\% V_{master}, 100\% V_{master}, 120\% V_{master}$

## **2. Macchina di impregnazione**

La seconda prova è stata eseguita sulla macchina di impregnazione. Abbiamo effettuato l'impregnazione di un tessuto in fibra di vetro con grammatura 240 g/mq e quella di un tessuto in fibra di carbonio di 300 g/mq. Per entrambi sono state provate sia una modalità di impregnazione one-side che una two-side utilizzando la carta resinata filmata precedentemente. Per ogni diversa prova sono stati impregnati almeno un paio di metri col fine di ottenere dei campioni che ci permettessero di verificare la grammatura finale e la qualità di impregnazione.

Di seguito è riportata la procedura eseguita e successivamente le prove effettuate:

1. Accendere la macchina impostando la temperatura dei rulli delle presse;
2. Posizionare una bobina di carta siliconata già resinata, con la grammatura appropriata, sullo svolgitore della carta inferiore;
3. Posizionare una bobina di carta siliconata sullo svolgitore della carta superiore. Nel caso si volesse operare un'impregnazione two-side la bobina di carta siliconata deve essere stata già resinata;
4. Posizionare il rotolo di fabric desiderato sullo svolgitore del fabric;
5. Disporre un'anima di cartone vuota sul riavvolgitore della carta superiore e una sul riavvolgitore del prodotto finito;
6. Se necessario regolare la distanza delle lame del sistema di taglio del preimpregnato;
7. Regolare i gap tra le calandre/presse;
8. A questo punto accoppiare e instradare manualmente la carta inf, il fabric e la carta superiore;

9. Portato il prodotto fino all'unità di traino ingaggiare i rulli in gomma;
10. Prima di avviare il processo in maniera automatica rimuovere la carta superiore e attaccare l'estremità all'anima presente sull'apposito riavvolgitore;
11. Tirare verso il basso e accoppiare con il preimpregnato il foglio di polietilene facendolo passare attraverso il sistema a ballerino;
12. Collegare l'estremità del prodotto finito all'anima presente sul riavvolgitore finale e dare inizio al processo in maniera automatica;
13. Raggiunto l'obiettivo di impregnazione interrompere il processo, rimuovere gli sfridi e pulire eventualmente la resina dai rulli;
14. Rimuovere la bobina di prodotto finito;
15. Prelevare i campioni;
16. Eseguire la pesatura e riportare i dati sul PC.

#### *Prova 7*

Tessuto: Fibra di vetro 200 g/mq

Resina: Resina A

Tipo di impregnazione: One - side

Config: S-wrap

Gap prima pressa: 0.4 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

T<sub>rulli</sub>: 90°C

T<sub>piani caldi</sub>: 90°C

$\mu = 17 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{\text{lin}} = 100\% V_{\text{master}}$

#### *Prova 8*

Tessuto: Fibra di vetro 200 g/mq

Resina: Resina A

Tipo di impregnazione: Two - side

Config: S-wrap

Gap prima pressa: 0.4 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

$T_{\text{rulli}}: 90^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{piani caldi}}: 90^{\circ}\text{C}$

$\mu = 17 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{\text{lin}} = 100\% V_{\text{master}}$

### *Prova 9*

Tessuto: Fibra di vetro 200 g/mq

Resina: Resina A

Tipo di impregnazione: One - side

Config: Calandra

Gap prima pressa: 0.2 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

$T_{\text{rulli}}: 90^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{piani caldi}}: 90^{\circ}\text{C}$

$\mu = 17 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{\text{lin}} = 100\% V_{\text{master}}$

### *Prova 10*

Tessuto: Fibra di vetro 200 g/mq

Resina: Resina A

Tipo di impregnazione: Two - side

Config: Calandra

Gap prima pressa: 0.2 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

$T_{\text{rulli}}: 90^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{piani caldi}}: 90^{\circ}\text{C}$

$\mu = 17 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{\text{lin}} = 100\% V_{\text{master}}$

### *Prova 11*

Tessuto: Fibra di carbonio 280 g/mq

Resina: Resina A

Tipo di impregnazione: One - side

Config: Calandra

Gap prima pressa: 0.2 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

$T_{\text{rulli}}: 90^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{piani caldi}}: 90^{\circ}\text{C}$

$\mu = 17 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{\text{lin}} = 100\% V_{\text{master}}$

### *Prova 12*

Tessuto: Fibra di carbonio 280 g/mq

Resina: Resina A

Tipo di impregnazione: Two - side

Config: Calandra

Gap prima pressa: 0.2 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

$T_{\text{rulli}}: 90^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{piani caldi}}: 90^{\circ}\text{C}$

$\mu = 17 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{\text{lin}} = 100\% V_{\text{master}}$

## **3. Linea di impregnazione**

Siamo passati a questo punto ad analizzare il processo della *linea di impregnazione*, ovvero il funzionamento in linea della resinatrice e della macchina di impregnazione.

Nelle prime prove abbiamo inserito nella nostra macchina la Resina A contenente anche il relativo indurente. Queste prove ci hanno permesso di valutare se le tempistiche richieste dal processo fossero sufficientemente brevi da completare l'impregnazione prima che avvenisse

la cura della resina. Infatti, quando cura, la resina diventa estremamente dura e difficilmente lavabile.

Seguendo il processo di preparazione descritto per le due macchine, con l'unica differenza che la carta resinata invece di essere riavvolta passava direttamente nella macchina di impregnazione, abbiamo effettuato le seguenti prove e campionature:

#### *Prova 13*

##### *Resinatrice:*

Resina: Resina A + indurente

Gap sup = 0.4 mm

Gap inf = 0.2 mm

$T_{rulli} = 84^{\circ}\text{C}$

$\mu = 25 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

##### *Macchina di impregnazione:*

Tessuto: Fibra di vetro 200 g/mq

Tipo di impregnazione: One - side

Config: Calandra

Gap prima pressa: 0.2 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

$T_{rulli} = 90^{\circ}\text{C}$

$T_{piani\ caldi} = 90^{\circ}\text{C}$

$\mu = 17 \text{ Pas}$

$V_{master} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{lin} = 100\% V_{master}$

Coppia motore riavvolgitore = 200 N

#### *Prova 14*

Resina: Resina A + indurente

Gap sup = 0.2 mm

Gap inf = 0.1 mm

$T_{rulli} = 84^{\circ}\text{C}$

$\mu = 25 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

*Macchina di impregnazione:*

Tessuto: Fibra di vetro 200 g/mq

Tipo di impregnazione: two - side

Config: Calandra

Gap prima pressa: 0.2 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

$T_{\text{rulli}} = 90^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{piani caldi}} = 90^{\circ}\text{C}$

$\mu = 17 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{\text{lin}} = 100\% V_{\text{master}}$

Coppia motore riavvolgitore = 200 N

*Prova 15*

Resina: Resina A + indurente

Gap sup = 0.25 mm

Gap inf = 0.1 mm

$T_{\text{rulli}} = 84^{\circ}\text{C}$

$\mu = 25 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

*Macchina di impregnazione:*

Tessuto: Fibra di Carbonio 200 g/mq

Tipo di impregnazione: Two - side

Config: Calandra

Gap prima pressa: 0.2 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

$T_{\text{rulli}} = 90^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{piani caldi}} = 90^{\circ}\text{C}$

$\mu = 17 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}, 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{\text{lin}} = 100\% V_{\text{master}}$

Coppia motore riavvolgitore = 200 N

Nelle ultime prove effettuate è stata utilizzata una resina epossidica di proprietà della del cliente che per motivi di riservatezza indicheremo con il nome di Resina B. In questa resina è già presente l'indurente e ha un tempo di permanenza a temperatura elevata molto breve prima che si verifichi la gelificazione. Di seguito vengono riportati i parametri utilizzati nelle prove effettuate.

#### *Prova 16*

##### *Resinatrice:*

Resina: Resina B + indurente

Gap sup = 0.2 mm

Gap inf = 0.1 mm

$T_{rulli} = 60^{\circ}\text{C}$

$\mu = 25 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

##### *Macchina di impregnazione:*

Tessuto: Fibra di vetro 200 g/mq

Tipo di impregnazione: Two - side

Config: Calandra

Gap prima pressa: 0.2 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

$T_{rulli} = 90^{\circ}\text{C}$

$T_{piani\ caldi} = 90^{\circ}\text{C}$

$\mu = 9 \text{ Pas}$

$V_{master} = 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{lin} = 100\% V_{master}$

Coppia motore riavvolgitore = 200 N

#### *Prova 17*

##### *Resinatrice:*

Resina: Resina B + indurente

Gap sup = 0.4 mm

Gap inf = 0.2 mm

$T_{rulli} = 60^{\circ}\text{C}$

$\mu = 25 \text{ Pas}$

Coppia resistente svolgitore = 40 N

*Macchina di impregnazione:*

Tessuto: Fibra di vetro 200 g/mq

Tipo di impregnazione: One - side

Config: Calandra

Gap prima pressa: 0.2 mm

Gap seconda pressa: 0.2 mm

$T_{\text{rulli}}: 90^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{piani caldi}}: 90^{\circ}\text{C}$

$\mu = 9 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}, 1.5 \text{ m/min}$

$V_{\text{lin}} = 100\% V_{\text{master}}$

Coppia motore riavvolgitore = 200 N

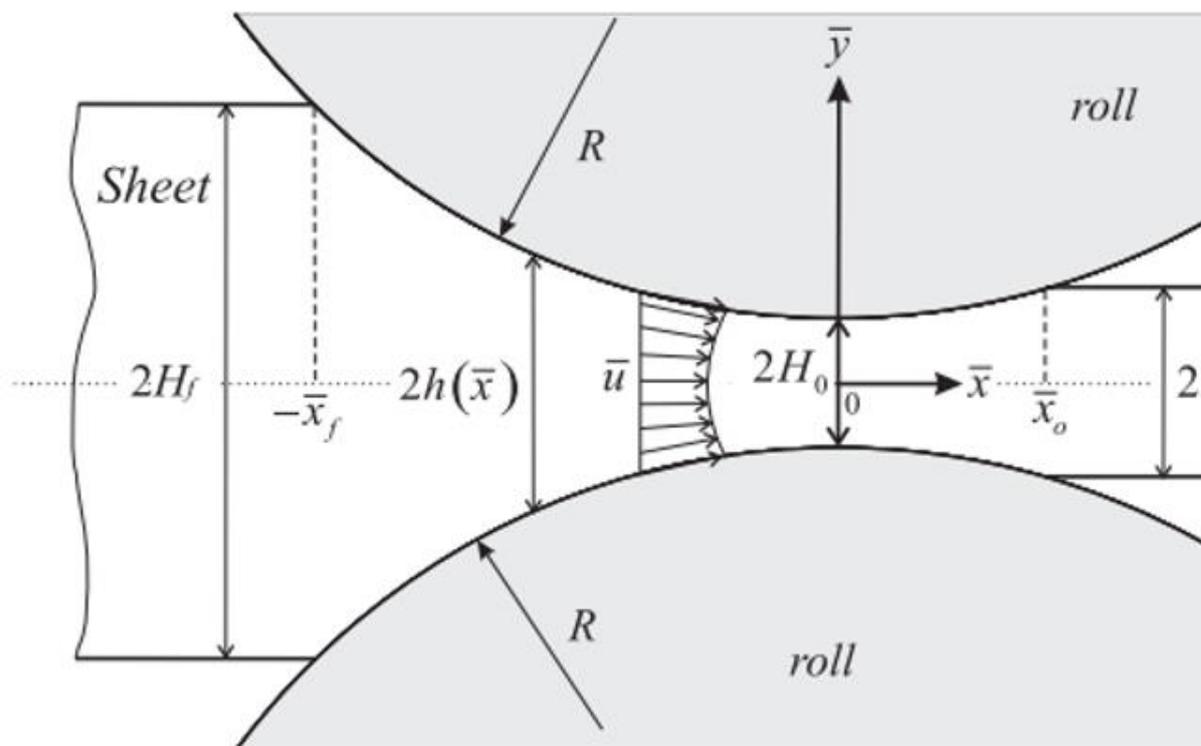
# Analisi dei risultati

## 1. Filmatrice

Un primo studio teorico ha permesso la costruzione due modelli teorici: *modello spinta sui rulli*, *modello resina depositata*. Il *modello della resina depositata* teorico è stato poi confrontato con quello ottenuto sperimentalmente.

### 1.1 Modello spinta sui rulli

Il primo modello ricercato doveva fornire come risultato finale la somma delle forze agenti sui rulli. La resina, costretta a passare nel *gap sup*, a causa della sua viscosità esercita una certa resistenza. Quest'ultima si traduce in una spinta che tende ad allontanare i rulli. Il modello ottenuto, tenendo conto di questa configurazione, ci è servito per verificare che i pistoncini pneumatici dei rulli fossero in grado di resistere a tale spinta.



**Figura 1.1.1** Schema calandra di impregnazione

L'analisi teorica è stata svolta tenendo in considerazione lo schema di **Fig 1.1.1** con le relative denominazioni.

Da una ricerca in letteratura abbiamo ricavato la seguente formula:

$$P_c(\bar{x}) = \sqrt{\frac{R}{h(\bar{x})} \frac{\mu_0 U}{h(\bar{x})}}$$

Dove:

$$U = \omega R$$

$$h(\bar{x}) = H_0 + \left(1 + \frac{\bar{x}^2}{2RH_0}\right)$$

La formula permette di calcolare la pressione che la resina esercita in ogni punto dei rulli durante l'avanzamento del processo.

Dalla progettazione siamo a conoscenza che la spinta con cui i pistoni pneumatici tengono in posizione i rulli della calandra è pari a 7136 N. Questa deve essere sempre superiore alla spinta della resina altrimenti si avrebbe uno spostamento dei rulli che causerebbe un aumento del *gap sup* e quindi una variazione dei parametri di impregnazione.

Per calcolare la forza che si genera dal passaggio della resina tra i rulli è stato necessario integrare su tutta la superficie di contatto rullo-resina la formula ricavata per il calcolo della pressione. La pressione risulta costante lungo Z, infatti la distribuzione della resina è uniforme in quella direzione, ma varia lungo X per metà del diametro (la resina è presente solo sopra i rulli).

$$F = \int_0^l \int_0^R P_c dx dz \rightarrow F = l \int_0^R P_c dx$$

Per risolvere questo integrale è stato utilizzato un foglio di calcolo excel.

Abbiamo diviso l'intervallo di integrazione in 1800 intervallini da 0.0001 m e calcolato per ognuno di essi il valore della pressione agente a metà della sua ampiezza  $P(x_m)$ .

Moltiplicando la  $P(x_m)$  per l'ampiezza dell'intervallo e sommando il risultato ottenuto da tutti gli intervallini otteniamo il risultato dell'integrale. Questo non è altro che una forza per unità di lunghezza,  $F/L(x_m)$ .

Moltiplicando per la lunghezza dei rulli otteniamo infine la forza risultante  $F_{tot}$ .

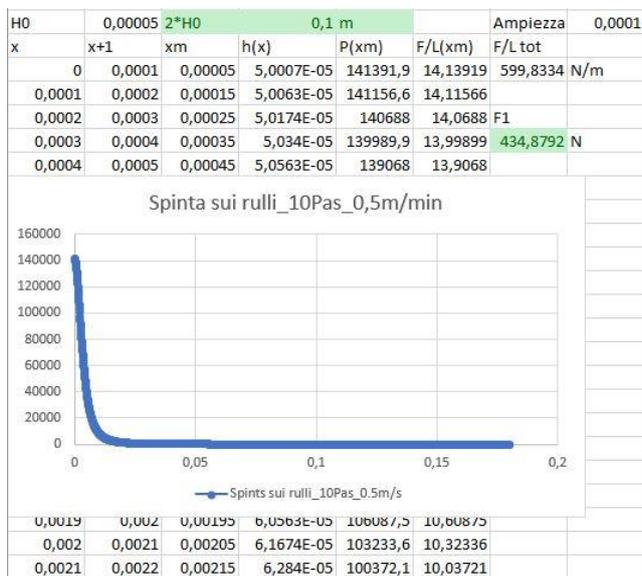
Questi calcoli sono stati svolti variando la viscosità, la velocità di rotazione dei rulli e il gap sup presente tra i rulli. Di seguito sono riportate le distribuzioni delle pressioni nelle diverse condizioni analizzate e successivamente i grafici in cui vengono confrontate le forze risultanti con la forza massima sopportabile.

Nelle immagini sono evidenziati:

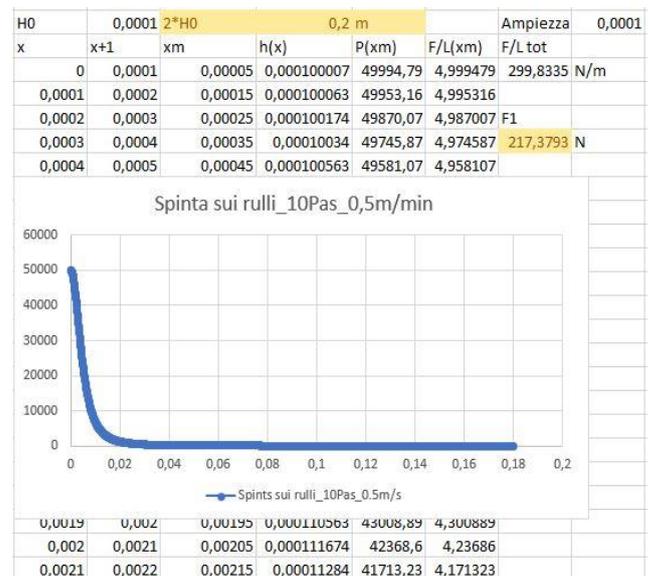
- In VERDE: i valori di gap sup testati a cui corrisponde una  $F_{tot}$  minore di quella massima sopportabile;
- In GIALLO: i valori di gap sup testati maggiori di quello minimo;
- In ROSSO: i valori di gap sup testati a cui corrisponde una forza superiore a quella massima sopportabile.

$$\mu = 10 \text{ Pas} \quad V_{master} = 0.5 \text{ m/min}$$

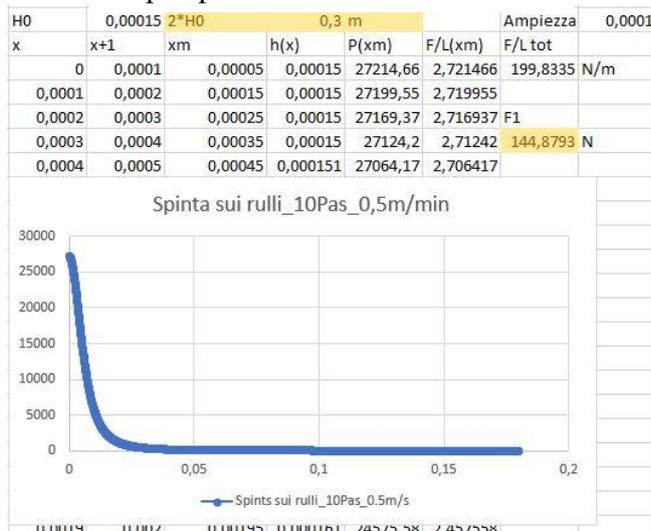
Gap sup = 0.1 mm



Gap sup = 0.2 mm



Gap sup = 0.3 mm

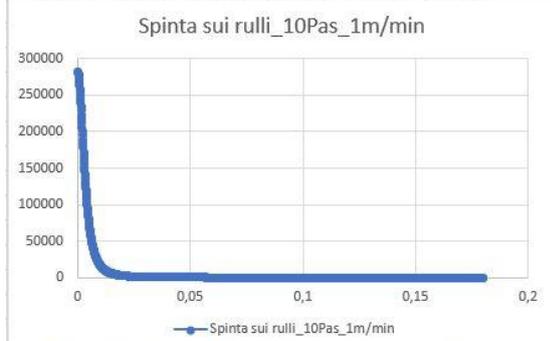


$$\mu = 10 \text{ Pas}$$

$$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$$

Gap sup = 0.1 mm

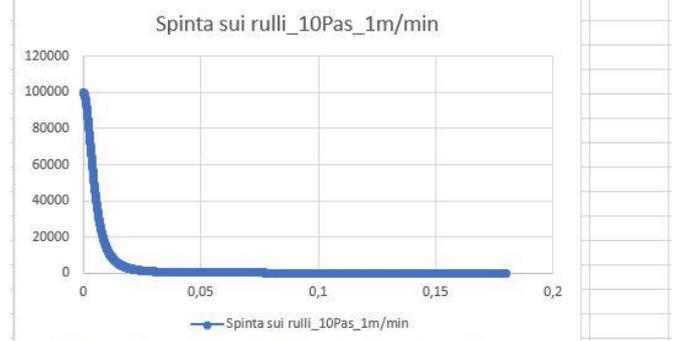
H0	0,00005	2*H0	0,1 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L tot	
0	0,0001	0,00005	5E-05	282783,8	28,27838	1199,667	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	282313,2	28,23132		
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	281375,9	28,13759	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	279979,7	27,99797	869,7584	N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	278136	27,8136		



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	212175	21,2175		
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	206467,1	20,64671		
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	200744,1	20,07441		

Gap sup = 0.2 mm

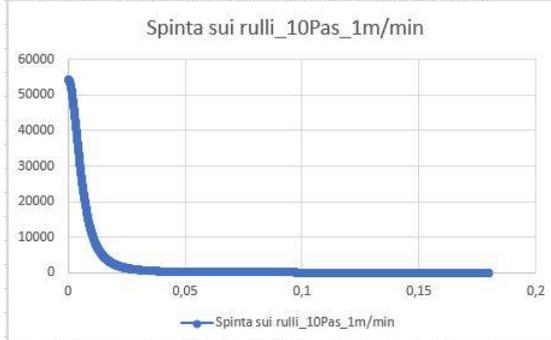
H0	0,0001	2*H0	0,2 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L tot	
0	0,0001	0,00005	0,000100007	99989,58	9,998958	599,6669	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	99906,32	9,990632		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	99740,15	9,974015	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	99491,75	9,949175	434,7585	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	99162,14	9,916214		



0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	86017,78	8,601778		
0,002	0,0021	0,00205	0,00011674	84737,21	8,473721		
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	83426,45	8,342645		

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015	2*H0	0,3 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L tot	
0	0,0001	0,00005	0,000150007	54429,33	5,442933	399,6671	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	54399,1	5,43991		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	54338,74	5,433874	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	54248,41	5,424841	289,7586	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	54128,35	5,412835		



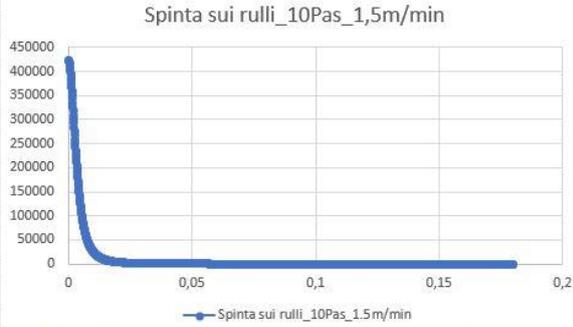
0,0019	0,002	0,00195	0,000160563	49151,17	4,915117		
0,002	0,0021	0,00205	0,000161674	48645,35	4,864535		
0,0021	0,0022	0,00215	0,00016284	48123,5	4,81235		

$$\mu = 10 \text{ Pas}$$

$$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$$

Gap sup = 0.1 mm

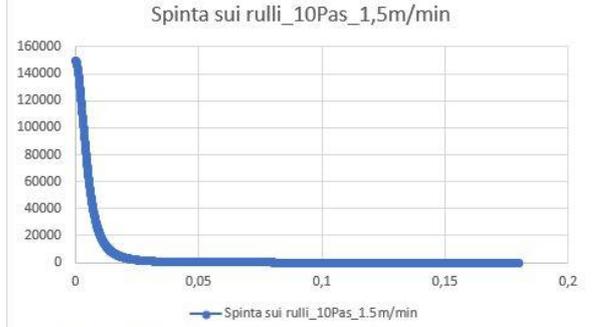
H0	0,0005	2*H0		0,1 m		
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L tot
0	0,0001	0,00005	5E-05	424175,7	42,41757	1799,5 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	423469,8	42,34698	
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	422063,9	42,20639	F1
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	419969,6	41,99696	1304,638 N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	417204	41,7204	



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	318262,6	31,82626	
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	309700,7	30,97007	
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	301116,2	30,11162	

Gap sup = 0.2 mm

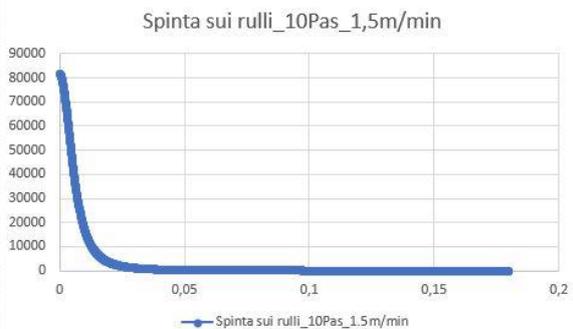
H0	0,0001	2*H0		0,2 m		
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L tot
0	0,0001	0,00005	0,0001	149984,4	14,99844	899,5004 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	149859,5	14,98595	
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	149610,2	14,96102	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	149237,6	14,92376	652,1378 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	148743,2	14,87432	



0,0019	0,002	0,00195	0,000111	129026,7	12,90267	
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	127105,8	12,71058	
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	125139,7	12,51397	

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015	2*H0		0,3 m		
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L tot
0	0,0001	0,00005	0,00015	81643,99	8,164399	599,5006 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	81598,65	8,159865	
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	81508,11	8,150811	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	81372,61	8,137261	434,638 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	81192,52	8,119252	



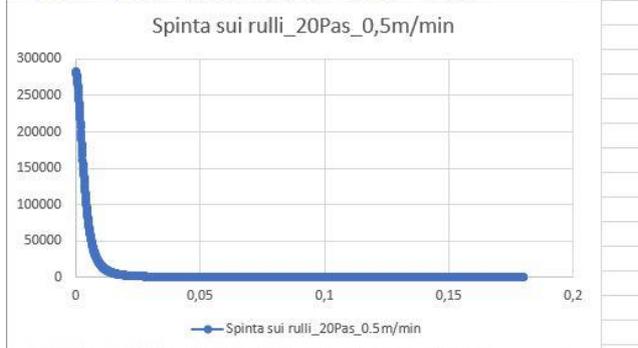
0,0019	0,002	0,00195	0,000161	73726,75	7,372675	
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	72968,02	7,296802	
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	72185,26	7,218526	

$\mu = 20 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

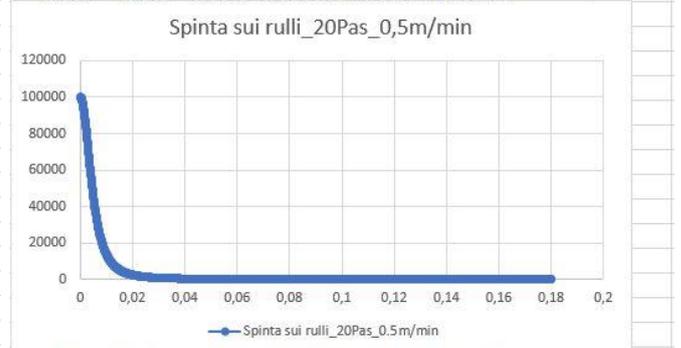
H0	0,0005	2*H0	0,1 m			Ampiezza		0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	5E-05	282783,8	28,27838	1199,667	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	282313,2	28,23132			
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	281375,9	28,13759	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	279979,7	27,99797	869,7584	N	
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	278136	27,8136			



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	212175	21,2175			
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	206467,1	20,64671			
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	200744,1	20,07441			

Gap sup = 0.2 mm

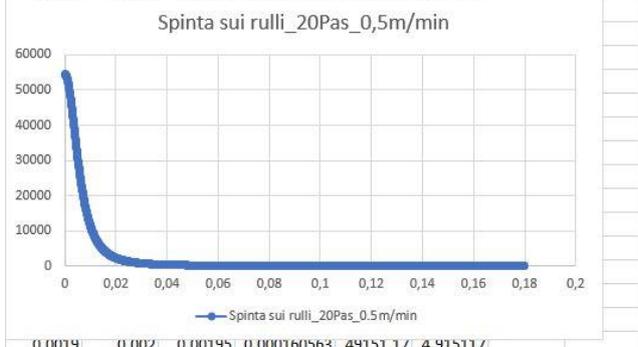
H0	0,0001	2*H0	0,2 m			Ampiezza		0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,000100007	99989,58	9,998958	599,6669	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	99906,32	9,990632			
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	99740,15	9,974015	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	99491,75	9,949175	434,7585	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	99162,14	9,916214			



0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	86017,78	8,601778			
0,002	0,0021	0,00205	0,000111674	84737,21	8,473721			
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	83426,45	8,342645			

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015	2*H0	0,3 m			Ampiezza		0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,000150007	54429,33	5,442933	399,6671	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	54399,1	5,43991			
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	54338,74	5,433874	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	54248,41	5,424841	289,7586	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	54128,35	5,412835			



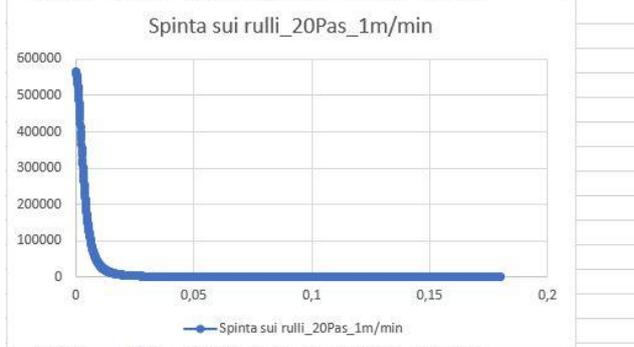
0,0019	0,002	0,00195	0,000160563	49151,17	4,915117			
0,002	0,0021	0,00205	0,000161674	48645,35	4,864535			
0,0021	0,0022	0,00215	0,00016284	48123,5	4,81235			

$$\mu = 20 \text{ Pas}$$

$$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$$

Gap sup = 0.1 mm

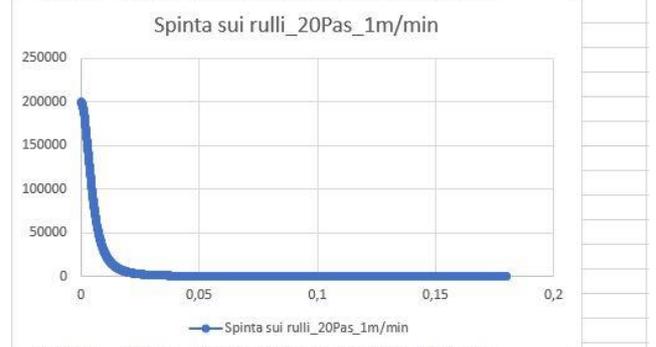
H0	0,00005	2*H0	0,1 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	5E-05	565567,6	56,55676	2399,334 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	564626,4	56,46264	
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	562751,9	56,27519	F1
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	559959,5	55,99595	1739,517 N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	556272	55,6272	



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	424350,1	42,43501
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	412934,3	41,29343
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	401488,3	40,14883

Gap sup = 0.2 mm

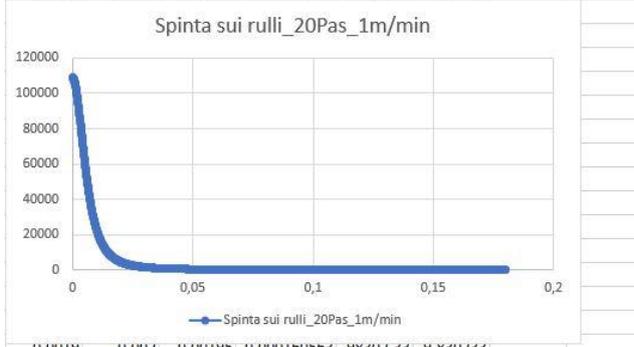
H0	0,0001	2*H0	0,2 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,0001	199979,2	19,99792	1199,334 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	199812,6	19,98126	
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	199480,3	19,94803	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	198983,5	19,89835	869,5171 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	198324,3	19,83243	



0,0019	0,002	0,00195	0,000111	172035,6	17,20356
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	169474,4	16,94744
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	166852,9	16,68529

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015	2*H0	0,3 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,000150007	108858,7	10,88587	799,3342 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	108798,2	10,87982	
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	108677,5	10,86775	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	108496,8	10,84968	579,5173 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	108256,7	10,82567	



0,0019	0,002	0,00195	0,000160563	98302,33	9,830233
0,002	0,0021	0,00205	0,000161674	97290,69	9,729069
0,0021	0,0022	0,00215	0,00016284	96247,01	9,624701

$\mu = 20 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

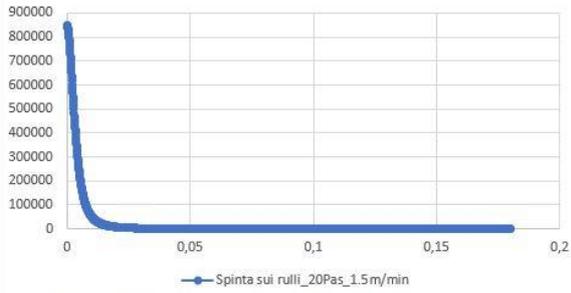
Gap sup = 0.1 mm

H0	0,0005	2*H0	0,1 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	5E-05	848351,4	84,83514	3599 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	846939,6	84,69396	
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	844127,8	84,41278	F1
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	839939,2	83,99392	2609,275 N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	834408	83,4408	

Gap sup = 0.2 mm

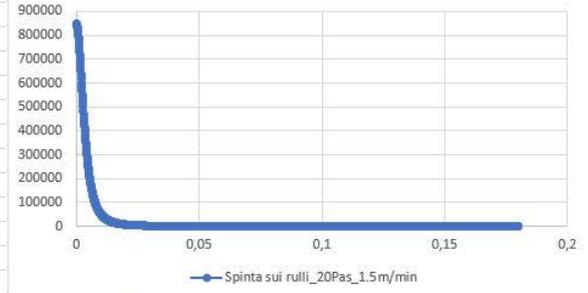
H0	0,0001	2*H0	0,2 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,0001	299968,8	29,99688	1799,001 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	299719	29,9719	
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	299220,4	29,92204	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	298475,2	29,84752	1304,276 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	297486,4	29,74864	

Spinta sui rulli\_20Pas\_1,5m/min



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	636525,1	63,65251
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	619401,4	61,94014
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	602232,4	60,22324

Spinta sui rulli\_20Pas\_1,5m/min

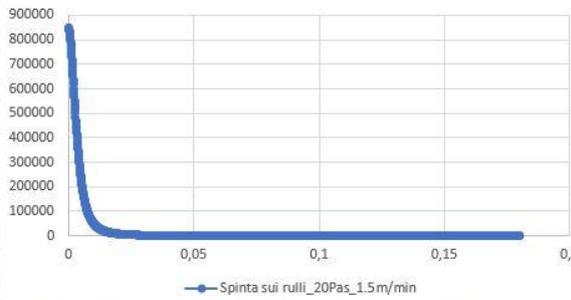


0,0019	0,002	0,00195	0,000111	258053,3	25,80533
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	254211,6	25,42116
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	250279,4	25,02794

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015	2*H0	0,3 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,00015	163288	16,3288	1199,001 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	163197,3	16,31973	
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	163016,2	16,30162	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	162745,2	16,27452	869,2759 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	162385	16,2385	

Spinta sui rulli\_20Pas\_1,5m/min



0,0019	0,002	0,00195	0,000161	147453,5	14,74535
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	145936	14,5936
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	144370,5	14,43705

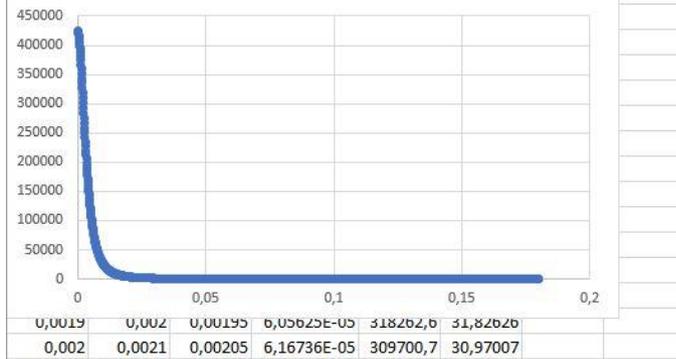
$$\mu = 30 \text{ Pas}$$

$$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$$

Gap sup = 0.1 mm

H0	0,1 m						Ampiezza	0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	5,00069E-05	424175,7	42,41757	1799,5	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	5,00625E-05	423469,8	42,34698			
0,0002	0,0003	0,00025	5,01736E-05	422063,9	42,20639	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	5,03403E-05	419969,6	41,99696	1304,638	N	
0,0004	0,0005	0,00045	5,05625E-05	417204	41,7204			

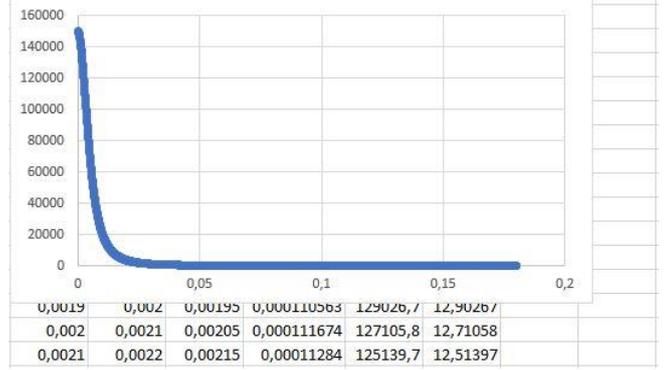
Spinta sui rulli\_30Pas\_0.5m/min



Gap sup = 0.2 mm

H0	0,2 m						
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000100007	149984,4	14,99844	899,5004	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	149859,5	14,98595		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	149610,2	14,96102	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	149237,6	14,92376	652,1378	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	148743,2	14,87432		

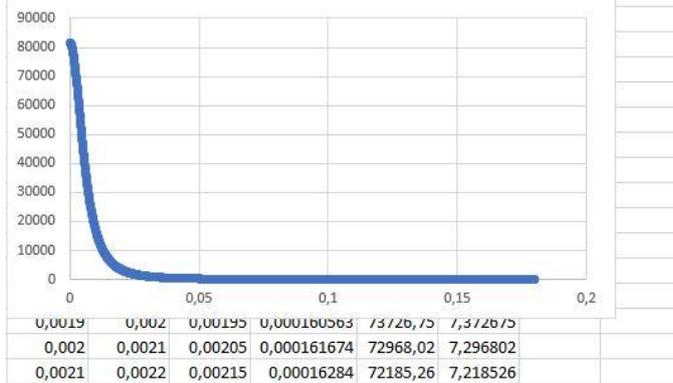
Spinta sui rulli\_30Pas\_0.5m/min



Gap sup = 0.3 mm

H0	0,3 m						
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000150007	81643,99	8,164399	599,5006	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	81598,65	8,159865		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	81508,11	8,150811	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	81372,61	8,137261	434,638	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	81192,52	8,119252		

Spinta sui rulli\_30Pas\_0.5m/min

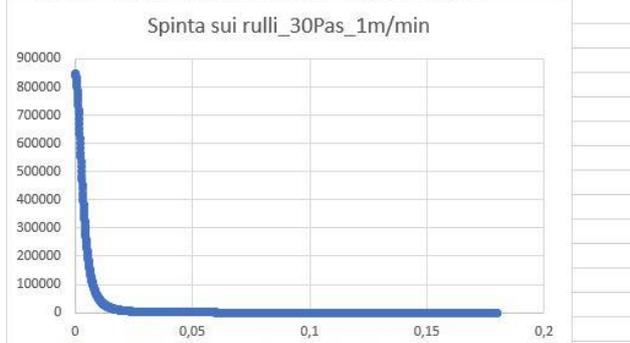


$\mu = 30 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

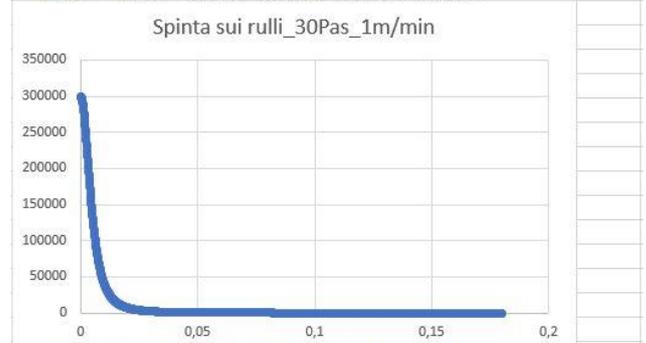
H0	0,0005	2*H0	0,1 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	5E-05	848351,4	84,83514	3599 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	846939,6	84,69396	
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	844127,8	84,41278	F1
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	839939,2	83,99392	2609,275 N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	834408	83,4408	



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	636525,1	63,65251	
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	619401,4	61,94014	
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	602232,4	60,22324	

Gap sup = 0.2 mm

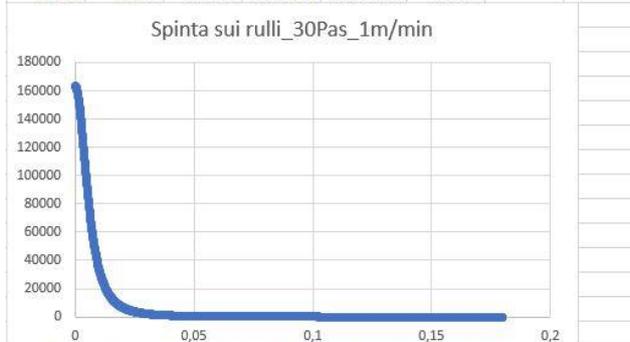
H0	0,0001	2*H0	0,2 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,0001	299968,8	29,99688	1799,001 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	299719	29,9719	
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	299220,4	29,92204	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	298475,2	29,84752	1304,276 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	297486,4	29,74864	



0,0019	0,002	0,00195	0,000111	258053,3	25,80533	
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	254211,6	25,42116	
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	250279,4	25,02794	

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015	2*H0	0,3 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,00015	163287,98	16,3288	1199,001 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	163197,31	16,31973	
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	163016,22	16,30162	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	162745,22	16,27452	869,2759 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	162385,04	16,2385	



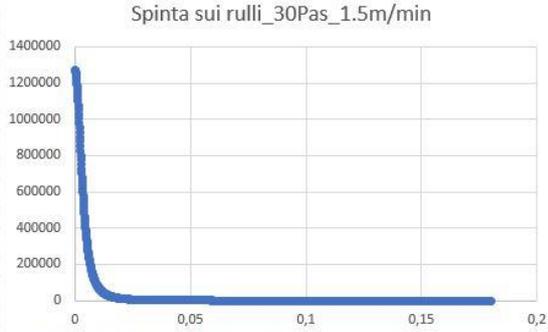
0,0019	0,002	0,00195	0,000161	147453,5	14,74535	
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	145936,04	14,5936	
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	144370,51	14,43705	

$\mu = 30 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

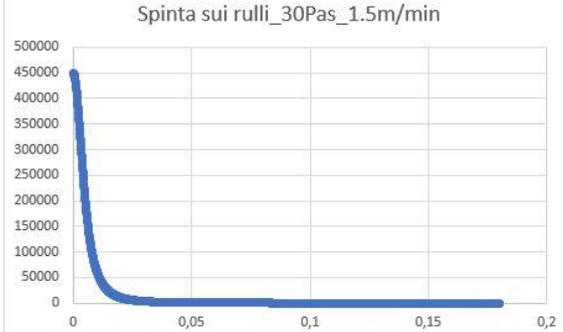
H0	0,00005		2*H0		0,1 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	5E-05	1272527	127,2527	5398,501	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	1270409	127,0409			
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	1266192	126,6192	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	1259909	125,9909	3913,913	N	
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	1251612	125,1612			



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	954787,7	95,47877			
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	929102,1	92,91021			
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	903348,6	90,33486			

Gap sup = 0.2 mm

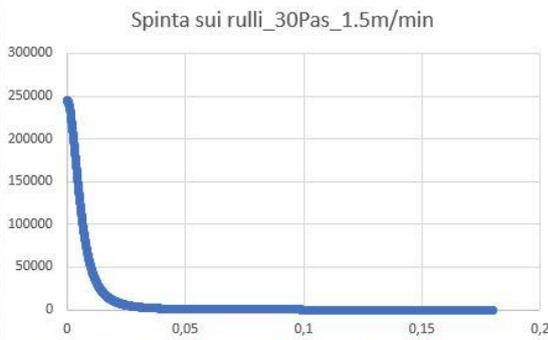
H0	0,0001		2*H0		0,2 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,0001	449953,1	44,99531	2698,501	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	449578,5	44,95785			
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	448830,7	44,88307	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	447712,9	44,77129	1956,413	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	446229,6	44,62296			



0,0019	0,002	0,00195	0,000111	387080	38,708			
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	381317,4	38,13174			
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	375419	37,5419			

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015		2*H0		0,3 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,00015	244932	24,4932	1798,502	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	244796	24,4796			
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	244524,3	24,45243	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	244117,8	24,41178	1303,914	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	243577,6	24,35776			

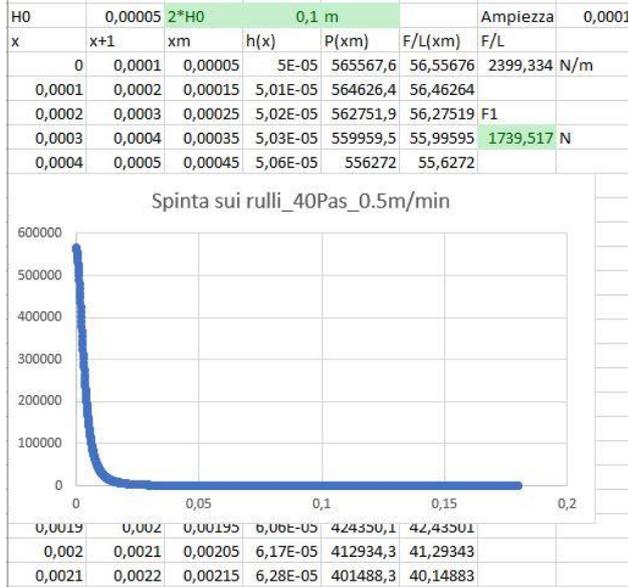


0,0019	0,002	0,00195	0,000161	221180,2	22,11802			
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	218904,1	21,89041			
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	216555,8	21,65558			

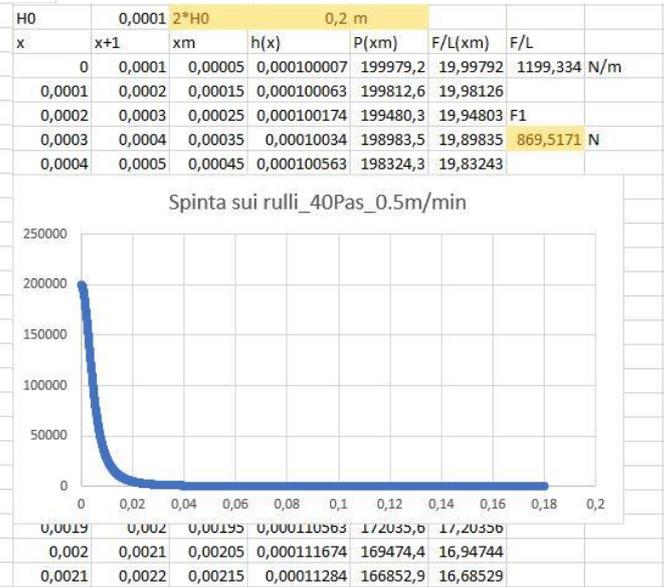
$\mu = 40 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$

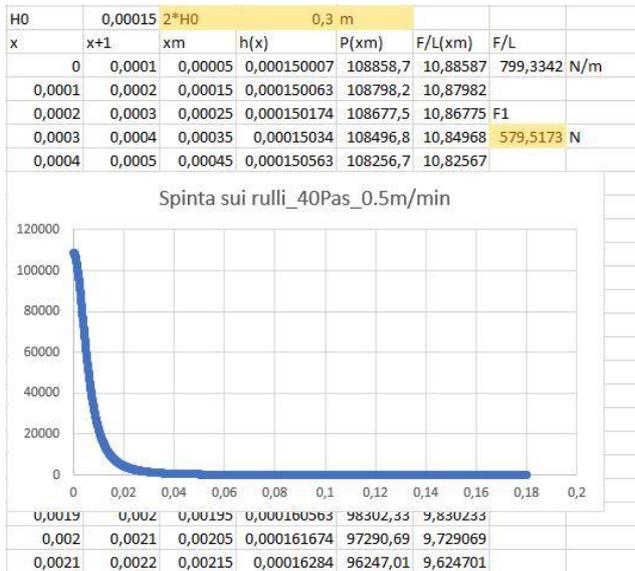
Gap sup = 0.1 mm



Gap sup = 0.2 mm



Gap sup = 0.3 mm

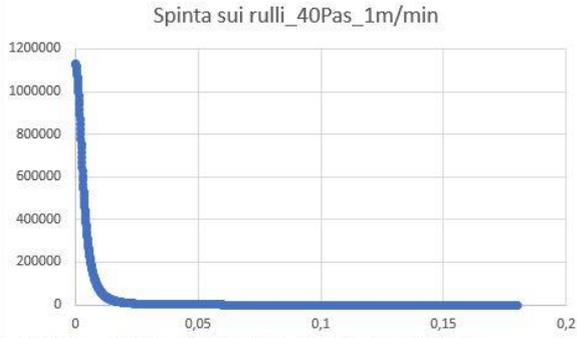


$$\mu = 40 \text{ Pas}$$

$$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$$

Gap sup = 0.1 mm

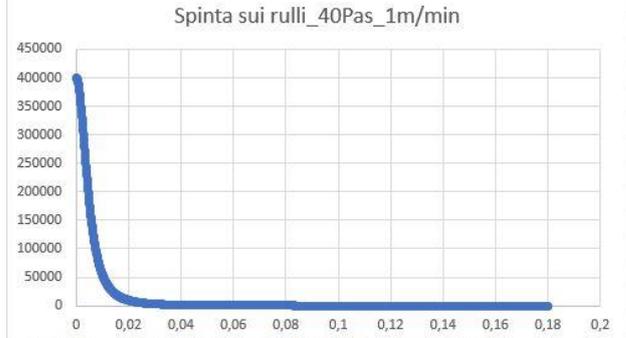
H0	0,00005		2*H0		0,1 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	5E-05	1131135	113,1135	4798,667	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	1129253	112,9253			
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	1125504	112,5504	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	1119919	111,9919	3479,034	N	
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	1112544	111,2544			



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	848700,2	84,87002			
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	825868,5	82,58685			
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	802976,5	80,29765			

Gap sup = 0.2 mm

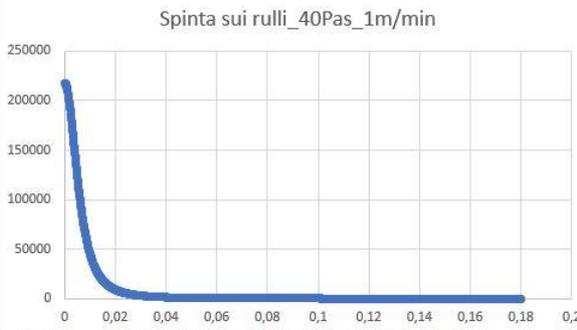
H0	0,0001		2*H0		0,2 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,000100007	399958,3	39,99583	2398,668	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	399625,3	39,96253			
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	398960,6	39,89606	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	397967	39,7967	1739,034	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	396648,6	39,66486			



0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	344071,1	34,40711			
0,002	0,0021	0,00205	0,000111674	338948,8	33,89488			
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	333705,8	33,37058			

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015		2*H0		0,3 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,000150007	217717,3	21,77173	1598,668	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	217596,4	21,75964			
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	217355	21,7355	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	216993,6	21,69936	1159,035	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	216513,4	21,65134			



0,0019	0,002	0,00195	0,000160563	196604,7	19,66047			
0,002	0,0021	0,00205	0,000161674	194581,4	19,45814			
0,0021	0,0022	0,00215	0,00016284	192494	19,2494			

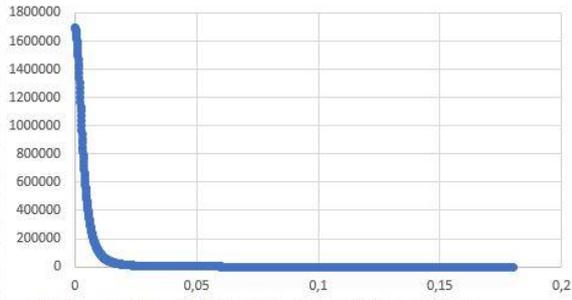
$\mu = 40 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

H0	0,00005		2*H0		0,1 m		
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	5E-05	1696703	169,6703	7198,001	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	1693879	169,3879		
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	1688256	168,8256	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	1679878	167,9878	5218,551	N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	1668816	166,8816		

Spinta sui rulli\_40Pas\_1.5m/min

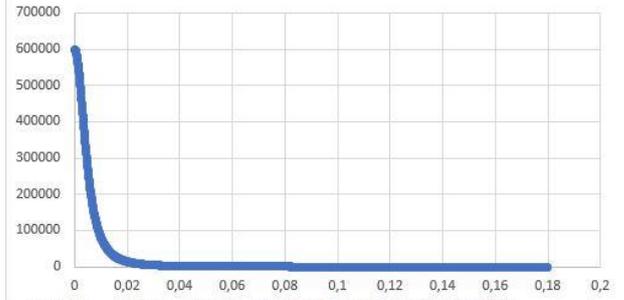


0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	1273050	127,305		
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	1238803	123,8803		
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	1204465	120,4465		

Gap sup = 0.2 mm

H0	0,0001		2*H0		0,2 m		
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000100007	599937,51	59,99375	3598,002	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	599437,94	59,94379		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	598440,88	59,84409	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	596950,47	59,69505	2608,551	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	594972,86	59,49729		

Spinta sui rulli\_40Pas\_1.5m/min

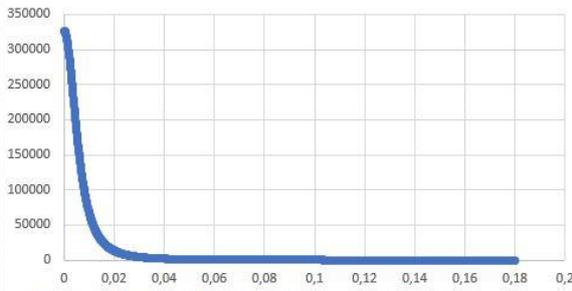


0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	516106,67	51,61067		
0,002	0,0021	0,00205	0,000111674	508423,26	50,84233		
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	500558,72	50,05587		

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015		2*H0		0,3 m		
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000150007	326576	32,6576	2398,002	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	326394,6	32,63946		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	326032,4	32,60324	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	325490,4	32,54904	1738,552	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	324770,1	32,47701		

Spinta sui rulli\_40Pas\_1.5m/min



0,0019	0,002	0,00195	0,000160563	294907	29,4907		
0,002	0,0021	0,00205	0,000161674	291872,1	29,18721		
0,0021	0,0022	0,00215	0,00016284	288741	28,8741		

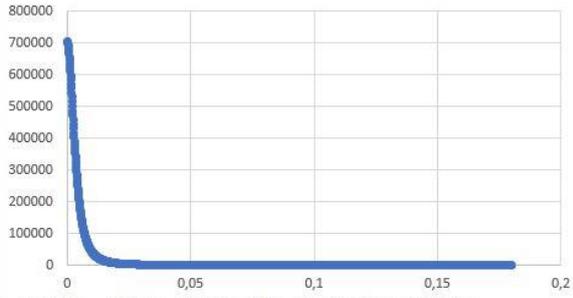
$\mu = 50 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

H0	0,00005 2*H0		0,1 m			Ampiezza	0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	5E-05	706959,5	70,69595	2999,167	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	705783	70,5783		
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	703439,9	70,34399	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	699949,3	69,99493	2174,396	N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	695340	69,534		

Spinta sui rulli\_50Pas\_0.5m/min

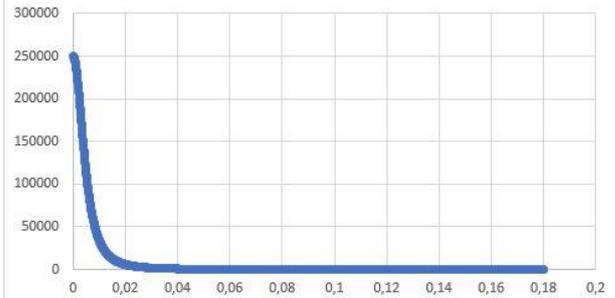


0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	530437,6	53,04376		
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	516167,8	51,61678		
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	501860,3	50,18603		

Gap sup = 0.2 mm

H0	0,0001 2*H0		0,2 m			Ampiezza	0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000100007	249974	24,9974	1499,167	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	249765,8	24,97658		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	249350,4	24,93504	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	248729,4	24,87294	1086,896	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	247905,4	24,79054		

Spinta sui rulli\_50Pas\_0.5m/min

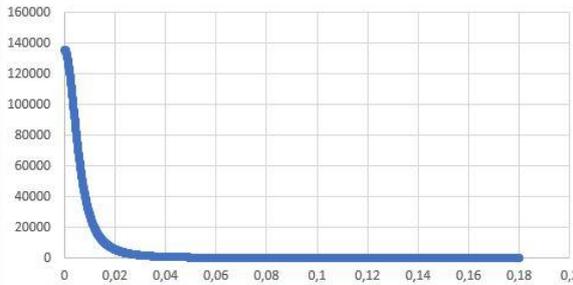


0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	215044,4	21,50444		
0,002	0,0021	0,00205	0,000111674	211843	21,1843		
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	208566,1	20,85661		

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015 2*H0		0,3 m			Ampiezza	0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000150007	136073,3	13,60733	999,1677	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	135997,8	13,59978		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	135846,9	13,58469	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	135621	13,5621	724,3966	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	135320,9	13,53209		

Spinta sui rulli\_50Pas\_0.5m/min



0,0019	0,002	0,00195	0,000160563	122877,9	12,28779		
0,002	0,0021	0,00205	0,000161674	121613,4	12,16134		
0,0021	0,0022	0,00215	0,00016284	120308,8	12,03088		

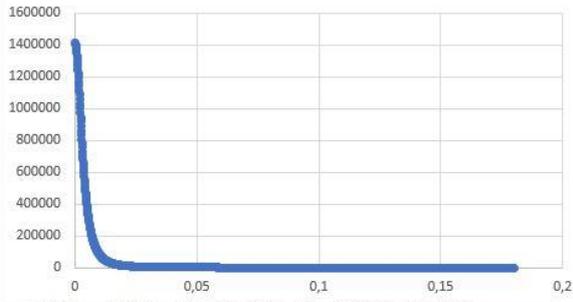
$$\mu = 50 \text{ Pas}$$

$$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$$

Gap sup = 0.1 mm

H0	0,00005 2*H0		0,1 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	5E-05	1413919	141,3919	5998,334 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	1411566	141,1566	
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	1406880	140,688	F1
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	1399899	139,9899	4348,792 N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	1390680	139,068	

Spinta sui rulli\_50Pas\_1m/min

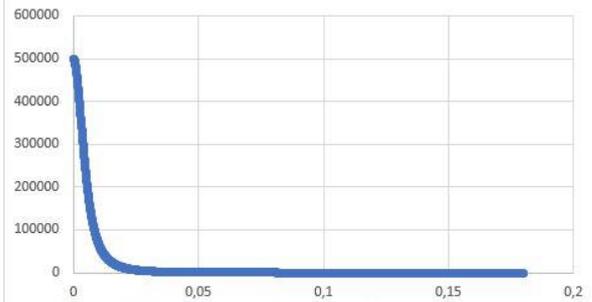


0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	1060875	106,0875
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	1032336	103,2336
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	1003721	100,3721

Gap sup = 0.2 mm

H0	0,0001 2*H0		0,2 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,0001	499947,9	49,99479	2998,335 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	499531,6	49,95316	
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	498700,7	49,87007	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	497458,7	49,74587	2173,793 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	495810,7	49,58107	

Spinta sui rulli\_50Pas\_1m/min

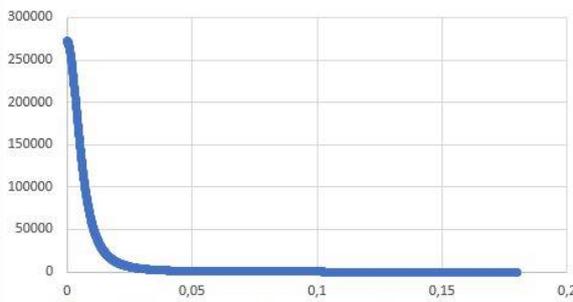


0,0019	0,002	0,00195	0,000111	430088,9	43,00889
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	423686	42,3686
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	417132,3	41,71323

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015 2*H0		0,3 m			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,00015	272146,6	27,21466	1998,335 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	271995,5	27,19955	
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	271693,7	27,16937	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	271242	27,1242	1448,793 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	270641,7	27,06417	

Spinta sui rulli\_50Pas\_1m/min



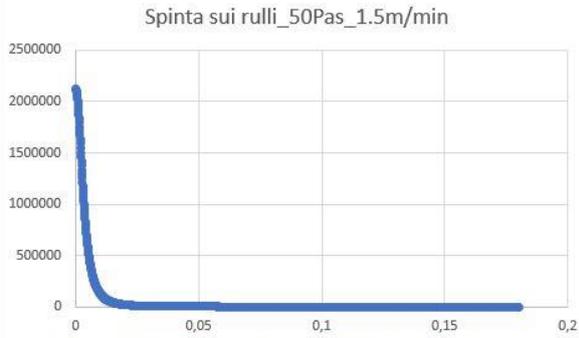
0,0019	0,002	0,00195	0,000161	245755,8	24,57558
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	243226,7	24,32267
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	240617,5	24,06175

$\mu = 50 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

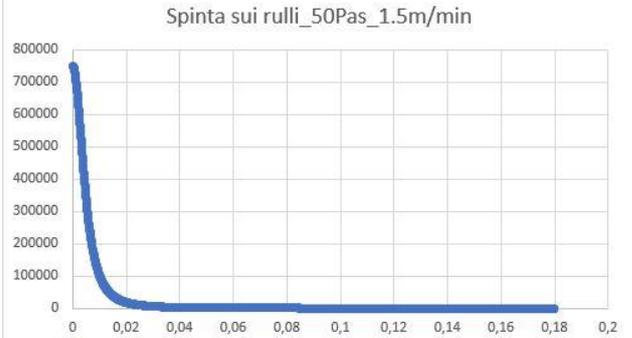
H0	0,00005		2*H0		0,1 m		
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	5E-05	2120878	212,0878	8997,501	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	2117349	211,7349		
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	2110320	211,032	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	2099848	209,9848	6523,188	N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	2086020	208,602		



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	1591313	159,1313		
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	1548504	154,8504		
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	1505581	150,5581		

Gap sup = 0.2 mm

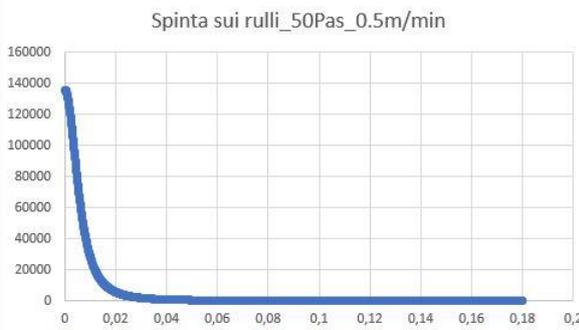
H0	0,0001		2*H0		0,2 m		
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000100007	749921,88	74,99219	4497,502	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	749297,42	74,92974		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	748051,1	74,80511	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	746188,09	74,61881	3260,689	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	743716,08	74,37161		



0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	645133,34	64,51333		
0,002	0,0021	0,00205	0,000111674	635529,07	63,55291		
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	625698,4	62,56984		

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015		2*H0		0,3 m		
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000150007	136073,3	13,60733	999,1677	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	135997,8	13,59978		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	135846,9	13,58469	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	135621	13,5621	724,3966	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	135320,9	13,53209		



0,0019	0,002	0,00195	0,000160563	122811,9	12,28119		
0,002	0,0021	0,00205	0,000161674	121613,4	12,16134		
0,0021	0,0022	0,00215	0,00016284	120308,8	12,03088		

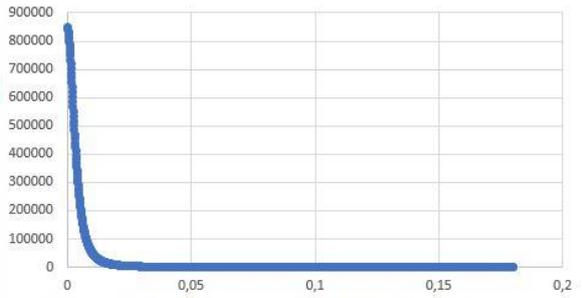
$\mu = 60 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

H0	0,00005	2*H0		0,1 m			Ampiezza	0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	5E-05	848351,4	84,83514	3599	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	846939,6	84,69396			
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	844127,8	84,41278	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	839939,2	83,99392	2609,275	N	
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	834408	83,4408			

Spinta sui rulli\_60Pas\_0.5m/min

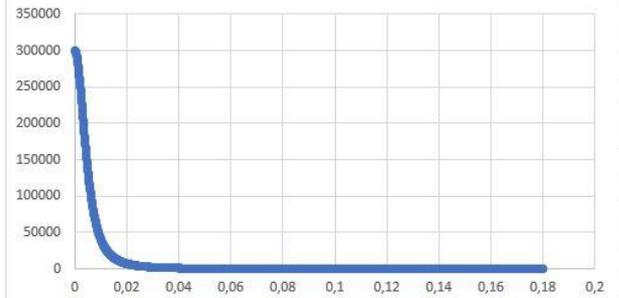


0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	636525,1	63,65251			
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	619401,4	61,94014			
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	602232,4	60,22324			

Gap sup = 0.2 mm

H0	0,0001	2*H0		0,2 m			Ampiezza	0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,000100007	299968,8	29,99688	1799,001	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	299719	29,9719			
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	299220,4	29,92204	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	298475,2	29,84752	1304,276	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	297486,4	29,74864			

Spinta sui rulli\_60Pas\_0.5m/min

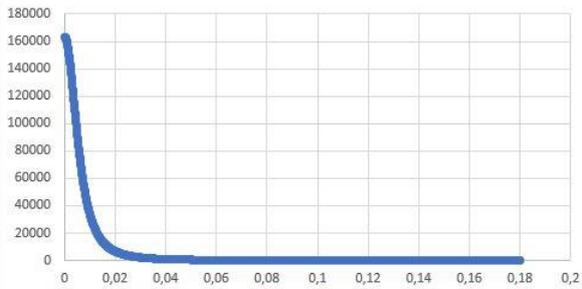


0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	258053,3	25,80533			
0,002	0,0021	0,00205	0,000111674	254211,6	25,42116			
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	250279,4	25,02794			

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015	2*H0		0,3 m			Ampiezza	0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,000150007	163288	16,3288	1199,001	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	163197,3	16,31973			
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	163016,2	16,30162	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	162745,2	16,27452	869,2759	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	162385	16,2385			

Spinta sui rulli\_60Pas\_0.5m/min



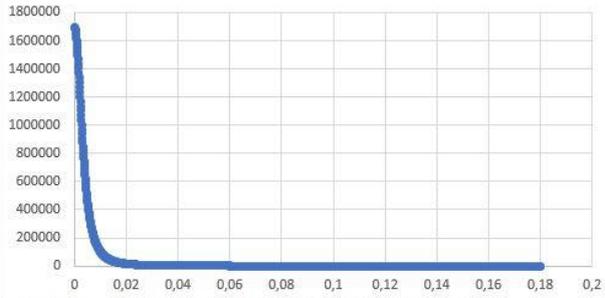
0,0019	0,002	0,00195	0,000160563	147453,5	14,74535			
0,002	0,0021	0,00205	0,000161674	145936	14,5936			
0,0021	0,0022	0,00215	0,00016284	144370,5	14,43705			

$$\mu = 60 \text{ Pas} \quad V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$$

Gap sup = 0.1 mm

H0	0,00005	2*H0		0,1 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	5,00069E-05	1696702,8	169,6703	7198,001	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	5,00625E-05	1693879,3	169,3879			
0,0002	0,0003	0,00025	5,01736E-05	1688255,6	168,8256	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	5,03403E-05	1679878,4	167,9878	5218,551	N	
0,0004	0,0005	0,00045	5,05625E-05	1668816	166,8816			

Spinta sui rulli\_60Pas\_1m/min

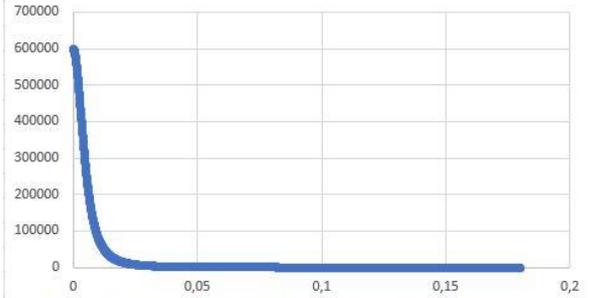


0,0019	0,002	0,00195	6,05625E-05	1273050,3	127,305			
0,002	0,0021	0,00205	6,16736E-05	1238802,8	123,8803			
0,0021	0,0022	0,00215	6,28403E-05	1204464,8	120,4465			

Gap sup = 0.2 mm

H0	0,0001	2*H0		0,2 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,0001	599937,5	59,99375	3598,002	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	599437,9	59,94379			
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	598440,9	59,84409	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	596950,5	59,69505	2608,551	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	594972,9	59,49729			

Spinta sui rulli\_60Pas\_1m/min

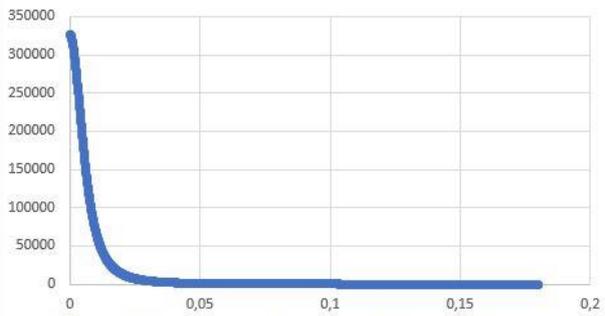


0,0019	0,002	0,00195	0,000111	516106,7	51,61067			
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	508423,3	50,84233			
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	500558,7	50,05587			

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015	2*H0		0,3 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,00015	326576	32,6576	2398,002	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	326394,6	32,63946			
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	326032,4	32,60324	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	325490,4	32,54904	1738,552	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	324770,1	32,47701			

Spinta sui rulli\_60Pas\_1m/min



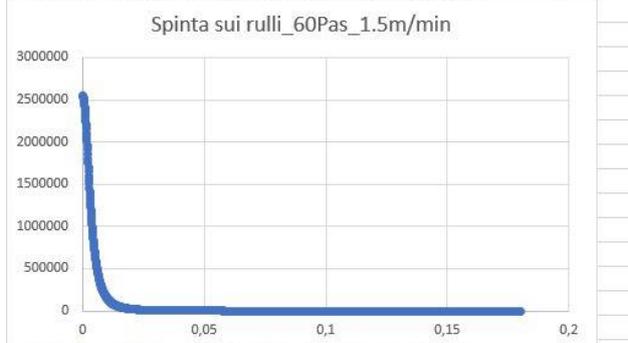
0,0019	0,002	0,00195	0,000161	294907	29,4907			
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	291872,1	29,18721			
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	288741	28,8741			

$\mu = 60 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

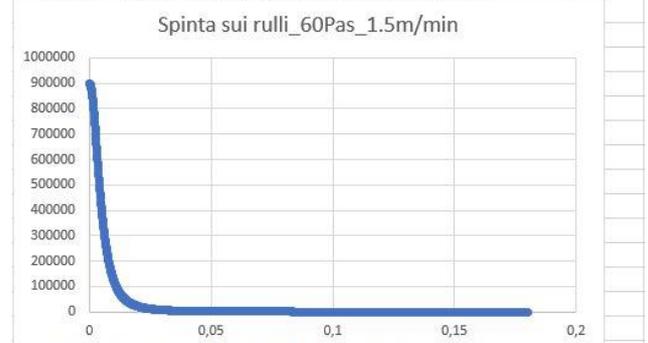
H0	0,00005	2*H0		0,1 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	5E-05	2545054	254,5054	10797	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	2540819	254,0819			
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	2532383	253,2383	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	2519818	251,9818	7827,826	N	
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	2503224	250,3224			



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	1909575	190,9575			
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	1858204	185,8204			
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	1806697	180,6697			

Gap sup = 0.2 mm

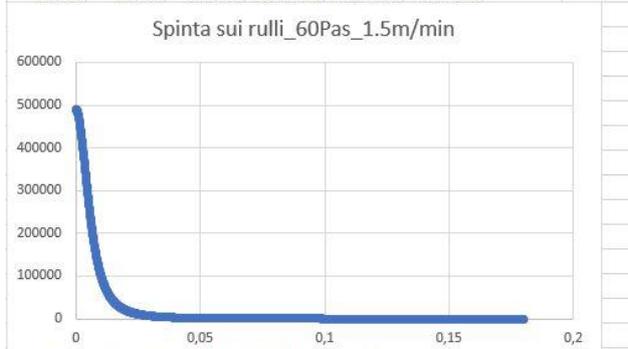
H0	0,0001	2*H0		0,2 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,0001	899906,3	89,99063	5397,002	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	899156,9	89,91569			
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	897661,3	89,76613	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	895425,7	89,54257	3912,827	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	892459,3	89,24593			



0,0019	0,002	0,00195	0,000111	774160	77,416			
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	762634,9	76,26349			
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	750838,1	75,08381			

Gap sup = 0.3 mm

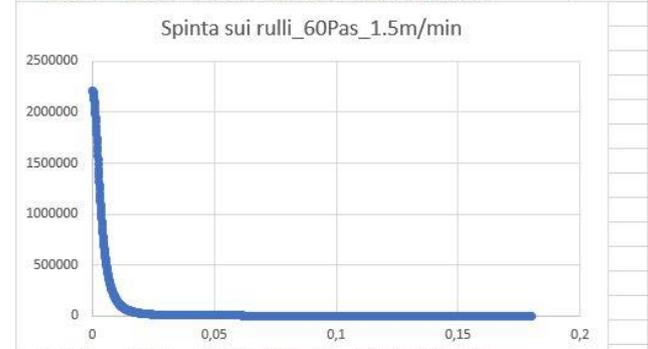
H0	0,00015	2*H0		0,3 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,00015	489863,9	48,98639	3597,004	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	489591,9	48,95919			
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	489048,7	48,90487	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	488235,6	48,82356	2607,828	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	487155,1	48,71551			



0,0019	0,002	0,00195	0,000161	442360,5	44,23605			
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	437808,1	43,78081			
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	433111,5	43,31115			

Gap sup minimo

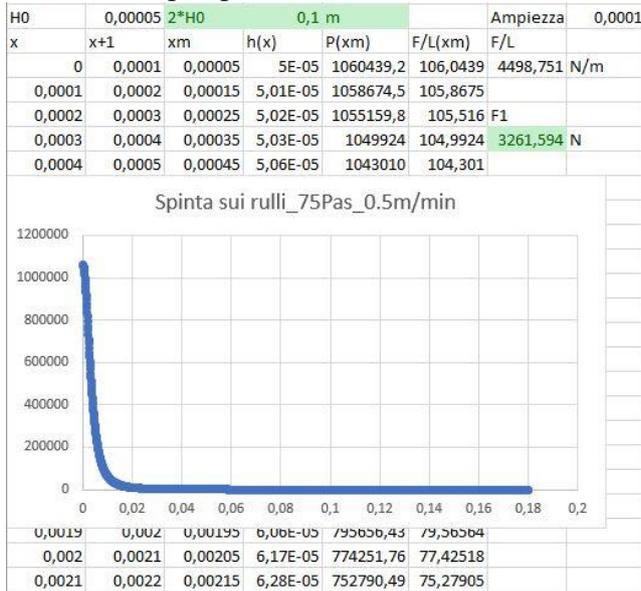
H0	5,48E-05	2*H0		0,109692 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	5,49E-05	2215354	221,5354	9842,759	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	5,49E-05	2211992	221,1992			
0,0002	0,0003	0,00025	5,5E-05	2205295	220,5295	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	5,52E-05	2195312	219,5312	7136	N	
0,0004	0,0005	0,00045	5,54E-05	2182119	218,2119			



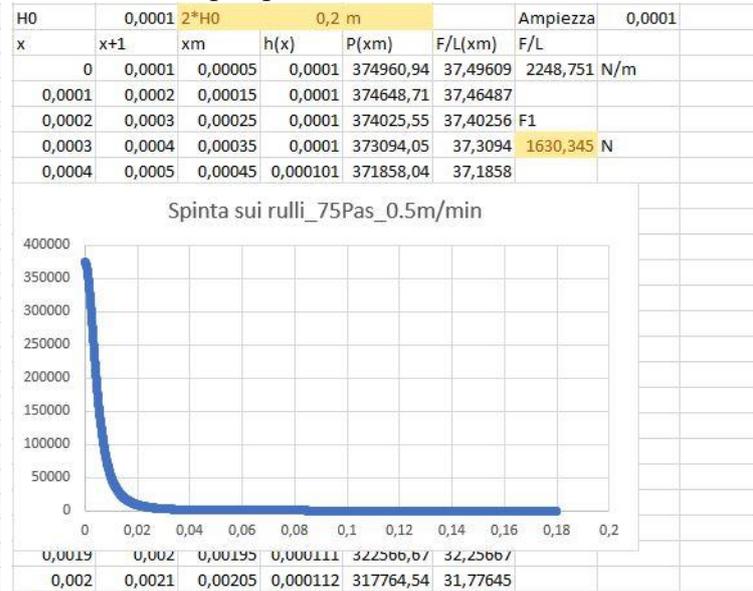
0,0019	0,002	0,00195	6,54E-05	1701342	170,1342			
0,002	0,0021	0,00205	6,65E-05	1658893	165,8893			
0,0021	0,0022	0,00215	6,77E-05	1616188	161,6188			

$\mu = 75 \text{ Pas}$        $V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$

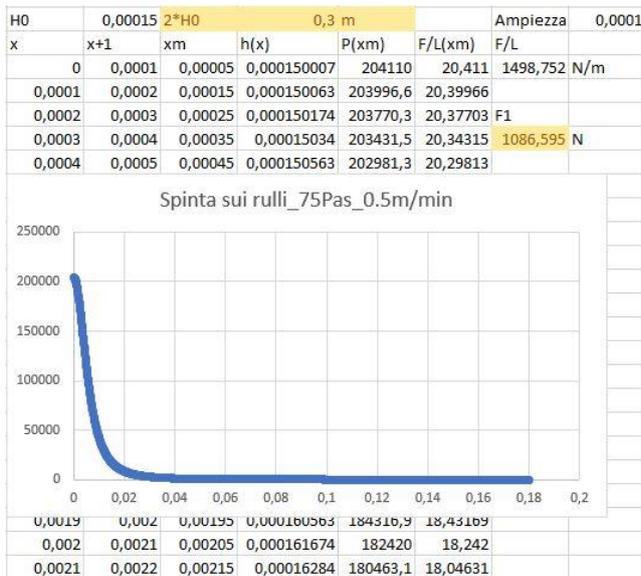
Gap sup = 0.1 mm



Gap sup = 0.2 mm

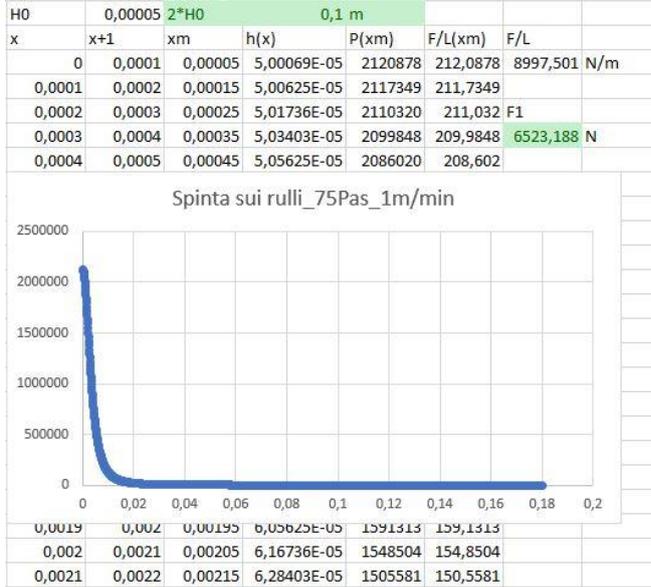


Gap sup = 0.3 mm

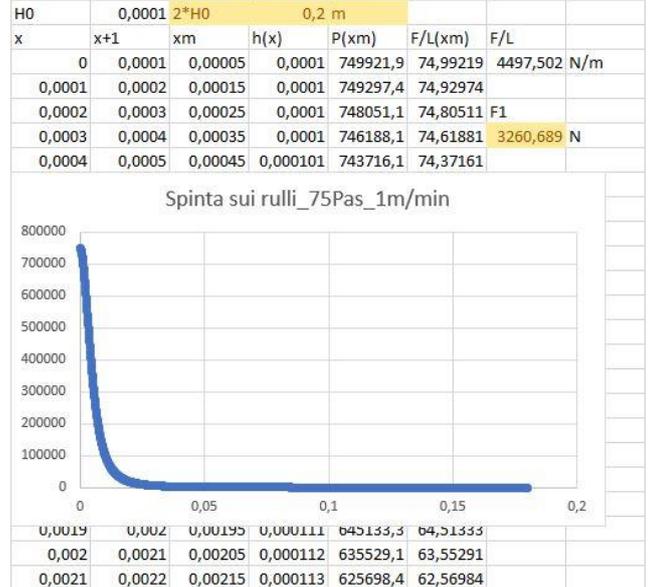


$$\mu = 75 \text{ Pas} \quad V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$$

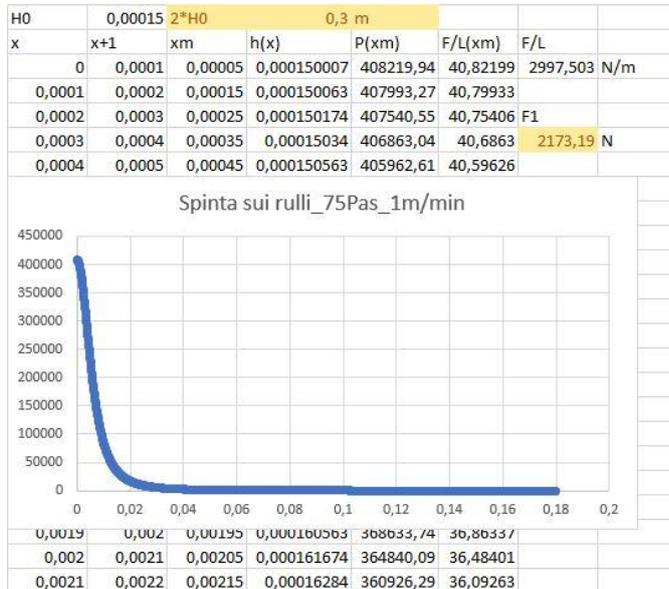
Gap sup = 0.1 mm



Gap sup = 0.2 mm



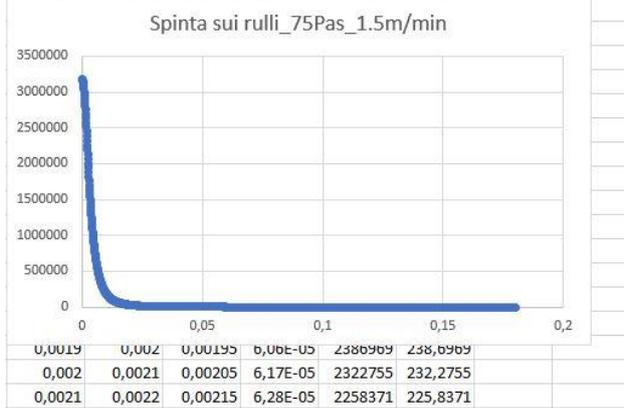
Gap sup = 0.3 mm



$\mu = 75 \text{ Pas}$        $V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

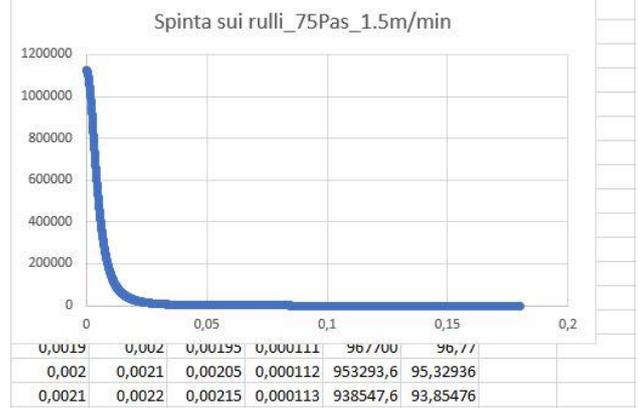
Gap sup = 0.1 mm

H0	0,00005	2*H0	0,1 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	5E-05	3181318	318,1318	13496,25	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	3176024	317,6024		
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	3165479	316,5479	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	3149772	314,9772	9784,782	N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	3129030	312,903		



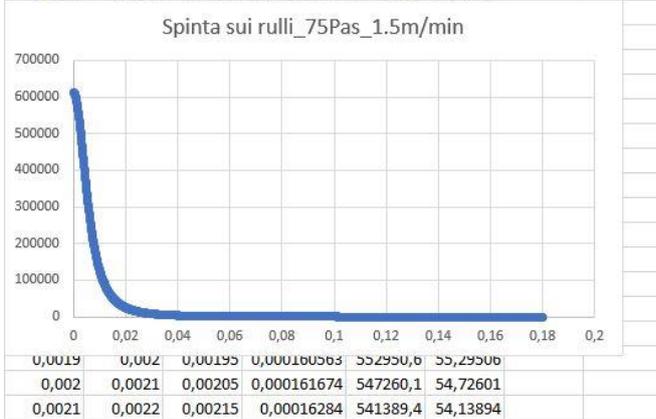
Gap sup = 0.2 mm

H0	0,0001	2*H0	0,2 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,0001	1124883	112,4883	6746,253	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	1123946	112,3946		
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	1122077	112,2077	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	1119282	111,9282	4891,034	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	1115574	111,5574		



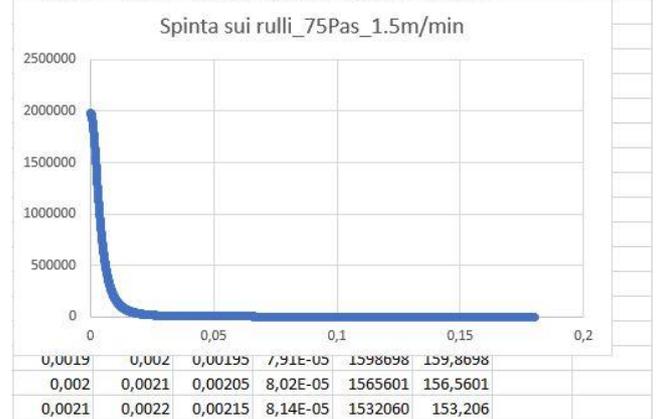
Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015	2*H0	0,3 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000150007	612329,9	61,23299	4496,255	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	611989,9	61,19899		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	611310,8	61,13108	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	610294,6	61,02946	3259,785	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	608943,9	60,89439		



Gap sup minimo

H0	6,86E-05	2*H0	0,137104 m			Ampiezza	0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	6,86E-05	1981774	198,1774	9842,759	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	6,86E-05	1979368	197,9368		
0,0002	0,0003	0,00025	6,87E-05	1974569	197,4569	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	6,89E-05	1967408	196,7408	7136	N
0,0004	0,0005	0,00045	6,91E-05	1957927	195,7927		



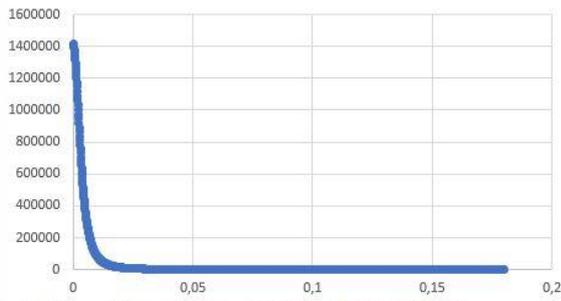
$\mu = 100 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

H0	0,00005	2*H0		0,1 m				Ampiezza	0,0001
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L			
0	0,0001	0,00005	5E-05	1413919	141,3919	5998,334	N/m		
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	1411566	141,1566				
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	1406880	140,688	F1			
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	1399899	139,9899	4348,792	N		
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	1390680	139,068				

Spinta sui rulli 100Pas\_0.5m/min

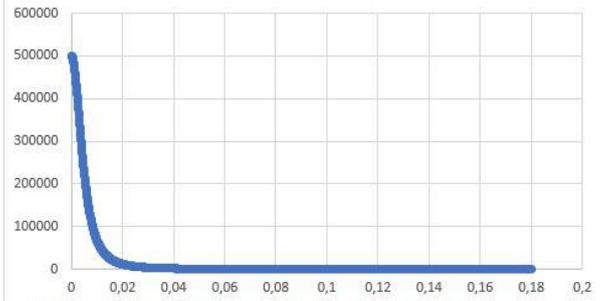


0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	1060875	106,0875				
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	1032336	103,2336				
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	1003721	100,3721				

Gap sup = 0.2 mm

H0	0,0001	2*H0		0,2 m					
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L			
0	0,0001	0,00005	0,000100007	499947,9	49,99479	2998,335	N/m		
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	499531,6	49,95316				
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	498700,7	49,87007	F1			
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	497458,7	49,74587	2173,793	N		
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	495810,7	49,58107				

Spinta sui rulli 100Pas\_0.5m/min

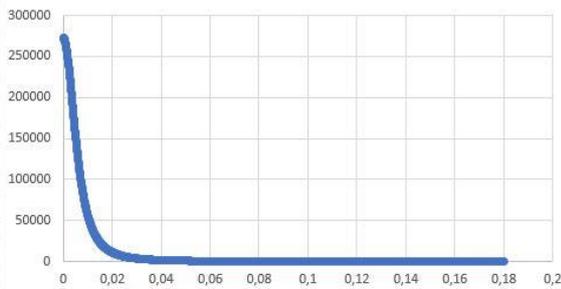


0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	430088,9	43,00889				
0,002	0,0021	0,00205	0,000111674	423686	42,3686				
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	417132,3	41,71323				

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,00015	2*H0		0,3 m					
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L			
0	0,0001	0,00005	0,000150007	272146,6	27,21466	1998,335	N/m		
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	271995,5	27,19955				
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	271693,7	27,16937	F1			
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	271242	27,1242	1448,793	N		
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	270641,7	27,06417				

Spinta sui rulli 100Pas\_0.5m/min



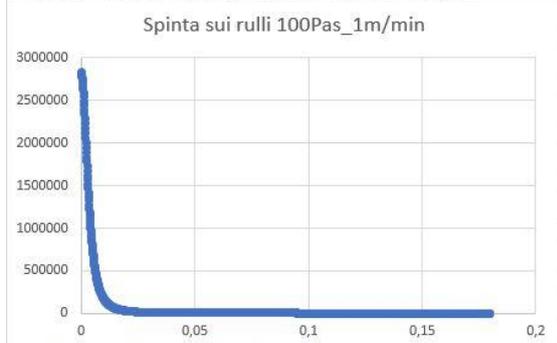
0,0019	0,002	0,00195	0,000160563	245755,8	24,57558				
0,002	0,0021	0,00205	0,000161674	243226,7	24,32267				
0,0021	0,0022	0,00215	0,00016284	240617,5	24,06175				

$\mu = 100 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

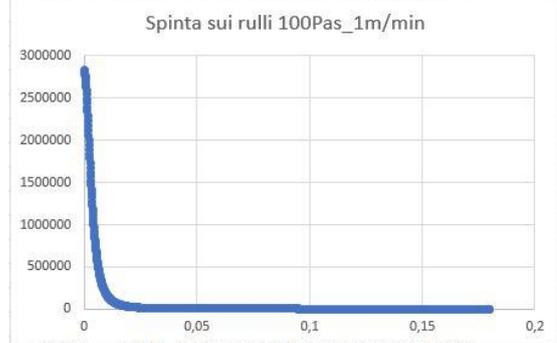
H0	0,00005	2*H0	0,1 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	5E-05	2827838	282,7838	11996,67	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	2823132	282,3132		
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	2813759	281,3759	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	2799797	279,9797	8697,584	N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	2781360	278,136		



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	2121750	212,175		
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	2064671	206,4671		
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	2007441	200,7441		

Gap sup = 0.2 mm

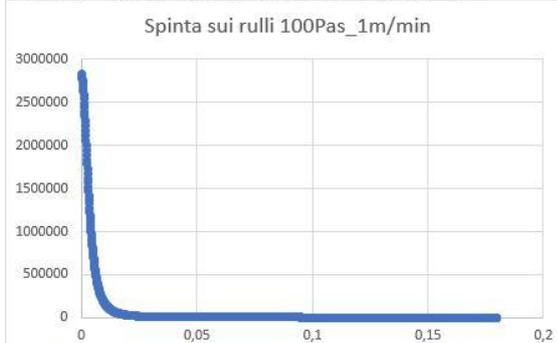
H0	0,0001	2*H0	0,2 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,0001	999895,8	99,98958	5996,669	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	999063,2	99,90632		
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	997401,5	99,74015	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	994917,5	99,49175	4347,585	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	991621,4	99,16214		



0,0019	0,002	0,00195	0,000111	860177,8	86,01778		
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	847372,1	84,73721		
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	834264,5	83,42645		

Gap sup = 0.3 mm

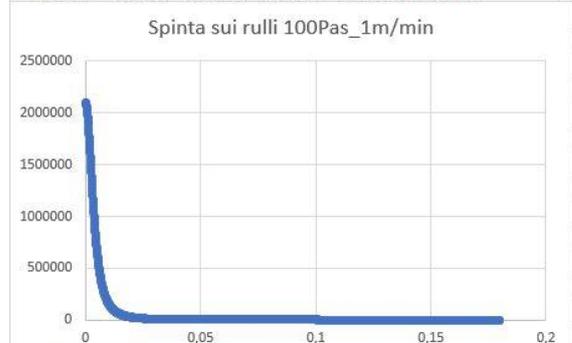
H0	0,00015	2*H0	0,3 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,00015	544293,3	54,42933	3996,671	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	543991	54,3991		
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	543387,4	54,33874	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	542484,1	54,24841	2897,586	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	541283,5	54,12835		



0,0019	0,002	0,00195	0,000161	491511,7	49,15117		
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	486453,5	48,64535		
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	481235	48,1235		

Gap sup minimo

H0	6,09E-05	2*H0	0,121876 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	6,09E-05	2101816	210,1816	9842,759	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	6,1E-05	2098945	209,8945		
0,0002	0,0003	0,00025	6,11E-05	2093223	209,3223	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	6,13E-05	2084689	208,4689	7136,001	N
0,0004	0,0005	0,00045	6,15E-05	2073401	207,3401		



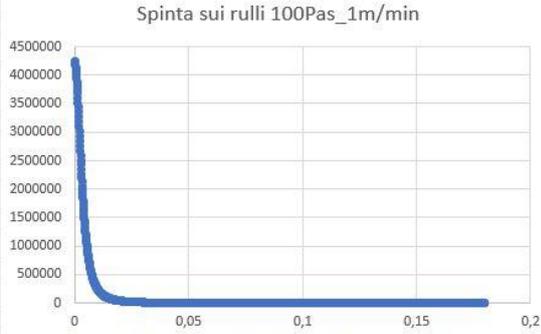
0,0019	0,002	0,00195	7,15E-05	1654007	165,4007		
0,002	0,0021	0,00205	7,26E-05	1616188	161,6188		
0,0021	0,0022	0,00215	7,38E-05	1578004	157,8004		

$\mu = 100 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

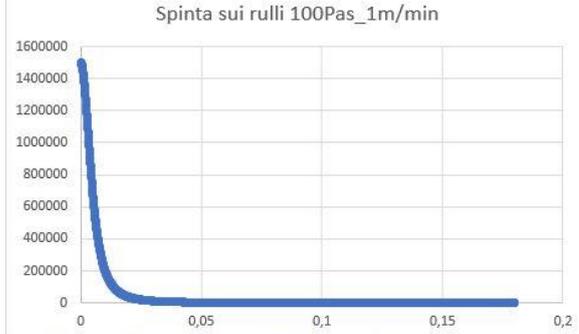
H0	0,00005	2*H0		0,1 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	5E-05	4241757	424,1757	17995	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	4234698	423,4698			
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	4220639	422,0639	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	4199696	419,9696	13046,38	N	
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	4172040	417,204			



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	3182626	318,2626			
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	3097007	309,7007			
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	3011162	301,1162			

Gap sup = 0.2 mm

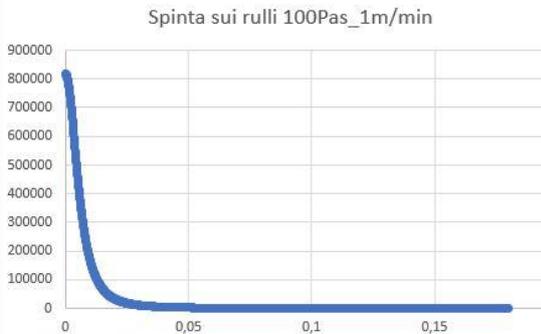
H0	0,0001	2*H0		0,2 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,000100007	1499844	149,9844	8995,004	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	1498595	149,8595			
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	1496102	149,6102	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	1492376	149,2376	6521,378	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	1487432	148,7432			



0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	1290267	129,0267			
0,002	0,0021	0,00205	0,000111674	1271058	127,1058			
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	1251397	125,1397			

Gap sup = 0.3 mm

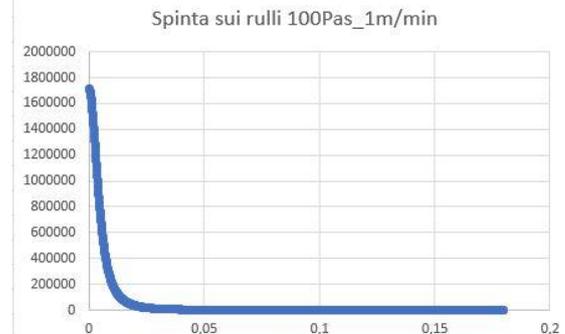
H0	0,00015	2*H0		0,3 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,000150007	816439,9	81,64399	5995,006	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,000150063	815986,5	81,59865			
0,0002	0,0003	0,00025	0,000150174	815081,1	81,50811	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015034	813726,1	81,37261	4346,38	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000150563	811925,2	81,19252			



0,0019	0,002	0,00195	0,000160563	737267,5	73,72675			
0,002	0,0021	0,00205	0,000161674	729680,2	72,96802			
0,0021	0,0022	0,00215	0,00016284	721852,6	72,18526			

Gap sup minimo

H0	9,14E-05	2*H0		0,182783 m				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	9,14E-05	1716658	171,6658	9842,759	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	9,15E-05	1715094	171,5094			
0,0002	0,0003	0,00025	9,16E-05	1711973	171,1973	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	9,17E-05	1707310	170,731	7136	N	
0,0004	0,0005	0,00045	9,2E-05	1701125	170,1125			



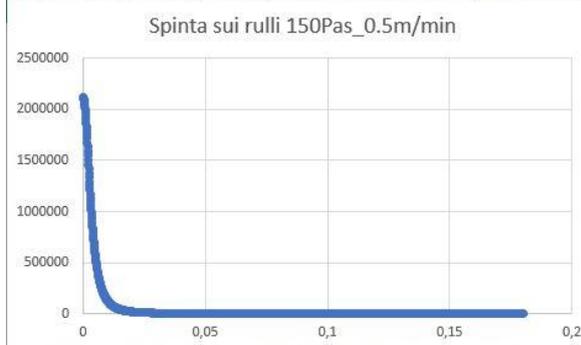
0,0019	0,002	0,00195	0,000102	1457087	145,7087			
0,002	0,0021	0,00205	0,000103	1433588	143,3588			
0,0021	0,0022	0,00215	0,000104	1409586	140,9586			

$$\mu = 150 \text{ Pas}$$

$$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$$

Gap sup = 0.1 mm

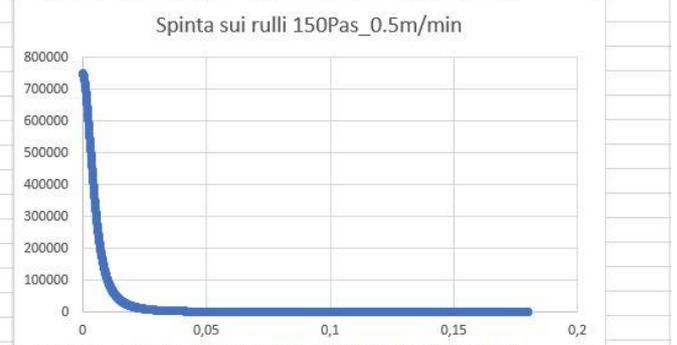
H0	0,1 mm						Ampiezza
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	5,00069E-05	2120878	212,0878	8997,501	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,00625E-05	2117349	211,7349		
0,0002	0,0003	0,00025	5,01736E-05	2110320	211,032	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	5,03403E-05	2099848	209,9848	6523,188	N
0,0004	0,0005	0,00045	5,05625E-05	2086020	208,602		



0,0019	0,002	0,00195	6,05625E-05	1591313	159,1313		
0,002	0,0021	0,00205	6,16736E-05	1548504	154,8504		
0,0021	0,0022	0,00215	6,28403E-05	1505581	150,5581		

Gap sup = 0.2 mm

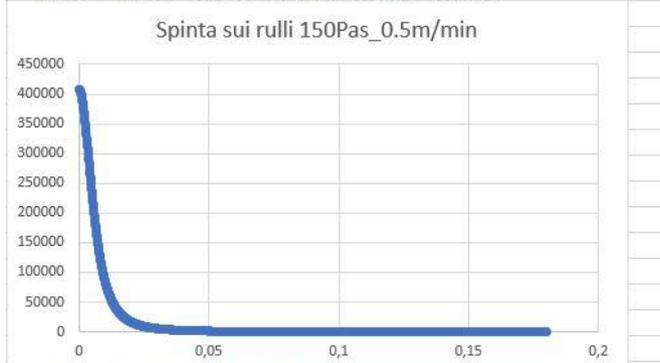
H0	0,2 mm						Ampiezza
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000100007	749921,9	74,99219	4497,502	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	749297,4	74,92974		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	748051,1	74,80511	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	746188,1	74,61881	3260,689	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	743716,1	74,37161		



0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	645133,3	64,51333		
0,002	0,0021	0,00205	0,000111674	635529,1	63,55291		
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	625698,4	62,56984		

Gap sup = 0.3 mm

H0	0,3 mm						Ampiezza
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,00015	408219,9	40,82199	2997,503	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	407993,3	40,79933		
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	407540,6	40,75406	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	406863	40,6863	2173,19	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	405962,6	40,59626		

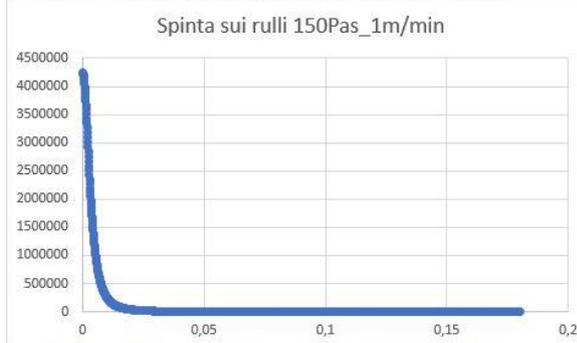


0,0019	0,002	0,00195	0,000161	368633,7	36,86337		
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	364840,1	36,48401		
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	360926,3	36,09263		

$\mu = 150 \text{ Pas}$        $V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

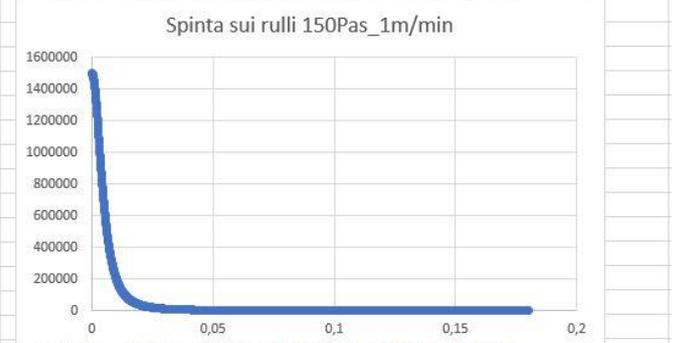
H0	0,00005	2*H0	0,1 mm					
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	5,00069E-05	4241757	424,1757	17995	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	5,00625E-05	4234698	423,4698			
0,0002	0,0003	0,00025	5,01736E-05	4220639	422,0639	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	5,03403E-05	4199696	419,9696	13046,38	N	
0,0004	0,0005	0,00045	5,05625E-05	4172040	417,204			



0,0019	0,002	0,00195	6,05625E-05	3182626	318,2626			
0,002	0,0021	0,00205	6,16736E-05	3097007	309,7007			
0,0021	0,0022	0,00215	6,28403E-05	3011162	301,1162			

Gap sup = 0.2 mm

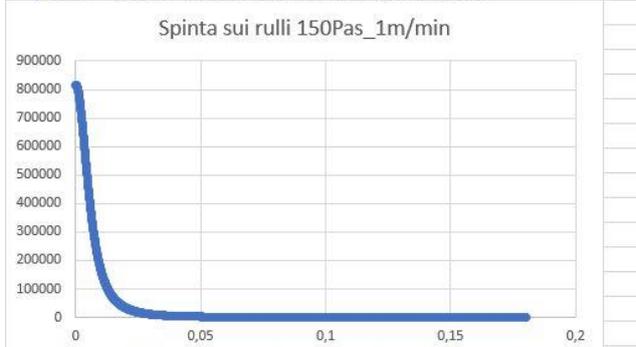
H0	0,0001	2*H0	0,2 mm					
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,000100007	1499844	149,9844	8995,004	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,000100063	1498595	149,8595			
0,0002	0,0003	0,00025	0,000100174	1496102	149,6102	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00010034	1492376	149,2376	6521,378	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000100563	1487432	148,7432			



0,0019	0,002	0,00195	0,000110563	1290267	129,0267			
0,002	0,0021	0,00205	0,000111674	1271058	127,1058			
0,0021	0,0022	0,00215	0,00011284	1251397	125,1397			

Gap sup = 0.3 mm

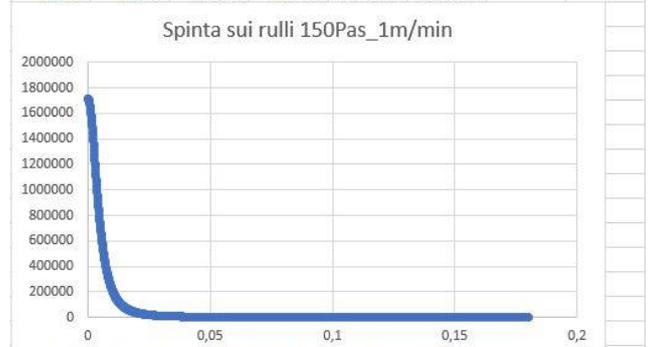
H0	0,00015	2*H0	0,3 mm					
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	0,00015	816439,9	81,64399	5995,006	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	815986,5	81,59865			
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	815081,1	81,50811	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	813726,1	81,37261	4346,38	N	
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	811925,2	81,19252			



0,0019	0,002	0,00195	0,000161	737267,5	73,72675			
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	729680,2	72,96802			
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	721852,6	72,18526			

Gap sup minimo

H0	9,14E-05	2*H0	0,182783 mm					
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L		
0	0,0001	0,00005	9,14E-05	1716658	171,6658	9842,759	N/m	
0,0001	0,0002	0,00015	9,15E-05	1715094	171,5094			
0,0002	0,0003	0,00025	9,16E-05	1711973	171,1973	F1		
0,0003	0,0004	0,00035	9,17E-05	1707310	170,731	7136	N	
0,0004	0,0005	0,00045	9,2E-05	1701124	170,1124			



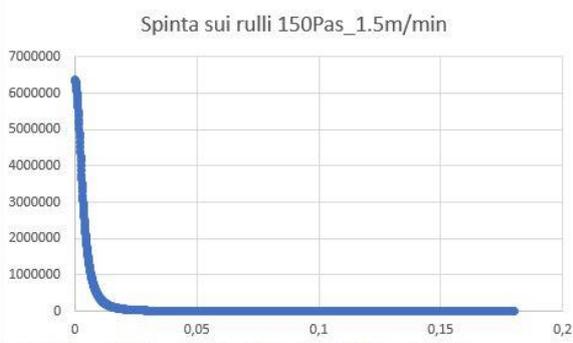
0,0019	0,002	0,00195	0,000102	1457087	145,7087			
0,002	0,0021	0,00205	0,000103	1433588	143,3588			
0,0021	0,0022	0,00215	0,000104	1409586	140,9586			

$\mu = 150 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

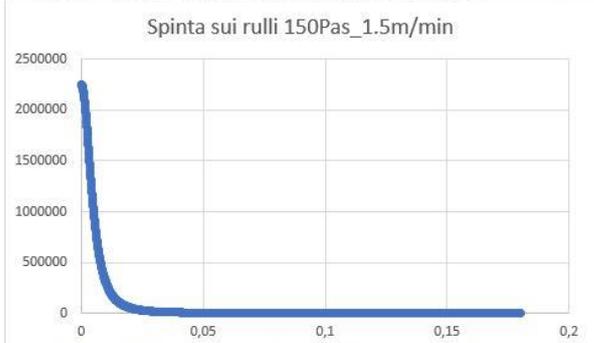
H0	0,00005	2*H0	0,1 mm				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	5E-05	6362635	636,2635	26992,5	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	6352047	635,2047		
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	6330959	633,0959	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	6299544	629,9544	19569,56	N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	6258060	625,806		



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	4773939	477,3939		
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	4645511	464,5511		
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	4516743	451,6743		

Gap sup = 0.2 mm

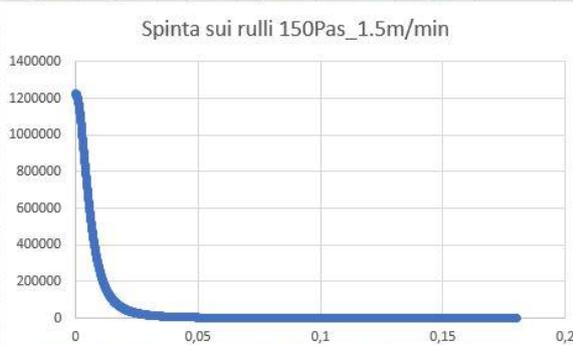
H0	0,0001	2*H0	0,2 mm				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,0001	2249766	224,9766	13492,51	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	2247892	224,7892		
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	2244153	224,4153	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	2238564	223,8564	9782,067	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	2231148	223,1148		



0,0019	0,002	0,00195	0,000111	1935400	193,54		
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	1906587	190,6587		
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	1877095	187,7095		

Gap sup = 0.3 mm

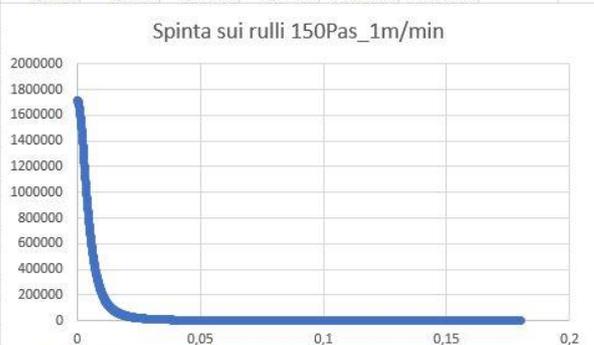
H0	0,00015	2*H0	0,3 mm				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,00015	1224660	122,466	8992,509	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	1223980	122,398		
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	1222622	122,2622	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	1220589	122,0589	6519,569	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	1217888	121,7888		



0,0019	0,002	0,00195	0,000161	1105901	110,5901		
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	1094520	109,452		
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	1082779	108,2779		

Gap sup minimo

H0	9,14E-05	2*H0	0,182783 mm				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	9,14E-05	1716658	171,6658	9842,759	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	9,15E-05	1715094	171,5094		
0,0002	0,0003	0,00025	9,16E-05	1711973	171,1973	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	9,17E-05	1707310	170,731	7136	N
0,0004	0,0005	0,00045	9,2E-05	1701124	170,1124		

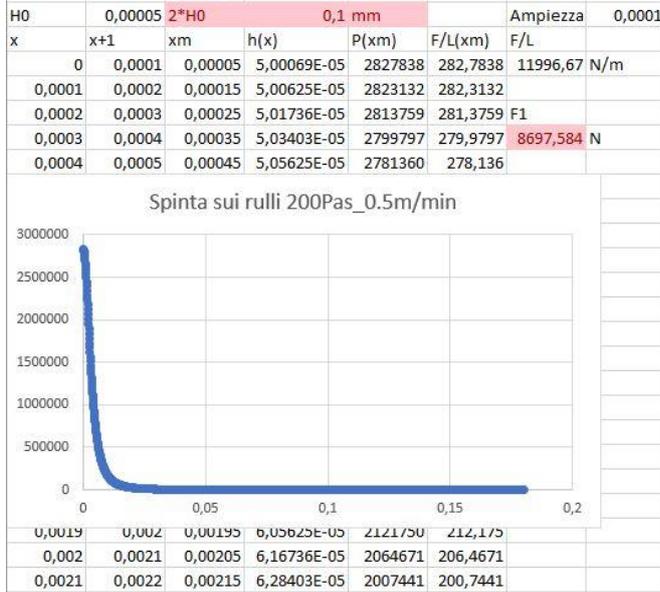


0,0019	0,002	0,00195	0,000102	1457087	145,7087		
0,002	0,0021	0,00205	0,000103	1433588	143,3588		
0,0021	0,0022	0,00215	0,000104	1409586	140,9586		

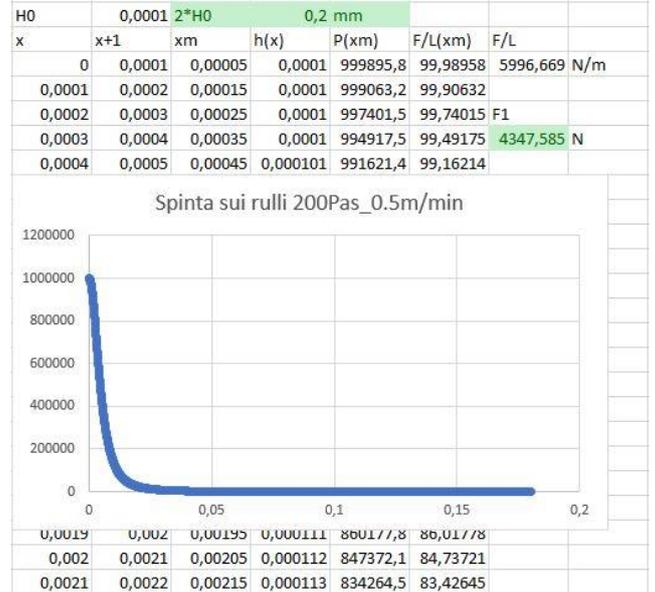
$\mu = 200 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$

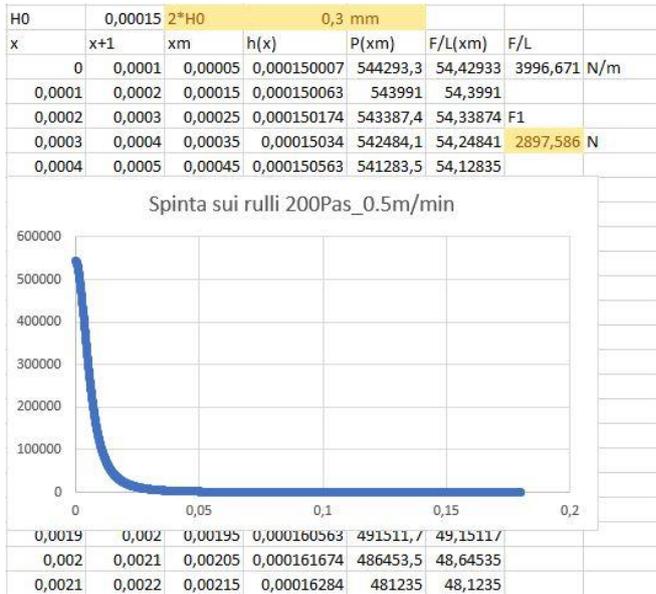
Gap sup = 0.1 mm



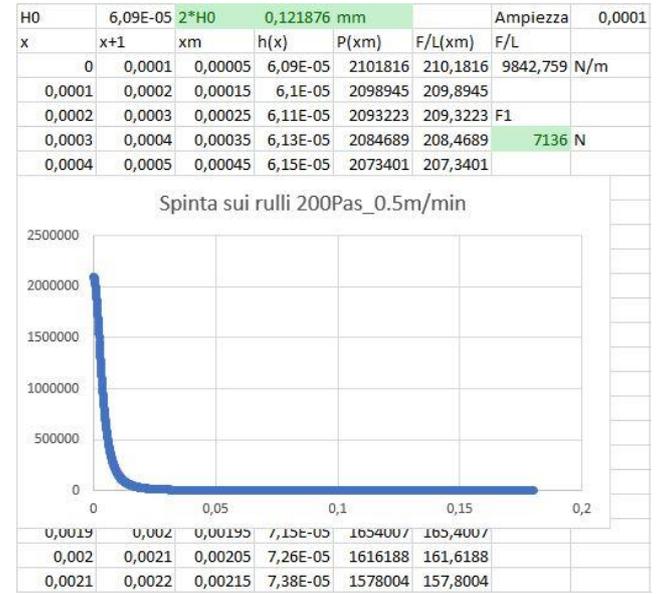
Gap sup = 0.2 mm



Gap sup = 0.3 mm



Gap sup minimo

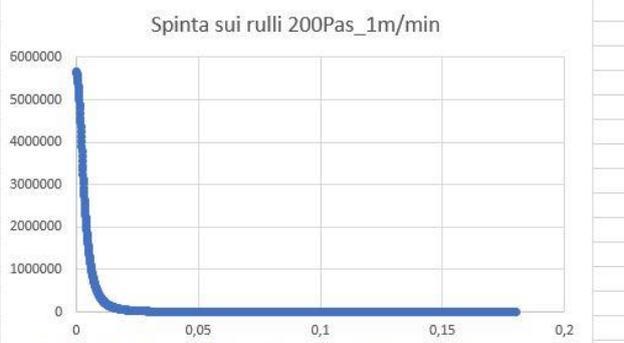


$\mu = 200 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

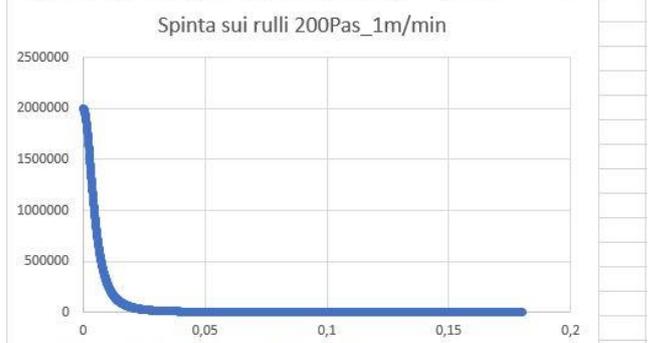
H0	0,00005	2*H0	0,1 mm				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	5E-05	5655676	565,5676	23993,34	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	5646264	564,6264		
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	5627519	562,7519	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	5595955	559,9595	17395,17	N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	5562720	556,272		



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	4243501	424,3501		
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	4129343	412,9343		
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	4014883	401,4883		

Gap sup = 0.2 mm

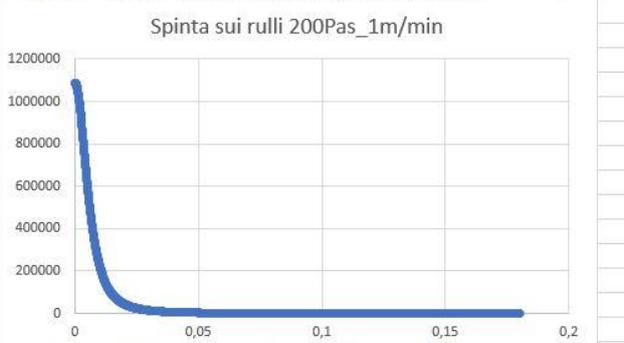
H0	0,0001	2*H0	0,2 mm				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,0001	1999791,7	199,9792	11993,34	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	1998126,5	199,8126		
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	1994802,9	199,4803	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	1989834,9	198,9835	8695,171	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	1983242,9	198,3243		



0,0019	0,002	0,00195	0,000111	1720355,6	172,0356		
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	1694744,2	169,4744		
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	1668529,1	166,8529		

Gap sup = 0.3 mm

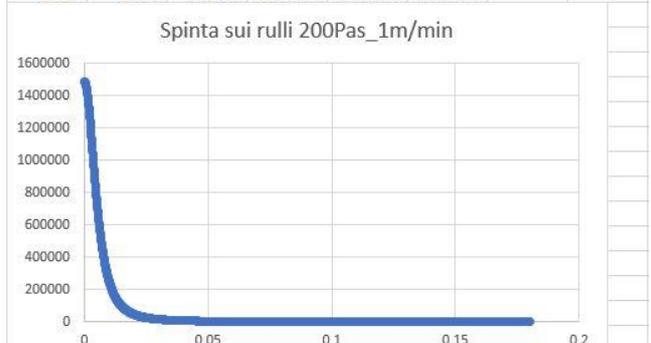
H0	0,00015	2*H0	0,3 mm				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,00015	1088587	108,8587	7993,342	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	1087982	108,7982		
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	1086775	108,6775	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	1084968	108,4968	5795,173	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	1082567	108,2567		



0,0019	0,002	0,00195	0,000161	983023,3	98,30233		
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	972906,9	97,29069		
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	962470,1	96,24701		

Gap sup minimo

H0	0,000122	2*H0	0,243669 mm				
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L	
0	0,0001	0,00005	0,000122	1487089	148,7089	9842,759	N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000122	1486072	148,6072		
0,0002	0,0003	0,00025	0,000122	1484043	148,4043	F1	
0,0003	0,0004	0,00035	0,000122	1481007	148,1007	7136	N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000122	1476975	147,6975		



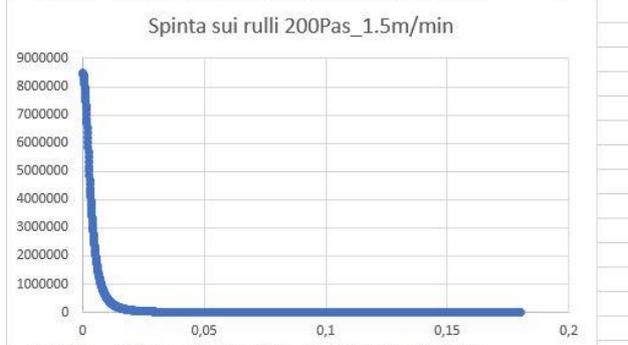
0,0019	0,002	0,00195	0,000132	1312841	131,2841		
0,002	0,0021	0,00205	0,000134	1296487	129,6487		
0,0021	0,0022	0,00215	0,000135	1279676	127,9676		

$\mu = 200 \text{ Pas}$

$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

Gap sup = 0.1 mm

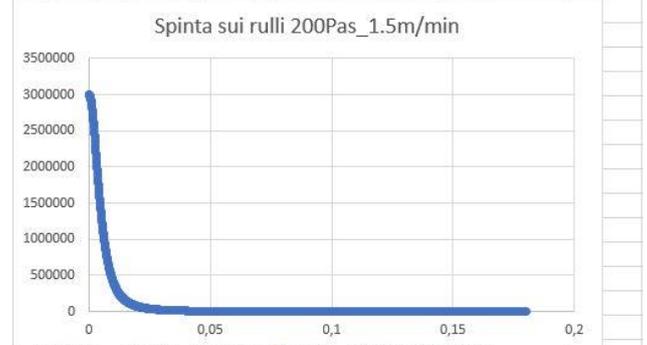
H0	0,00005	2*H0	0,1 mm			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	5E-05	8483514	848,3514	35990 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	5,01E-05	8469396	846,9396	
0,0002	0,0003	0,00025	5,02E-05	8441278	844,1278	F1
0,0003	0,0004	0,00035	5,03E-05	8399392	839,9392	26092,75 N
0,0004	0,0005	0,00045	5,06E-05	8344080	834,408	



0,0019	0,002	0,00195	6,06E-05	6365251	636,5251	
0,002	0,0021	0,00205	6,17E-05	6194014	619,4014	
0,0021	0,0022	0,00215	6,28E-05	6022324	602,2324	

Gap sup = 0.2 mm

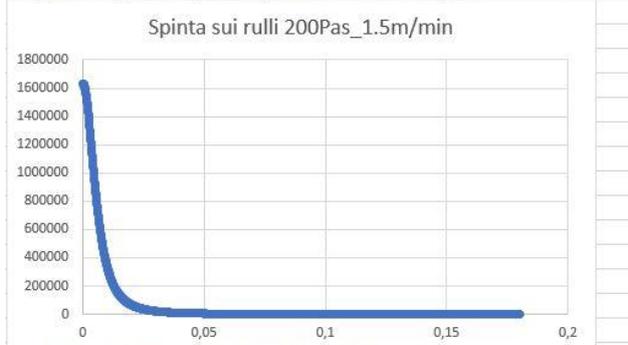
H0	0,0001	2*H0	0,2 mm			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,0001	2999688	299,9688	17990,01 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,0001	2997190	299,719	
0,0002	0,0003	0,00025	0,0001	2992204	299,2204	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,0001	2984752	298,4752	13042,76 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000101	2974864	297,4864	



0,0019	0,002	0,00195	0,000111	2580533	258,0533	
0,002	0,0021	0,00205	0,000112	2542116	254,2116	
0,0021	0,0022	0,00215	0,000113	2502794	250,2794	

Gap sup = 0.3 mm

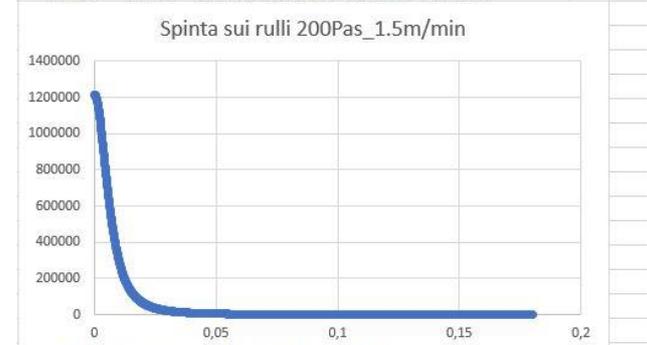
H0	0,00015	2*H0	0,3 mm			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,00015	1632880	163,288	11990,01 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,00015	1631973	163,1973	
0,0002	0,0003	0,00025	0,00015	1630162	163,0162	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,00015	1627452	162,7452	8692,759 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000151	1623850	162,385	



0,0019	0,002	0,00195	0,000161	1474535	147,4535	
0,002	0,0021	0,00205	0,000162	1459360	145,936	
0,0021	0,0022	0,00215	0,000163	1443705	144,3705	

Gap sup minimo

H0	0,000183	2*H0	0,36538 mm			
x	x+1	xm	h(x)	P(xm)	F/L(xm)	F/L
0	0,0001	0,00005	0,000183	1214852	121,4852	9842,759 N/m
0,0001	0,0002	0,00015	0,000183	1214298	121,4298	
0,0002	0,0003	0,00025	0,000183	1213192	121,3192	F1
0,0003	0,0004	0,00035	0,000183	1211535	121,1535	7136 N
0,0004	0,0005	0,00045	0,000183	1209332	120,9332	



0,0019	0,002	0,00195	0,000193	1116690	111,669	
0,002	0,0021	0,00205	0,000194	1107129	110,7129	
0,0021	0,0022	0,00215	0,000196	1097234	109,7234	

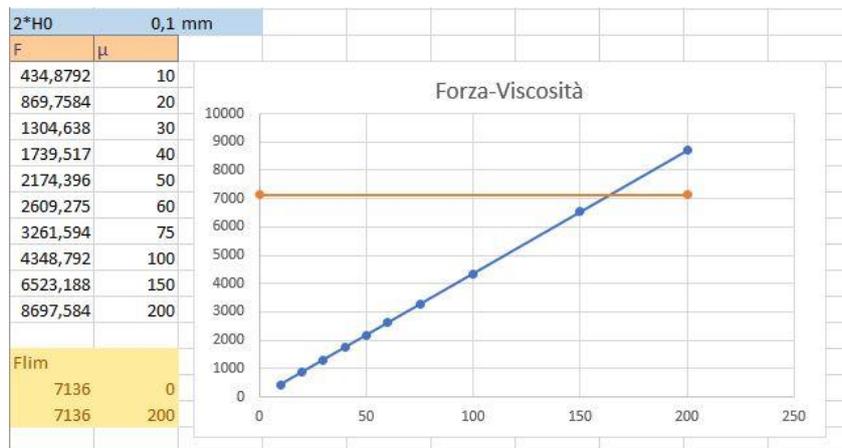
### Analisi risultati

Per ogni diversa condizione abbiamo riportato la distribuzione di pressione sui rulli. Per ogni diversa viscosità e velocità abbiamo determinato la forza che si generava con 3 diversi gap sup individuando inoltre il gap sup minimo che garantirebbe una forza generata inferiore a 7136 N.

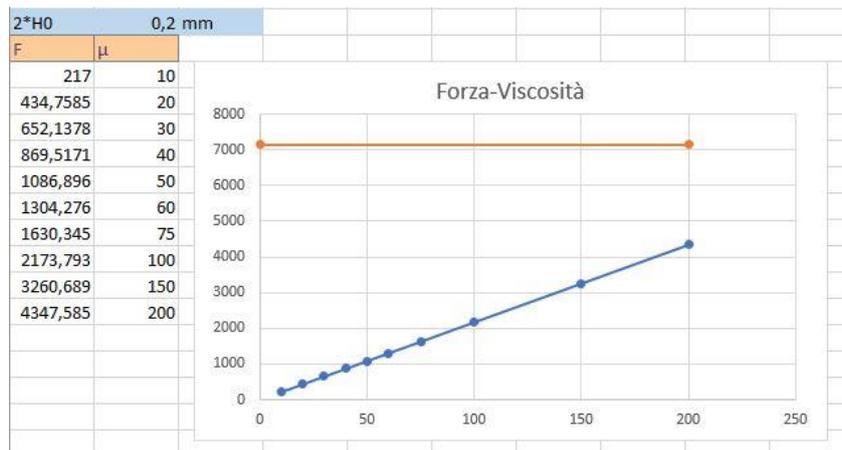
Per semplificare la lettura dei dati abbiamo rappresentato questi risultati su 9 grafici Forza – Viscosità per diversi gap e diverse velocità.

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$ :

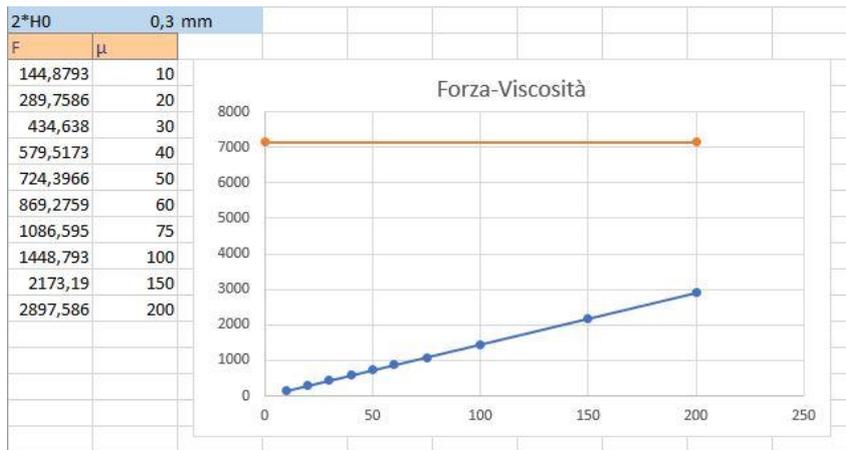
Gap sup = 0.1 mm



Gap sup = 0.2 mm



Gap sup = 0.3 mm



Con questa velocità sono processabili liquidi con viscosità fino a 160/170 Pas al gap più piccolo, mentre con gap sup 0.2 e 0.3 i limiti di viscosità sono molto più alti.

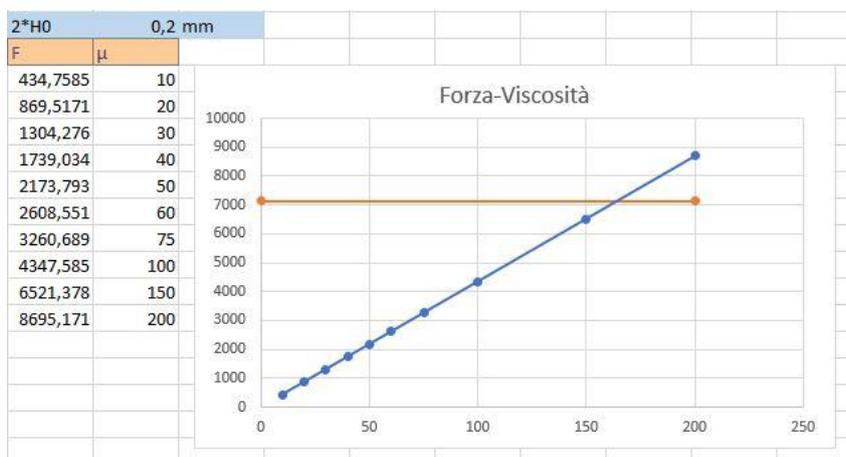
Considerando che i valori ottimi di viscosità a cui una resina viene processata sono di circa 25 Pas non si ha alcun tipo di problema a filmare con questa velocità.

$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$

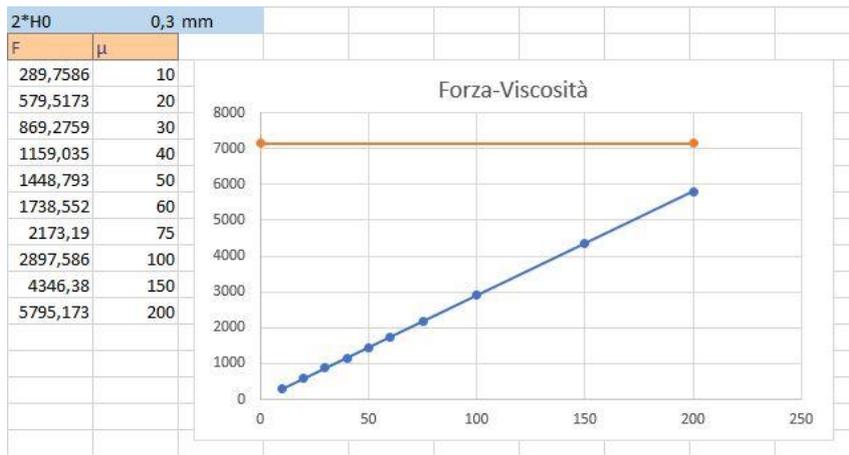
Gap sup = 0.1 mm



Gap sup = 0.2 mm



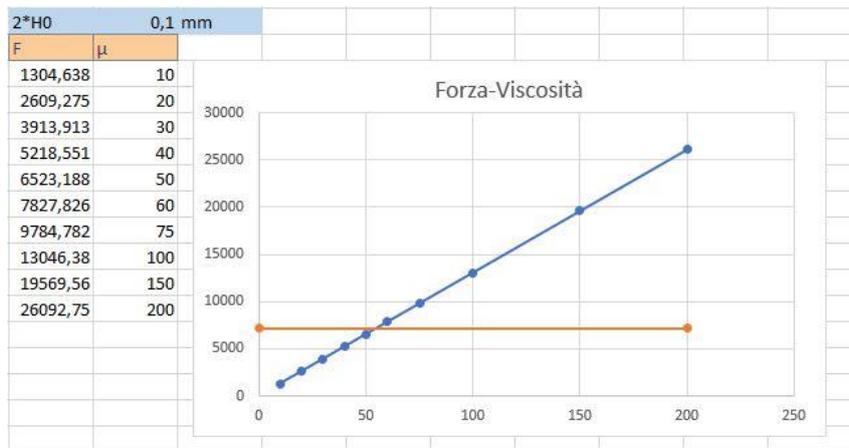
Gap sup = 0.3 mm



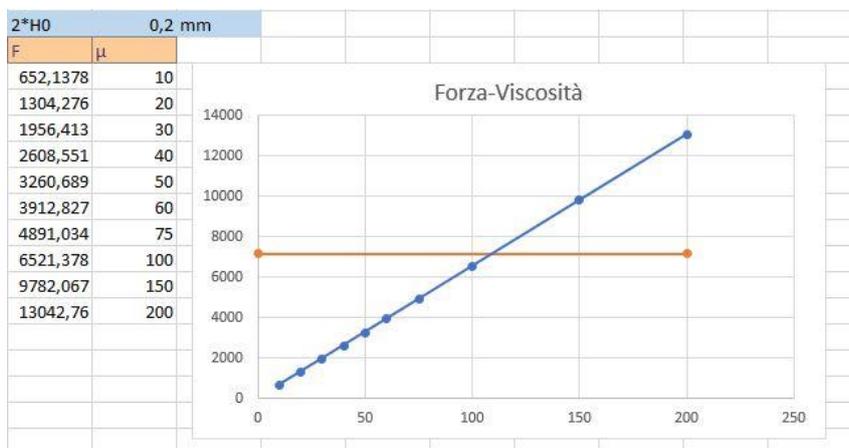
Con  $V_{master}$  pari a 1 m/min la retta che rappresenta l'andamento della forza ha una pendenza maggiore, è facilmente verificabile però che anche con questa  $V_{master}$  non ci sono problemi a processare resine che hanno viscosità intorno ai 25 Pas.

$V_{master} = 1.5$  m/min

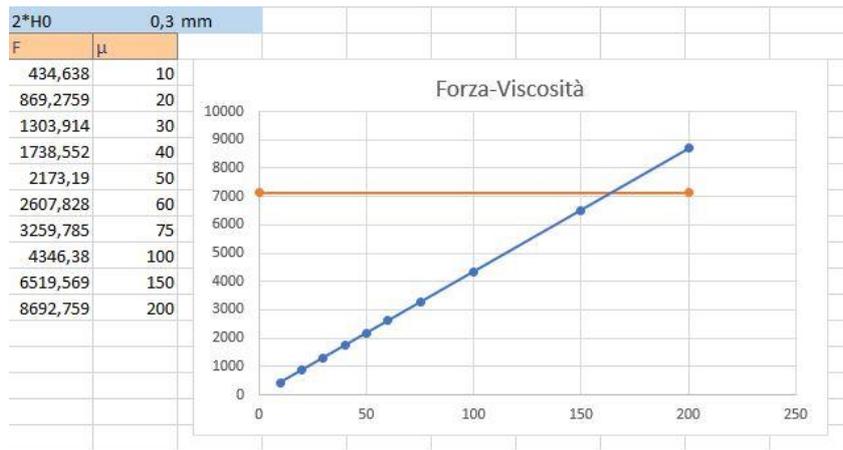
Gap sup = 0.1 mm



Gap sup = 0.2 mm



Gap sup = 0.3 mm



In questo ultimo caso la retta della forza ha una pendenza maggiore rispetto i precedenti. Anche questa volta però le forze generate dall'utilizzo di una resina con viscosità pari a 25 Pas sono ben al di sotto alla forza limite di 7136 N

Questa analisi teorica ci ha quindi permesso di determinare la forza risultante generata dal passaggio della resina tra i rulli per ogni diversa combinazione di  $V_{master}$  – viscosità – gap sup e come questi parametri influenzino singolarmente il suo valore.

Ovviamente come per la pressione, l'intensità della forza risultante aumenta con l'aumentare della viscosità e della  $V_{master}$  mentre diminuisce all'aumentare del gap sup.

Considerando le viscosità tipiche di filmatura e i risultati ottenuti possiamo affermare che la resinatrice è in grado di operare senza alcun rischio anche nelle più restringenti condizioni di gap sup e  $V_{master}$  imponibili. In tutti i casi riportati infatti la forza che si genera con viscosità di 25 Pas è sempre molto inferiore al limite tecnologico di 7136 N.

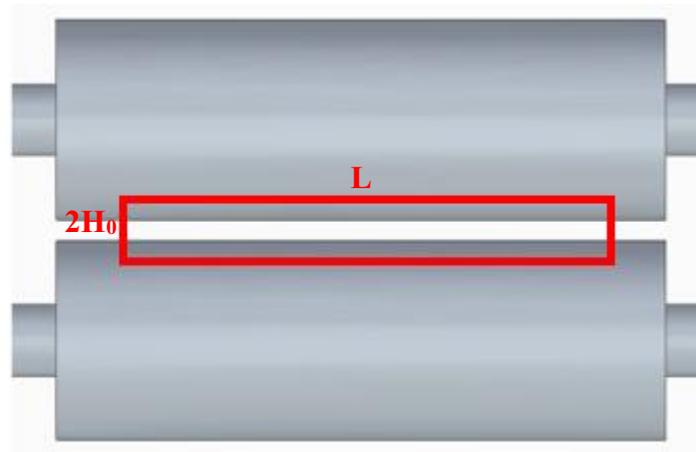
## 1.2 Modello teorico di deposizione della resina

Dopo aver effettuato la verifica meccanica della macchina abbiamo cercato di ottenere un modello teorico che ci fornisse la grammatura della resina depositata al variare di  $V_{master}$ , gap sup e  $V_{lin}$ .

Il modello più logico basa il proprio funzionamento sul calcolo della portata massica della resina. La portata massica è una grandezza fisica che descrive la quantità di massa che attraversa una determinata sezione nell'unità di tempo. Conoscendo quindi la portata e il tempo di durata del processo, si ricava la massa della resina depositata.

Per ottenere un modello che valesse per tutti i diversi parametri ottenibili ci siamo aiutati con un foglio di calcolo excel dove tutti i parametri sono modificabili.

Il modello è stato così sviluppato: la sezione attraverso la quale si verifica il passaggio della resina è rappresentata dallo spazio presente tra i due rulli della calandra di impregnazione. Sappiamo che la luce presente tra questi è di forma rettangolare con altezza pari alla distanza delle paratie e base pari al gap sup indicato con  $2H_0$ .



L'area della sezione sarà quindi:

$$A = 2H_0 * l$$

Moltiplicando quest'area per la  $V_{master}$  otteniamo quella che è la portata volumetrica:

$$\dot{V} = A * V_{master}$$

Per ottenere la portata massica si deve infine moltiplicare la portata volumetrica per la densità della resina processata  $\rho$ :

$$\dot{m} = \dot{V} * \rho$$

Moltiplicando la portata massica per il tempo di durata del processo otteniamo la massa della resina uscita dalla calandra di impregnazione.

La grammatura è espressa in g/mq. Per ottenere questo dato è necessario determinare dopo quanto tempo la macchina avrà processato 1mq di carta. Questo dipende dalla larghezza di deposizione  $L$  e dalla velocità di rotazione dei rulli  $V_{master}$ :

$$t = \frac{1}{L * V_{master}}$$

In questo modo abbiamo ottenuto un modello in grado di prevedere la grammatura ottenibile impostando tutti i vari parametri.

Vengono riportati di seguito i risultati ottenuti dal modello teorico con i diversi parametri che sono stati poi analizzati nella fase sperimentale per verificarne la validità.

$$\text{Gap sup} = 0.1 \text{ mm}$$

$$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$$

Dati							
Gap sup	0,1 mm	0,0001 m		t		2 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	0,5 m/min			Area da cc		1 m <sup>2</sup>	
L	1 m						
Portata vc	Portata massica		Grammatura				
0,00005	60 g/min		120 g/m <sup>2</sup>				

$$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$$

Dati							
Gap sup	0,1 mm	0,0001 m		t		1 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	1 m/min			Area da cc		1 m <sup>2</sup>	
L	1 m						
Portata vc	Portata massica		Grammatura				
0,0001	120 g/min		120 g/m <sup>2</sup>				

$$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$$

Dati							
Gap sup	0,1 mm	0,0001 m		t		0,666667 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	1,5 m/min			Area da cc		1 m <sup>2</sup>	
L	1 m						
Portata vc	Portata massica		Grammatura				
0,00015	180 g/min		120 g/m <sup>2</sup>				

Gap sup = 0.2 mm

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$

Dati							
Gap sup	0,2 mm	0,0002 m			t		2 min/m <sup>2</sup>
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	0,5 m/min				Area da cc		1 m <sup>2</sup>
L	1 m						
Portata vc	Portata massica			Grammatura			
0,0001	120 g/min			240 g/m <sup>2</sup>			

$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$

Dati							
Gap sup	0,2 mm	0,0002 m			t		1 min/m <sup>2</sup>
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	1 m/min				Area da cc		1 m <sup>2</sup>
L	1 m						
Portata vc	Portata massica			Grammatura			
0,0002	240 g/min			240 g/m <sup>2</sup>			

$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

Dati							
Gap sup	0,2 mm	0,0002 m			t	0,666667	min/m <sup>2</sup>
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	1,5 m/min				Area da cc		1 m <sup>2</sup>
L	1 m						
Portata vc	Portata massica			Grammatura			
0,0003	360 g/min			240 g/m <sup>2</sup>			

Gap sup = 0.3 mm

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$

Dati							
Gap sup	0,3 mm	0,0003 m		t		2 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	0,5 m/min			Area da cc		1 m <sup>2</sup>	
L	1 m						
Portata vc	Portata massica		Grammatura				
0,00015	180 g/min		360 g/m <sup>2</sup>				

$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$

Dati							
Gap sup	0,3 mm	0,0003 m		t		1 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	1 m/min			Area da cc		1 m <sup>2</sup>	
L	1 m						
Portata vc	Portata massica		Grammatura				
0,0003	360 g/min		360 g/m <sup>2</sup>				

$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$

Dati							
Gap sup	0,3 mm	0,0003 m		t		0,666667 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	1,5 m/min			Area da cc		1 m <sup>2</sup>	
L	1 m						
Portata vc	Portata massica		Grammatura				
0,00045	540 g/min		360 g/m <sup>2</sup>				

Gap sup = 0.4 mm

$V_{\text{master}} = 0.5 \text{ m/min}$

Dati							
Gap sup	0,4 mm	0,0004 m		t		2 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	0,5 m/min			Area da cc		1 m <sup>2</sup>	
L	1 m						
Portata vc	Portata massica		Grammatura				
0,0002	240 g/min		480 g/m <sup>2</sup>				

$$V_{\text{master}} = 1 \text{ m/min}$$

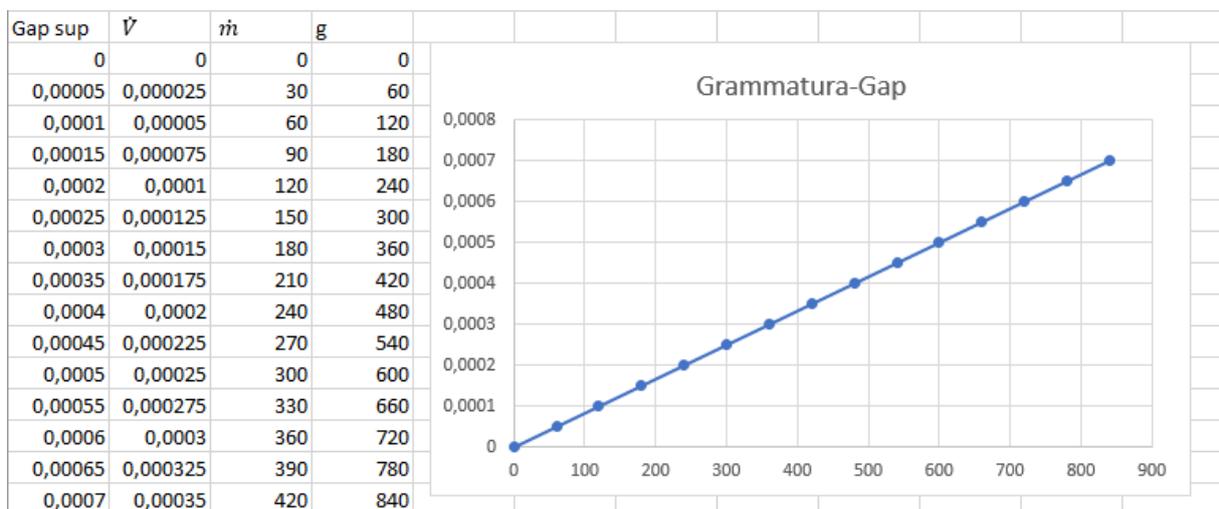
Dati							
Gap sup	0,4 mm	0,0004 m		t		1 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
V <sub>master</sub>	1 m/min			Area da cc		1 m <sup>2</sup>	
L	1 m						
Portata vc	Portata massica		Grammatura				
0,0004	480 g/min		480 g/m <sup>2</sup>				

$$V_{\text{master}} = 1.5 \text{ m/min}$$

Dati							
Gap sup	0,4 mm	0,0004 m		t		0,666667 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
V <sub>master</sub>	1,5 m/min			Area da cc		1 m <sup>2</sup>	
L	1 m						
Portata vc	Portata massica		Grammatura				
0,0006	720 g/min		480 g/m <sup>2</sup>				

I risultati ottenuti a livello teorico mostrano che la grammatura ottenibile dipende esclusivamente dal gap sup. Mentre aumentando la  $V_{\text{master}}$  semplicemente diminuisce il tempo necessario a processare 1 mq di carta.

Abbiamo quindi riportato il modello Grammatura – Gap sup graficamente.



Il modello teorico ricavato è *lineare*. Questo risultato, se verificato, assumerebbe una notevole importanza in quanto permetterebbe di prevedere il gap da imporre per ottenere una qualsiasi grammatura.

### 1.3 Modello reale deposizione resina

Le prove sperimentali eseguite, descritte nel capitolo *prove sperimentali*, ci hanno permesso di raccogliere circa un centinaio di misurazioni delle grammature ottenute con diversi parametri di filmatura. Per motivi di riservatezza non è possibile riportare tutti i risultati ottenuti ma solo quelli relativi ad una sola configurazione di parametri, che ci hanno comunque consentito la costruzione di un modello, valido ovviamente solo per quei dati.

#### $V_{master}$ – Grammatura

I primi risultati mostrano l'influenza della  $V_{master}$  sulla grammatura.

Abbiamo osservato la differenza di grammatura a parità di gap sup, gap inf e  $V_{lin}$  variando esclusivamente la  $V_{master}$ :

Altezza filmatura [mm]	GAP Sup [mm] rullo – ru	GAP Inf [mm] meato	Roll temperatu [°C]	viscosità [Pa*s]	$V_{master}$ [m/min]	$V_{lin}$ [%]	totale [g]	carta [g]	resina o prepre [g]	grammatura [g/m <sup>2</sup> ]	grammatura me [g/m <sup>2</sup> ]
800	0,2	0,1	83	23	1	100	14,6	5,54	3,52	78,22	
800	0,2	0,1	83	23	1	100	14,62	5,55	3,52	78,22	
800	0,2	0,1	83	23	1	100	14,64	5,57	3,5	77,78	
800	0,2	0,1	83	23	1	100	14,77	5,58	3,61	80,22	78,61
800	0,2	0,1	83	23	1,5	100	14,58	5,54	3,5	77,78	
800	0,2	0,1	83	23	1,5	100	14,63	5,54	3,56	79,11	
800	0,2	0,1	83	23	1,5	100	14,64	5,56	3,52	78,22	
800	0,2	0,1	83	23	1,5	100	14,72	5,59	3,54	78,67	78,44

Come mostrato dai dati raccolti la  $V_{master}$  non influenza in alcun modo la grammatura ottenibile. I pochi decimi di differenza sono infatti attribuibili a fenomeni stocastici intrinseci al processo.

La grammatura quindi non dipende dalla  $V_{master}$  proprio come avevamo previsto nel nostro modello teorico.

#### $V_{lin}$ – Grammatura

Un altro parametro che influenza la grammatura, e che non abbiamo considerato nel modello teorico è la  $V_{lin}$  espressa come percentuale della  $V_{master}$ .

Riportiamo di seguito i dati ottenuti imponendo gap sup, gap inf e  $V_{master}$  per due diverse  $V_{lin}$ :

Altezza filmatura [mm]	GAP Sup [mm] rullo – ru	GAP Inf [mm] meato	Roll temperatu [°C]	viscosità [Pa*s]	$V_{master}$ [m/min]	$V_{lin}$ [%]	totale [g]	carta [g]	resina o prepre [g]	grammatura [g/m <sup>2</sup> ]	grammatura me [g/m <sup>2</sup> ]
800	0,2	0,1	83	23	1	80	14,57	5,57	3,43	76,22	
800	0,2	0,1	83	23	1	80	14,31	5,55	3,21	71,33	
800	0,2	0,1	83	23	1	80	14,48	5,55	3,38	75,11	
800	0,2	0,1	83	23	1	80	14,7	5,57	3,56	79,11	75,44
800	0,2	0,1	83	23	1	100	14,6	5,54	3,52	78,22	
800	0,2	0,1	83	23	1	100	14,62	5,55	3,52	78,22	
800	0,2	0,1	83	23	1	100	14,64	5,57	3,5	77,78	
800	0,2	0,1	83	23	1	100	14,77	5,58	3,61	80,22	78,61

Per le due diverse  $V_{lin}$  si hanno variazioni di grammatura dell'ordine di qualche grammo. Nel caso specifico un aumento della  $V_{lin}$  di 0.5 m/min genera un incremento di circa 3 g/mq.

Il fatto che la  $V_{lin}$  influenzi la grammatura finale del film nonostante non fosse stata presa in considerazione nella costruzione del nostro modello teorico era facilmente prevedibile. Infatti, la  $V_{lin}$  non fa variare la portata massica in uscita dalla calandra di impregnazione, ma la velocità con cui la carta passa sotto tale calandra. Se la carta ha una velocità maggiore rispetto a quella del rullo di deposizione inevitabilmente si avrà una minore quantità della resina depositata per ogni metro quadro e quindi una diminuzione della grammatura.

Variare la  $V_{lin}$  può quindi essere utile per variare la grammatura di qualche grammo quando siamo abbastanza vicini ai valori desiderati.

Modificare la  $V_{lin}$  ad una percentuale maggiore o minore rispetto alla  $V_{master}$  porta però alcune conseguenze sulla qualità del film.

Se la  $V_{lin}$  è molto maggiore della  $V_{master}$  la quantità di resina in uscita dalla calandra di impregnazione non sarà sufficiente a formare un film pieno ed uniforme per tutta la superficie della carta e quindi si avranno dei vuoti di resina nel film.

Al contrario, se la  $V_{lin}$  è molto minore della  $V_{master}$  la resina in uscita dalla calandra di impregnazione sarà maggiore di quella necessaria e si formerà un labbro di resina in eccesso in corrispondenza del gap inf. La quantità eccessiva porta alla formazione di lunghi filamenti nella zona di uscita, che una volta rotti si depositano sul film. Se però si aumenta solo di una piccola percentuale la  $V_{lin}$ , evitando la formazione dei filamenti, si verifica generalmente un miglioramento della qualità del film.

Per questi motivi si tende ad operare con  $80\% V_{master} < V_{lin} < 120\% V_{master}$  a seconda se si voglia ottenere una quantità di resina poco maggiore o inferiore a quella che si ottiene con il gap sup imposto.

### *Gap inf – Grammatura*

Come per la  $V_{lin}$  anche il gap inf non influenza la portata massica della resina. Abbiamo notato durante le diverse prove che per ottenere un film visivamente migliore era necessario imporre un gap inf < gap sup. Se però gap inf era molto inferiore al gap sup esso non permetteva il completo passaggio della resina e si ottenevano grammature sensibilmente minori.

Siamo quindi giunti alla conclusione che un buon compromesso si ottiene con gap inf 0.2 mm inferiore al gap sup (con gap sup 0.1 mm e 0.2 mm imponiamo un gap inf praticamente nullo). Tale gap inf non variava in alcun modo la grammatura finale ottenuta ma consente di ottenere una qualità del film migliore rispetto ad un gap inf maggiore.

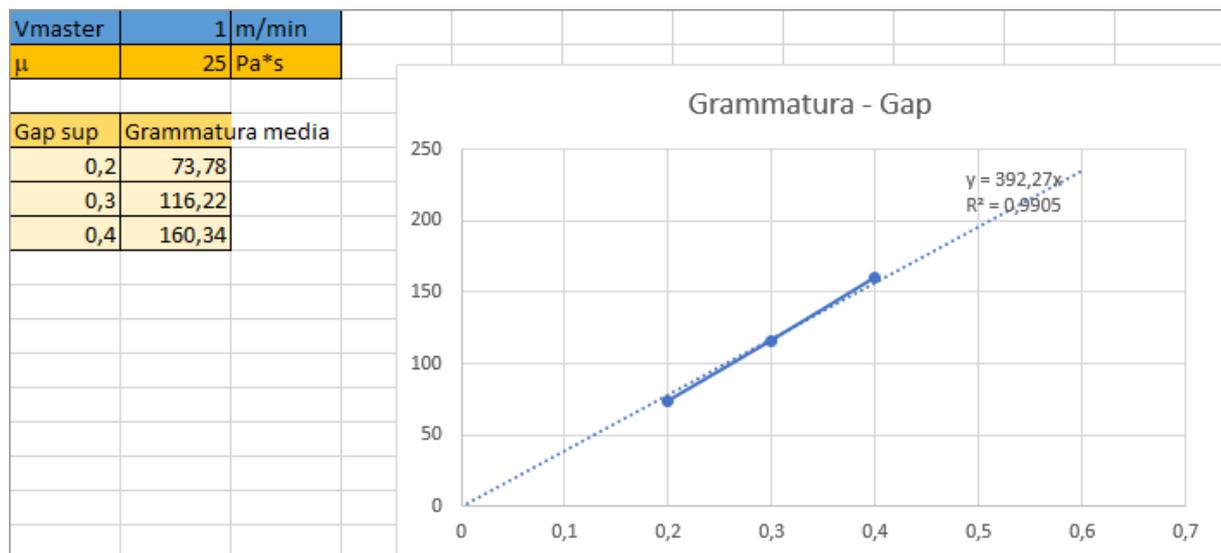
### Gap sup – grammatura

Passiamo quindi ad analizzare il parametro di filmatura che secondo il nostro modello teorico aveva la maggior influenza sulle grammature ottenibili, ovvero il gap sup.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti variando il gap sup da 0.1 a 0.4 e tenendo costanti i valori di  $V_{master}$  e  $V_{lin}$ .

Altezza filatura [mm]	GAP Sup [mm] rullo – ru	GAP Inf [mm] meato	Roll temperatu [°C]	viscosità [Pa*s]	Vmaster [m/min]	Vlin [%]	totale [g]	carta [g]	resina o prepre [g]	grammatura [g/m2]	grammatura me [g/m2]
800	0,2	0,1	80	25	1	100	14,43	5,54	3,35	74,44	
800	0,2	0,1	80	25	1	100	14,37	5,55	3,27	72,67	
800	0,2	0,1	80	25	1	100	14,4	5,55	3,38	75,13	
800	0,2	0,1	80	25	1	100	14,39	5,58	3,28	72,89	73,78
800	0,3	0,2	80	25	1	100	16,46	5,6	5,26	116,89	
800	0,3	0,2	80	25	1	100	16,38	5,61	5,16	114,67	
800	0,3	0,2	80	25	1	100	16,4	5,6	5,20	115,56	
800	0,3	0,2	80	25	1	100	16,5	5,6	5,30	117,78	116,22
800	0,4	0,2	80	25	1	100	18,43	5,58	7,27	161,56	
800	0,4	0,2	80	25	1	100	18,48	5,59	7,30	162,23	
800	0,4	0,2	80	25	1	100	18,34	5,6	7,14	158,67	
800	0,4	0,2	80	25	1	100	18,31	5,58	7,15	158,89	160,34

Rappresentando graficamente i dati a nostra disposizione otteniamo il seguente tipo di andamento:



Andando a visualizzare la linea di tendenza dei punti, e imponendo l'intercetta nell'origine si ottiene quello che è il modello reale approssimato in maniera lineare.

Un importante valore da prendere in considerazione è quello di  $R^2 = 0.991$ . La radice di  $R^2$  è chiamata *coefficiente di correlazione*.

In statistica, il coefficiente di correlazione lineare o coefficiente di correlazione di Pearson tra due variabili statistiche è un indice che esprime un'eventuale relazione di linearità tra esse.

Solitamente una relazione può essere definita con buona approssimazione lineare se il valore del coefficiente di correlazione è  $> 0.7$ . Nel nostro caso la radice di  $R^2$  è pari a  $R = 0.994$ , quindi la relazione che lega la Gramatura al Gap sup è praticamente *lineare*.

Come il nostro modello teorico anche quello reale è lineare con tutte le conseguenze che ne derivano.

È stato possibile quindi costruire un modello reale linearizzato imponendo:

- Gap sup: il gap imposto manualmente
- Gramatura: la grammatura secondo il modello lineare:

$$\text{Gram} = 392.27 * \text{Gap sup}$$

La principale differenza tra i due modelli ricavati finora sta nei valori di grammatura che si ottengono con i diversi gap. Nel modello reale le grammature per ogni gap sup sono inferiori. Questo è dovuto al fatto che non tutta la resina in uscita dalla calandra viene depositata sulla carta, una buona parte di questa infatti rimane sul rullo. Dalle prove effettuate e dai dati ottenuti risulta inoltre che la quantità di resina presente sul rullo, che raggiunge un valore costante fin dal primo giro completo di questo, dipende dal gap sup. Un gap sup maggiore comporta una quantità di resina maggiore che rimane attaccata al rullo.

Tutte queste osservazioni ci hanno permesso di “correggere” il modello teorico con un modello progressivo, ovvero un modello che tenesse conto dell’errore di grammatura commesso e del fatto che questo variasse con il gap sup.

#### 1.4 Modello Progressivo

Per realizzare il modello progressivo abbiamo modificato il modello teorico facendo in modo che tenesse conto dell’errore che si andava a commettere rispetto al modello reale.

Come già detto l’errore aumenta con l’aumentare del gap sup. Nella fig sono riportati gli errori percentuali tra modello teorico e modello reale ai vari gap sup.

Errore del modello		Gap sup.	errore %						
31-32	%	0,1	29,40903 %	25 Pa*s					
		0,2	30,74074 %	25 Pa*s					
		0,3	32,28333 %	25 Pa*s					
		0,4	33,40417 %	25 Pa*s					
Differenze tra errori % tra i vari gap									
1,33171	1,54259	1,12084	1,331713	Incremento percentuale medio dell'errore in funzione del Gap					
gap1-gap2	gap2-gap3	gap3-gap4							

Abbiamo ottenuto la media dell'aumento percentuale dell'errore tra i vari gap. E con questo siamo andati a costruire il modello progressivo applicando le seguenti correzioni:

- Gap sup: il gap che imponiamo quando i rulli della calandra sono puliti;
- Errore percentuale: l'errore percentuale legato al gap sup pari a:

$$29.40903 + [(\text{gap sup} * 10) - 1] * 1.331713$$

- Gap sup real: il gap effettivo presente tra i rulli

$$\text{Gap sup} * \text{Errore percentuale}$$

Questo modello ha una buona precisione e i valori forniti si avvicinano molto a quelli reali ottenuti sperimentalmente.

Di seguito vengono mostrati i risultati ottenuti con i diversi modelli confrontati con i dati reali:

$$\text{Gap sup} = 0.2 \quad \text{Grammatura media} = 73.78 \text{ g/m}^2$$

Modello progressivo

Modello progressivo							
Dati							
Gap sup.	0,2		Errore per	30,74074333 %	Spessore	0,069259 mm	
Gap sup re	0,061481 mm		6,15E-05 m		t	1,25 min/m <sup>2</sup>	
ρ	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	1 m/min		Area		1 m <sup>2</sup>		
L	0,8 m						
Portata vc	Portata massica		Grammatura				
4,92E-05	59,02223 g/min		73,777784 g/m <sup>2</sup>				

Modello reale

Gap sup	0,2 mm
Grammatura	78,454 g/mq

$Gap\ sup = 0.3\ mm$      $Grammatura\ media = 116.22\ g/m^2$

Modello progressivo

Modello progressivo							
Dati							
Gap sup.	0,3		Errore per	32,07245667 %	Spessore	0,101891 mm	
Gap sup re	0,096217 mm		9,62E-05 m		t	1,25 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	1 m/min		Area		1 m <sup>2</sup>		
L	0,8 m						
Portata v	Portata massica		Grammatura				
7,7E-05	92,36868 g/min		115,460844 g/m <sup>2</sup>				

Modello reale

Gap sup	0,3 mm
Grammatura	117,681 g/mq

$Gap\ sup = 0.4$      $Grammatura\ media = 160.34\ g/m^2$

Modello progressivo

Modello progressivo							
Dati							
Gap sup.	0,4		Errore per	33,40417 %	Spessore	0,133192 mm	
Gap sup re	0,133617 mm		0,000134 m		t	1,25 min/m <sup>2</sup>	
$\rho$	1200 kg*m <sup>3</sup>						
Vmaster	1 m/min		Area		1 m <sup>2</sup>		
L	0,8 m						
Portata v	Portata massica		Grammatura				
0,000107	128,272 g/min		160,340016 g/m <sup>2</sup>				

Modello lineare

Gap sup	0,4 mm
Grammatura	156,908 g/mq

Con tutti i gap sup analizzati il modello progressivo restituisce sempre un valore più vicino alla grammatura media reale misurata rispetto al modello reale linearizzato, questo non significa che sia più preciso ma che è altrettanto valido. Probabilmente infatti, se avessimo preso in considerazione una quantità di dati maggiore i valori medi si sarebbero avvicinati maggiormente ai valori ottenuti con il modello reale approssimato linearmente.

In entrambi i casi però restiamo all'interno del range di accettabilità del 3% a conferma del fatto che entrambi i modelli risultano utilizzabili.

## 2. Macchina di impregnazione

In questa fase sono stati analizzati i risultati ottenuti sperimentalmente per valutare i migliori parametri con cui realizzare l'impregnazione di tessuti.

Abbiamo utilizzato due diverse configurazioni di macchina e per entrambe valutato la qualità del preimpregnato ottenuto.

La qualità viene valutata osservando tre diversi parametri quali: *grammatura pre-preg*, *rugosità superficiale*, *tack* e *penetrazione della resina*.

La *grammatura del prepreg* è la prima caratteristica che viene valutata per determinare la qualità di un processo di impregnazione. La grammatura finale è data dalla somma delle grammature del tessuto e del film di resina sulla carta e il suo valore dipende dalla precisione del processo di trasferimento della resina sul tessuto. Per raggiungere la grammatura finale desiderata tutta la resina depositata precedentemente sulla carta siliconata deve essere trasferita al tessuto.

La *rugosità superficiale* è indice di una buona impregnazione poiché nasce quando la carta che viene rimossa porta via con sé parte della resina. Questo è un evento indesiderato poiché genera uno spreco di resina.

La *tack* è una caratteristica fondamentale per un preimpregnato, essa deriva dalla giusta quantità di resina presente sulla superficie del prodotto. Una buona tack consente un facile posizionamento del preimpregnato anche in posizioni più svantaggiose e favorisce il processo di laminazione per la creazione della parte.

L'ultimo parametro da valutare per definire la qualità di un preimpregnato è la *penetrazione della resina* all'interno del tessuto. Ovviamente una distribuzione di resina omogenea in tutto lo spessore del preimpregnato determina migliori proprietà meccaniche dello stesso.

Le due configurazioni esaminate erano:

- S-Wrap;
- Pressa.

## **2.1 S-Wrap**

La prima prova è stata effettuata con l'S-Wrap impregnando un tessuto di fibra di vetro da 200g/mq con un'impregnazione sia one che two side.

### *Fibra di vetro - One-side*

Il primo tentativo con impregnazione one-side ha portato a risultati scadenti dovuti al non corretto allineamento delle carte con il fabric. Al passaggio nell'S-Wrap il prodotto veniva stropicciato e le fibre uscivano rotte o non completamente impregnate.

Per risolvere questo problema abbiamo effettuato un secondo tentativo aumentando lo spazio presente tra i due rulli dell'S-Wrap. In questo modo al prodotto non veniva applicata nessuna forza di compressione nel passaggio tra un rullo e l'altro, ma si evitava che venisse stropicciato.

Con questa modifica si otteneva una buona impregnazione, ottime caratteristiche superficiali come rugosità e tack ma una pessima penetrazione della resina all'interno del tessuto.

Per quanto riguarda le grammature ottenute esse rispecchiavano quelle desiderate rimanendo sempre nel range di accettabilità del 3%. Questo significava che, come il processo prevedeva, tutta la resina presente sulle carte si trasferiva al tessuto da impregnare.

### *Fibra di vetro – Two-side*

Utilizzando due carte resinate per il processo si ottiene un preimpregnato che ha caratteristiche di qualità superiori rispetto a quello realizzato con un processo one-side.

In particolare, tutte le superfici presentano buona tack e rugosità superficiale, e la penetrazione della resina è totale dato che essa entra da entrambe le facce del fabric.

L'S-wrap si è quindi dimostrato un ottimo strumento per la realizzazione di preimpregnati principalmente con un metodo di impregnazione two-side

## **2.2 Pressa**

La seconda configurazione esaminata prevedeva la conversione dell'S-Wrap in una ulteriore pressa. In questo caso non è richiesta un'eccessiva precisione nell'allineamento del prodotto per garantire la riuscita del processo.

Abbiamo impregnato due diversi tessuti (fibra di vetro 200 g/mq e fibra di carbonio 280g/mq) con le due diverse tipologie di impregnazione one-side e two-side.

### *Fibra di vetro – one-side*

Per quanto riguarda il metodo di impregnazione one-side questa prova ha portato dei risultati migliori rispetto all'utilizzo dell'S-wrap.

La resina penetrava più in profondità nel tessuto dato che la forza di compressione applicata in questa configurazione sul prodotto era maggiore. Come conseguenza di ciò si ottenevano ottime tack e rugosità sulla superficie inferiore a contatto con la carta resinata, e comunque buonissimi livelli di tack e rugosità sulla superficie superiore.

Anche in questo esperimento le grammature ottenute dalle varie campionature rientravano nel range di accettabilità del 3%.

### *Fibra di vetro – two-side*

Utilizzando una metodologia two-side ovviamente il preimpregnato finale presentava ottime caratteristiche su entrambe le superfici, ottima tack, ottima rugosità e ottima penetrazione. Anche in questo caso le grammature rispecchiavano in maniera molto precisa quelle desiderate.

### *Fibra di carbonio – One-side*

Il tessuto in fibra di carbonio utilizzato ha un peso maggiore rispetto a quello in fibra di vetro; nonostante ciò rientra comunque nella categoria di tessuti leggeri.

Dalla impregnazione one-side in pressa di questo tessuto, che come già detto non è considerabile pesante, si ottengono caratteristiche analoghe a quelle del tessuto in fibra di vetro impregnato nelle stesse condizioni. Si avrà quindi un preimpregnato con una buona penetrazione della resina che porta ad avere due superfici con delle ottime caratteristiche qualitative.

Infine, anche con il tessuto in fibra di carbonio siamo riusciti ad ottenere sempre le grammature ipotizzate e desiderate all'inizio del processo.

### *Fibra di carbonio – Two-side*

Con un'impregnazione two side sono state ottenute ottime caratteristiche di impregnazione su entrambe le superfici anche per questo tessuto e anche le grammature rimanevano sempre nel range di accettabilità.

La discriminante tra le due configurazioni S-wrap e pressa è la grammatura del tessuto da impregnare.

Specifichiamo innanzitutto che in un tessuto pesante la resina incontra maggiori difficoltà a penetrare in profondità e quindi è preferibile utilizzare un processo two side.

La configurazione che prevede la conversione dell'S-wrap in una pressa presenta un solo piano caldo, posto al di sotto del prodotto. Con tessuti piuttosto pesanti questo unico piano caldo non è sufficiente a scaldare anche la resina della carta superiore e inevitabilmente questa rimarrà ad una viscosità maggiore rendendo difficile l'impregnazione two-side.

Per questo motivo mentre la configurazione S-wrap è più adatta per tessuti con grammature maggiori e che tipicamente presentano un processo di impregnazione two-side, la configurazione pressa risulta più efficace e semplice da applicare con tessuti più leggeri

## Conclusioni

Lo studio della linea di produzione in esame ha permesso di ottenere diversi risultati utili riguardanti tutti i processi basati sullo stesso meccanismo di impregnazione.

Dopo aver verificato con successo funzionamento dal punto di vista meccanico della macchina, dimostrando come i rulli non subissero alcuno spostamento durante l'avanzamento del processo, è estrapolato un modello teorico ed uno sperimentale che descrivessero il funzionamento della macchina considerando tutti i parametri che lo influenzano.

La sperimentazione ha riguardato i due moduli presenti nella macchina: la filmatrice e la macchina di impregnazione.

Per quanto riguarda la filmatrice si è cercato di sviluppare un modello che ne descrivesse il funzionamento, in particolare un modello che fornisse la grammatura del film ottenibile variando i diversi parametri della macchina.

Prima della fase sperimentale è stato realizzato un modello basato sul funzionamento teorico della macchina senza tener conto del rendimento del processo. Questo ha permesso di ottenere un primo modello, definito teorico, da confrontare successivamente con quello reale ottenuto sperimentalmente.

Il modello teorico realizzato sulla filmatrice ha consentito di ipotizzare inizialmente l'andamento della grammatura del film di resina depositata in funzione del gap sup imposto. Secondo questo modello tra le due grandezze esiste una relazione lineare che se verificata consentirebbe di determinare con estrema semplicità la grammatura ottenibile in funzione dei vari parametri.

Confrontando questo modello con quello ottenuto sperimentalmente è stato subito osservato che le grammature relative ai diversi gap sup imposti differivano in maniera sostanziale. Questa differenza era dovuta in una prima approssimazione alla resina che rimaneva attaccata sul rullo durante la fase di deposizione. Tutto sommato questo risultato era prevedibile in quanto, nel modello teorico, non era stato preso in considerazione quello che è il rendimento della filmatrice.

Dal confronto è emerso inoltre che la relazione tra grammatura e gap sup poteva essere considerato con buona approssimazione lineare anche nel modello sperimentale. Le rette dei due modelli però non erano parallele bensì presentavano due diverse inclinazioni. Ciò

scaturiva dal fatto che nel modello reale l'errore che si commetteva rispetto al modello teorico andava ad aumentare progressivamente con l'aumentare del gap sup: si passava dal 31% per un gap pari a 0.2 mm fino al 34% per un gap di 0.4 mm. L'aumentare del gap sup determinava infatti una maggiore percentuale di resina che rimaneva attaccata al rullo.

Questa analisi ha portato alla conclusione che il modello teorico coincide con il modello reale a meno di un fattore moltiplicativo progressivo dipendente dal gap sup. È stato quindi realizzato un modello progressivo inserendo questo fattore nel modello teorico. Inoltre, il modello progressivo restituiva risultati più vicini a quelli ottenuti rispetto al modello reale linearizzato quindi entrambi risultavano utilizzabili.

Passando allo studio della macchina di impregnazione è stata analizzata la qualità del preimpregnato ottenuto e le variabili che la influenzano.

Durante le prove sulla macchina di impregnazione sono state prese in esame due diverse configurazioni di macchina (S-Wrap e Pressa) e due diverse modalità di impregnazione (one side e two side).

A seguito delle prove sperimentali si è giunti alle seguenti conclusioni:

L'*S-wrap*, al contrario della pressa, richiede un più preciso allineamento dei vari prodotti nella macchina, un tempo di preparazione maggiore e quindi una diminuzione della produttività.

Nella sperimentazione effettuata la configurazione *pressa* è risultata l'opzione che permette di ottenere i risultati migliori a livello qualitativo. Questa configurazione permetteva infatti di applicare pressioni maggiori durante la fase di impregnazione senza eccessivi cali di produttività.

Il risultato ottenuto però non può essere considerato sempre valido. Infatti, per i tessuti più pesanti, che presentano una difficoltà di penetrazione della resina maggiore, risulta indispensabile utilizzare un processo two side con una configurazione *s-wrap*, la quale consente di scaldare a sufficienza la resina su entrambe le superfici. Se utilizzassimo una configurazione *pressa* con un tessuto pesante la resina presente sulla carta superiore non raggiungerebbe la viscosità adatta per l'impregnazione.

La discriminante per le due diverse configurazioni è data quindi dalla grammatura del tessuto secco e dal tipo di impregnazione che si intende realizzare: per tessuti leggeri la configurazione *pressa* risulta la scelta più adatta dato che permette di ottenere ottimi risultati

mantenendo una buona produttività, mentre per tessuti pesanti, in cui è necessario ricorrere ad un'impregnazione two side, la scelta deve ricadere necessariamente sull'utilizzo dell'S-Wrap.

# References

## 1. Articoli e studi

- Elsevier, Theoretical analysis of the calendered exiting thickness of viscoelastic sheets, J.C. Arcos, O. Bautista, F. Mendez, E.G. Bautista;
- Elsevier, Effect of pressure-dependent viscosity on the exiting sheet thickness in the calendering of Newtonian fluids, J. Arcos, A. Hernandez, F. Mendez, O. Bautista;
- Elsevier, Calendering of pseudoplastic and viscoplastic sheets of finite thickness, S. Sofou, E. Mitsoulis;
- Elsevier, Numerical simulation of calendering viscoplastic fluids, E.Mitsoulis.

## 2. Sitografia

- [it.wikipedia.org](https://it.wikipedia.org), Materiali compositi;
- [it.wikipedia.org](https://it.wikipedia.org), Resine polimeriche;
- [it.wikipedia.org](https://it.wikipedia.org), Legge di Darcy;
- [Rozing.com](https://rozing.com), The Kozeny-Carman equation.

## 3. Bibliografia

- Matrici e rinforzi nei compositi polimerici fibro-rinforzati, Archimede Forcellese.