POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Previsione di performance di un estrusore monovite sottoposto a usura tramite simulazione numerica del processo

Relatori:

prof. Stefano Marchesiello

prof. Alberto Frache

Candidato:

Luca Barbaglia

Dicembre 2019

Indice

Sommario 1
Introduzione 2
1 Teoria di base 4
1.1 Materiali polimerici 4
1.2 Reologia 5
1.3 Estrusore 9
1.3.1 Le tre zone 10
1.3.2 Punto di funzionamento 16
1.3.3 L'usura, cause ed effetti 20
2 Costruzioni Meccaniche Luigi Bandera S.p.A 24
2.1 Storia e filosofia aziendale 24
2.2 Estrusori 25
2.3 Film in bolla 26
2.4 Testa piana 27
2.5 Impianto di granulazione PVC 27
3 Operazioni preliminari 29
3.1 Scelta estrusore 29
3.2 Scelta materiale e raccolta dati 30
3.2.1 Densità 30
3.2.2 Viscosità 31
3.2.3 Temperature caratteristiche ed entalpia di fusione 33
3.2.4 Calore specifico 35
3.3 Scelta software 36
4 Simulazioni 37
4.1 Materiale 37
4.2 Estrusione 37
4.3 Grandezze osservate 43
5 Risultati 45
5.1 Andamento generale 45
5.2 Valori limite 50
5.2.1 La velocità di rotazione della vite 51
5.2.2 La temperatura del melt 52

5.3 L’influenza della portata e del profilo di usura 57
5.3.1 Anomalia del profilo di usura 1-1-2 66
5.4 L’influenza del materiale 69
5.5 Individuazione livello di usura 72
6 Conclusioni 76
Ringraziamenti 78
Bibliografia 79

Sommario

Nel presente lavoro si effettua l'analisi di un estrusore di materiali polimerici, ovvero una macchina capace di trasformare granuli solidi di materie plastiche, vergini e non, monocomponenti o sottoforma di miscele, in un fuso omogeneo; questo, ulteriormente lavorato, dà origine a numerosissimi e svariati prodotti. Data la quantità di prodotti ottenibili a partire dall'utilizzo dell'estrusore, risulta importante studiare il processo di estrusione. Lo studio si concentra sull'usura a cui sono sottoposti i componenti dell'estrusore e in particolare sulla perdita di prestazioni che deriva dall'usura della vite di estrusione.

L'intero processo di estrusione è simulato mediante l'utilizzo di un software apposito il quale è in grado di mostrare l'evolversi di numerose grandezze all'interno della macchina analizzata.

Si effettua il monitoraggio di alcune grandezze che caratterizzano il processo di estrusione e si tracciano gli andamenti di queste in funzione del progredire dello stato di usura. Dall'analisi dell'evoluzione delle grandezze ottenute col software è possibile ricavare il presumibile stato di usura della vite reale così come è possibile stabilire il massimo grado di usura sopportabile dalla vite affinché siano garantite prestazioni accettabili da parte dell'estrusore.

Introduzione

Nell'ambito della costruzione di impianti produttivi il primo obiettivo da raggiungere è la progettazione di un impianto in grado di processare le materie prime in modo performante ed economico e di produrre prodotti finiti qualitativamente accettabili dal mercato. Raggiunto questo obiettivo, l'attenzione può rivolgersi all'ottimizzazione e al miglioramento dello stesso impianto attraverso nuove scelte tecniche, ma anche verso l'aumento di servizi come ad esempio l'offerta di programmi di manutenzione per macchinari sottoposti ad usura.

Il lavoro svolto nella presente tesi si colloca nell'ambito di cui sopra.

Nel settore della trasformazione della plastica le linee di estrusione sono impianti largamente diffusi. Il cuore delle linee di estrusione è l'estrusore, il quale trasforma materiale polimerico solido e non lavorato in un composto omogeneo fuso modellabile da filiere che si trovano a valle dell'estrusore. L'estrusore, essendo composto da due elementi in rotazione relativa tra loro e contenendo un materiale in scorrimento relativo rispetto ai due elementi meccanici, è soggetto a fenomeni di usura. L'usura consuma e danneggia i componenti dell'estrusore e per questo motivo le performance della macchina risultano diminuite. Per eccessive usure le prestazioni dell'estrusore sono così basse che la produzione non è più conveniente e si rende necessaria la sostituzione dei componenti usurati.

Finora il controllo dello stato dell'estrusore si esegue smontando i componenti, compiendo controlli visivi e misurazioni di tutta la geometria e dunque effettuando un fermo macchina. Lo studio in questa tesi potrebbe sia evitare questo procedimento sia prevedere l'avvicinarsi dello stato critico e quindi consentirebbe la programmazione della sostituzione dei componenti in momenti più favorevoli alla produzione.

Lo studio in questa tesi tratta l'analisi delle prestazioni di un estrusore sottoposto ad usura. Il processo di estrusione non è descrivibile in maniera esauriente da formule analitiche e perciò è stato utilizzato un software di computazione numerica per la simulazione virtuale del processo. Le simulazioni, tramite l'inserimento di tutte le informazioni necessarie al loro svolgimento, hanno restituito i dati su cui sono state svolte le analisi delle prestazioni dell'estrusore. L'adozione di un software di simulazione è resa necessaria anche dal fatto che l'alternativa per la raccolta di dati sarebbe stata una campagna sperimentale dispendiosa sia in termini di tempo che economici.

L'obiettivo del lavoro svolto è quello di comprendere e quantificare gli effetti che l'usura ha sulle prestazioni dell'estrusore, capire come queste evolvano proprio in funzione dell'usura e trovare una correlazione tra i diversi stati di usura e le condizioni operative della macchina. Questo studio risulta utile, per esempio, a stabilire qual è il massimo grado di usura che l'estrusore può sopportare senza che il prodotto finale risulti qualitativamente inaccettabile. Inoltre, tramite la correlazione tra l'usura e le condizioni operative dell'estrusore, ovvero le performance è possibile tramite la conoscenza di uno risalire all'altro. Dalle performance della macchina si potrebbe risalire allo stato di usura dei componenti e quindi dalla conoscenza dello stato di usura si potrebbero prevedere le prestazioni che l'estrusore potrà ancora garantire nonché apprendere di quanto l'estrusore si può ancora usurare.

La trattazione dell'usura tramite un software di calcolo non è stata ancora oggetto di studi di questo tipo e il lavoro svolto è di carattere esplorativo.

Nel Capitolo 1 è descritta la teoria necessaria a comprendere quanto esposto nei capitoli successivi. È esposta una breve descrizione generale dei polimeri e una più particolare di quelli che saranno utilizzati. Seguono le proprietà reologiche, proprietà che distinguono i materiali polimerici da tutti gli altri materiali. Conclusa la descrizione dei materiali e delle loro proprietà, sono esposte le principali caratteristiche dell'estrusore monovite, ovvero la sua geometria, la sua suddivisione funzionale, il funzionamento, il punto di funzionamento e infine le cause e gli effetti dell'usura sulla vite.

Il Capitolo 2 contiene una breve digressione sull'azienda nella quale è stato svolto il lavoro di tesi. Sono presentate brevemente la storia e la filosofia aziendale e in seguito sono elencati i principali estrusori prodotti da Costruzioni Meccaniche Luigi Bandera S.p.A e le linee di estrusione costruite.

Nel Capitolo 3 sono esposte le operazioni preliminari che hanno permesso lo svolgersi della tesi e delle simulazioni numeriche. Sono dichiarate le scelte e le motivazioni che hanno portato alla scelta dell'estrusore studiato, dei materiali analizzati e del software di simulazione adottato. Unitamente alla scelta dei materiali sono descritte le prove di laboratorio effettuate per la caratterizzazione dei materiali e sono esposti i risultati.

Il Capitolo 4 contiene tutta la presentazione e l'impostazione delle simulazioni. Sono presentate tutte le operazioni svolte all'interno del software di simulazione: inserimento di tutti i dati dei materiali, dei dati geometrici dell'estrusore e dei parametri operativi dell'estrusore. Sono inoltre dichiarate le grandezze monitorate per studiare gli effetti dell'usura della vite.

Nel Capitolo 5 sono mostrati, corredati da commenti, i risultati ottenuti dalle simulazioni. Prima è presentato l'andamento generale, all'aumentare dell'usura, delle grandezze monitorate, in seguito sono analizzati più dettagliatamente gli effetti del grado di usura, del profilo di usura, della portata di materiale e del materiale sulle grandezze monitorate.

1 Teoria di base

In questo capitolo è presentata la teoria necessaria a comprendere il lavoro svolto e, laddove possibile, a prevedere e interpretare i risultati ottenuti.

1.1 Materiali polimerici

I polimeri [1] sono molecole di grandi dimensioni formate dalla ripetizione di un più piccolo gruppo molecolare detto unità ripetitiva e caratteristica del polimero stesso. Il polimero è ottenuto a partire dai monomeri tramite reazioni di polimerizzazione e l'unità ripetitiva del polimero è direttamente collegata al monomero o ai monomeri di partenza.

I materiali polimerici sono molto diffusi e utilizzati poiché presentano vantaggi legati alle loro caratteristiche di leggerezza (bassa densità), isolamento termico ed elettrico, facilità di modellazione in forme complesse e in alcuni casi possiedono buone prestazioni strutturali quando sono impiegati come fibre. I campi di applicazione dei polimeri sono molteplici e comprendono ad esempio i settori del packaging e dell'elettrico, ma anche i settori arredamento, informatico, edile, medicale, nautico e automobilistico.

I polimeri sono macromolecole basate soprattutto sull'atomo di carbonio e sono di origine sintetica, ovvero realizzati dall'uomo, inoltre sono derivati principalmente dai combustibili fossili. I monomeri, con sui saranno prodotti i polimeri, sono semplici molecole organiche costituite da atomi di carbonio legati a diversi elementi chimici (ad esempio idrogeno, coloro, fluoro). Tramite reazioni di polimerizzazione i monomeri si legano tra loro tramite legami primari forti andando a formare lunghe catene chiamate appunto polimeri. I polimeri e tutte le relative proprietà dipendono dal o dai monomeri di partenza, dalla loro sequenza all'interno della catena, dalle ramificazioni che possono crearsi a partire dalla catena principale e dal grado di polimerizzazione, ovvero dal numero di volte con cui si ripete l'unità ripetente che costituisce il polimero. Le catene sono attratte le une dalle altre da legami secondari deboli [2].

Una delle distinzioni che si possono realizzare all'interno dei polimeri è quella che distingue i polimeri termoplastici da quelli termoindurenti. I polimeri termoindurenti, quando riscaldati reticolano e induriscono, rimanendo duri e nel macchinario analizzato in questa tesi non possono essere processati a causa di questa proprietà. Sono invece processati nell'estrusore i polimeri termoplastici, i quali rammolliscono fondendosi se sono riscaldati e induriscono quando si raffreddano.

Tra i diversi polimeri sintetizzati dell'uomo si annovera il polietilene (PE) [3] [4], il quale è utilizzato in questo elaborato. Esso è il polimero con la struttura più semplice di tutti i polimeri (ripetizione del gruppo CH_2-CH_2), oltre ad essere il materiale polimerico prodotto in maggiore quantità. Il polietilene possiede un basso prezzo, proprietà di isolamento elettrico eccellenti per determinate frequenze, buona resistenza chimica, buona processabilità, flessibilità e durezza e trasparenza nel caso di film sottili. Il polietilene si ottiene a partire dal monomero di etilene, ma a seconda del processo e della reazione di polimerizzazione utilizzati si giunge a diversi tipi di polietilene. Si può avere un HDPE (high density polyethylene), LDPE (low density polyethylene), LLDPE (linear low density polyethylene) e m-LLDPE (metallocene linear low density polyethylene).

L'LDPE, o polietilene a bassa densità, è il primo polietilene a essere stato prodotto e presenta catene polimeriche molto ramificate. Il range di densità occupato da questo polietilene è 0,915-0,930 g/cm^3. È spesso mescolato insieme ad altri tipi di polietilene per aumentare la processabilità. È utilizzato soprattutto per produrre film impiegati nel food packaging.

L'HDPE, o polietilene ad alta densità, possiede densità tipicamente tra gli 0,94 g/cm^3 e gli 0,97 g/cm^3. Presenta catene poco ramificate che aumentano la processabilità, la durezza e la resistenza a trazione. È utilizzato principalmente per tubi per la distribuzione di acqua potabile e di gas e per il packaging di industrie chimiche come bottiglie di candeggina, detergenti e shampoo.

L'LLDPE, o polietilene lineare a bassa densità, possiede densità tipiche dell'LDPE, ma al suo interno sono presenti comonomeri diversi dall'etilene. Le catene possiedono ramificazioni corte (da qui il termine lineare). Rispetto all'LDPE possiede proprietà meccaniche migliori ed è molto utilizzato negli impianti di film in bolla.

L'm-LLDPE, o polietilene metallocenico lineare a bassa densità, è ottenuto tramite l'uso di catalizzatori che permettono di avere catene di lunghezza molto simile tra di loro (a differenza degli altri tipi di polietilene) e perciò tutte le macromolecole possiedono quasi lo stesso peso molecolare. Questa caratteristica conferisce proprietà meccaniche e ottiche migliorate.

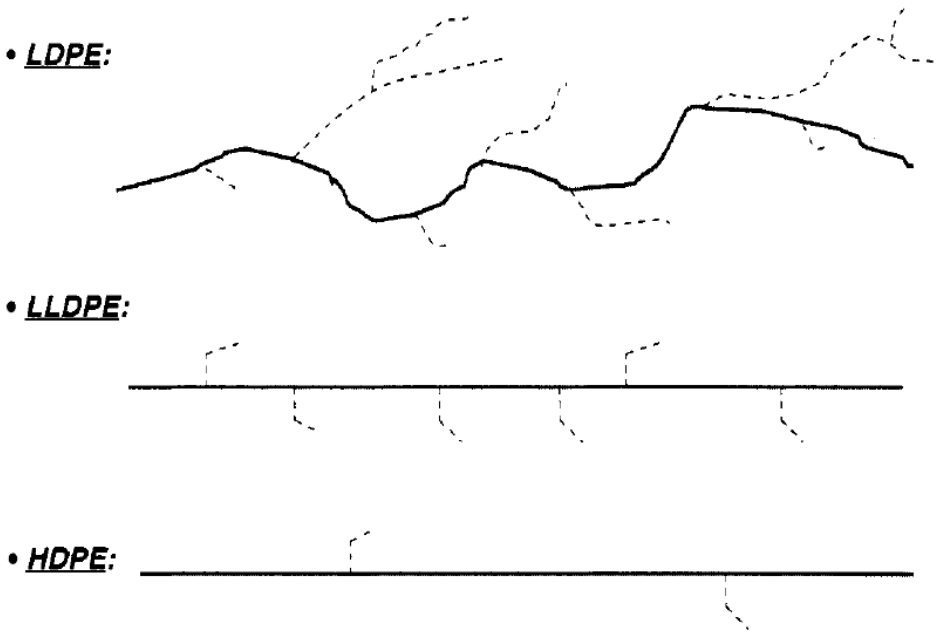

Figura 1.1: Catene e ramificazioni dei principali tipi di polietilene [4].

1.2 Reologia

I polimeri allo stato solido presentano un comportamento principalmente elastico, ma con una semplice prova di trazione si può notare che ciò non è perfettamente vero, infatti presentano un discostamento dalla linearità (tra carico e deformazione) che testimonia una componente di comportamento viscoso. I polimeri allo stato fuso invece, hanno un comportamento principalmente viscoso, ma presentano anche una parte elastica. Questo particolare comportamento dei polimeri è definito comportamento viscoelastico.

Data la peculiarità dei polimeri sopra descritta non è possibile caratterizzare questi materiali con gli stessi approcci e gli stessi strumenti utilizzati per i materiali tradizionali quali ad esempio i materiali metallici (per quanto riguarda lo stato solido) e i fluidi viscosi (o newtoniani) come acqua e olio (per quanto riguarda lo stato liquido o fuso). Lo studio del comportamento meccanico di questi materiali viscoelastici prende il nome di reologia.

Le proprietà meccaniche possedute dai materiali polimerici sono chiamate proprietà reologiche, le quali dipendono da molti fattori: velocità di deformazione, temperatura, tempo, struttura del polimero, presenza di additivi e riempimenti.

La caratteristica principale che distingue i polimeri dagli altri materiali tradizionali è la viscosità. La viscosità, o attrito interno, misura la resistenza di un fluido alla deformazione continua ed è definita dall'equazione della legge di Newton [5]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \qquad (1)$$

Nella formula (1) η è la viscosità [Pa·s], τ è lo sforzo tangenziale [Pa] e $\dot{\gamma}$ la velocità di deformazione (o shear rate) [1/s].

La viscosità è tipicamente funzione solo del materiale e della temperatura, dunque fissati i due, essa riamane costante. Questo è valido per i cosiddetti fluidi newtoniani, ma per i polimeri non è così. I polimeri infatti sono definiti fluidi non-newtoniani poiché non seguono la legge di Newton (1) e la loro viscosità dipende anche dalla velocità di deformazione (materiali shear-dependent) o dal tempo (materiali time-dependent). Nel presente elaborato saranno utilizzati materiali shear-dependent dunque in questo capitolo non si tratterà dell'altro tipo.

Tra i materiali shear-dependent è possibile una ulteriore classificazione a seconda che la viscosità cresca o decresca all'aumentare della velocità di deformazione. I primi sono chiamati dilatanti, mentre i secondi pseudoplastici. La maggior parte dei polimeri fusi presentano un comportamento pseudoplastico e proprio questi saranno oggetto della tesi. Un andamento qualitativo della viscosità dei diversi materiali, in funzione della velocità di deformazione è rappresentato nella seguente Figura 1.2.

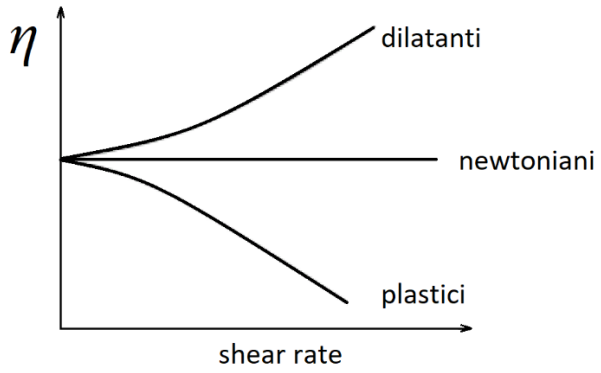

Figura 1.2: Diagramma qualitativo di viscosità in funzione della velocità di deformazione [6].

Lo shear rate è una grandezza fondamentale nell'analisi della fluidodinamica dei polimeri poiché influenza in maniera molto forte la viscosità del polimero. Lo shear rate é definito come: "The deformation of a fluid under the influence of an applied shear force presented as the change in velocity

of the fluid perpendicular to flow" [7]. Ovvero è la deformazione di un fluido sotto l'influenza di una forza di taglio applicata e si presenta come una variazione della velocità del fluido perpendicolare alla direzione del flusso. Può essere chiamato anche gradiente di velocità.

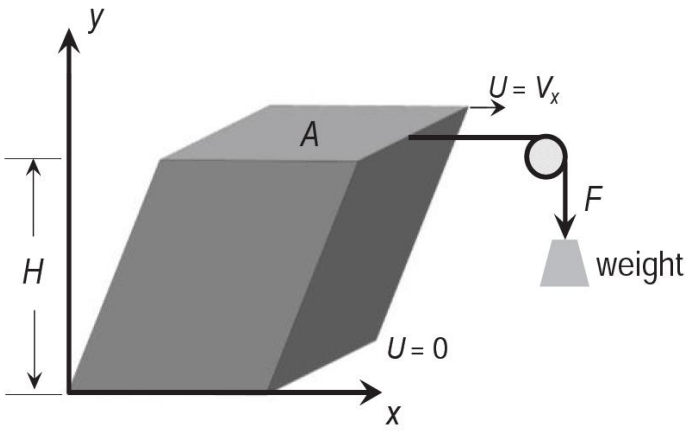

Figura 1.3: Shear rate per un elemento di materiale [5].

Lo shear rate quindi può essere espresso come [5]:

$$\dot{\gamma} = \frac{V_x}{\mathrm{H}} \qquad (2)$$

Dove a numeratore è presente la differenza tra la velocità della superficie di materiale alla quota H e la velocità per y=0 (che in questo caso vale zero) e a denominatore compare la distanza tra i due piani H. Maggiore è la differenza tra le velocità maggiore sarà la deformazione e quindi lo shear rate (a parità di H). Viceversa, maggiore è la distanza tra i due piani e minore sarà lo shear rate, a parità di differenza di velocità.

Come mostrato in Figura 1.2 la viscosità dei polimeri dipende fortemente dallo shear rate. L'andamento della viscosità è però rappresentato meglio nella Figura 1.4 dove esso è in funzione dello shear rate e della temperatura. I tre andamenti sono caratterizzati da un tratto circa orizzontale a bassi shear rate e questo significa che a bassi gradienti di velocità il polimero fuso si comporta come un fluido newtoniano. In questo tratto si può identificare un valore η_0 che indica appunto la viscosità del polimero quando questo ha un comportamento newtoniano. Aumentando gli shear rate si incontra prima un ginocchio che rappresenta il valore per cui il polimero fuso inizia ad assumere un comportamento non newtoniano e in seguito si nota una decrescita della viscosità tipica dei polimeri pseudoplastici. La posizione del ginocchio può essere rappresentata dalla grandezza λ ovvero il tempo di rilassamento il quale può essere definito come la tendenza delle catene polimeriche a recuperare la loro struttura indistorta. La viscosità ad alti shear rate diminuisce con una certa pendenza *p*. Tramite le grandezze η_0 , λ e *p* si può scrivere la relazione matematica (3) che descrive l'andamento della viscosità in funzione dello shear rate (ad una fissata temperatura) [6]:

$$\eta = \frac{\eta_0}{[1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2]^{\mathrm{n}}} \qquad (3)$$

Sempre in Figura 1.4 è evidenziato l'effetto della temperatura sulla viscosità. All'aumentare della temperatura la viscosità diminuisce e la differenza è maggiore per shear rate bassi dove il comportamento del polimero è ancora newtoniano. La viscosità di un fluido newtoniano è funzione

della temperatura e così è anche nel tratto di comportamento newtoniano di un fluido non newtoniano. Ad alti shear rate, la differenza di viscosità tra le tre curve, al variare della temperatura, è molto più bassa. Infine, temperature più elevate spostano il ginocchio verso valori di shear rate più elevati.

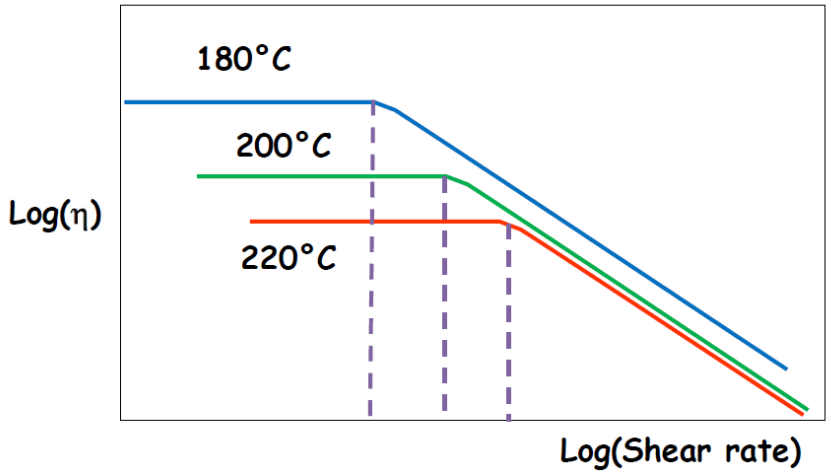

Figura 1.4: Andamento della viscosità in funzione dello shear rate e della temperatura in un diagramma log-log [6].

Le proprietà reologiche e in particolare la viscosità sono proprietà fondamentali per un polimero e dunque è necessario conoscerle. La misurazione della viscosità ovvero il tracciamento delle curve di viscosità in funzione dello shear rate e della temperatura sono effettuate tramite appositi strumenti chiamati reometri. Esistono principalmente due tipi di reometri: reometro rotazionale e reometro a capillare.

Il reometro rotazionale [8] è un particolare tipo di reometro in cui il polimero da caratterizzare è posto tra due elementi in movimento (rotazione) relativo tra loro. Le geometrie accoppiate possono essere piatto-piatto, piatto-cono o cilindri concentrici. Con questo tipo di reometro si possono effettuare diversi tipi di prove (test dinamici, test statici, frequency sweep, time sweep…) e si possono misurare diverse caratteristiche dei polimeri oltre alla viscosità (distribuzione del peso molecolare, tempo di rilassamento…). Il range di shear rate che può essere realizzato dal reometro rotazionale è compreso tra i 10^{-6} e i 10^{2} s^{-1}. Negli estrusori si raggiungono shear rate più elevati e quindi questo tipo di reometro, solitamente, non è utilizzato per la misurazione della viscosità dei materiali che devono essere processati nell'estrusore.

Il reometro a capillare [9] [10], il quale è stato utilizzato per la misurazione della viscosità dei polimeri analizzati in questa tesi, è in grado di misurare la viscosità in un range di shear rate più elevati (da 10^{-1} a 10^{5} s^{-1}). Esso è usato per la misurazione della viscosità dei polimeri fusi a determinate temperature le quali sono solitamente raggiunte all'interno dell'estrusore. Lo strumento (in Figura 1.5), tramite un pistone, comprime il polimero fuso contenuto nella camera serbatoio. Il polimero è mantenuto fuso ad una determinata temperatura grazie a degli elementi riscaldanti e ad una copertura isolante del serbatoio. Il polimero è forzato a passare attraverso un capillare dalla geometria nota (raggio e lunghezza) e con portate sempre più elevate. Tramite la misurazione della velocità del pistone, della forza impressa dal pistone e della pressione raggiunta dal polimero nei pressi dell'imbocco del capillare è possibile calcolare gli shear stress, gli shear rate e la viscosità del polimero. La viscosità così calcolata è definita apparente poiché le formule utilizzate per i calcoli si

riferiscono a fluidi newtoniani. Per ottenere la viscosità reale del polimero è necessario apportare le correzioni di Bagley e Rabinowitsch. La prima serve a stimare la vera pressione all'imbocco del capillare (per calcolare correttamente gli shear stress) poichè il trasduttore di pressione non è posizionato esattamente all'imbocco ma piuttosto al fondo del cilindro serbatoio. La seconda invece serve a stimare correttamente gli shear rate di un fluido non-newtoniano.

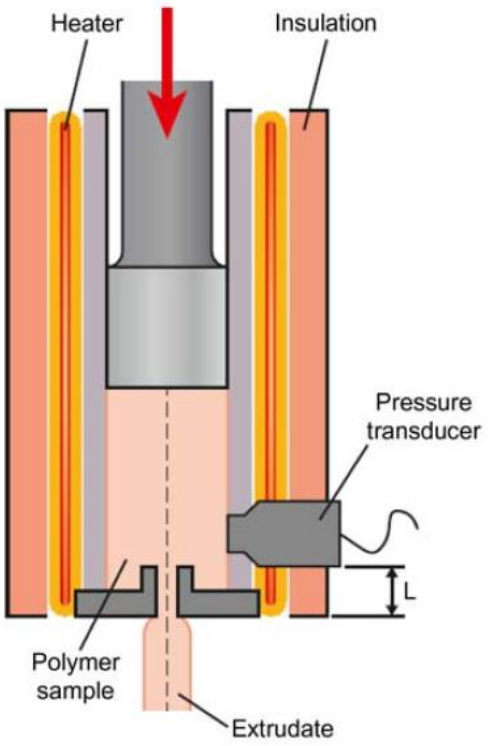

Figura 1.5: Schema di reometro a capillare [10].

1.3 Estrusore

L'estrusore è un macchinario industriale capace di trasformare granuli (pellet, polveri o altro) di materie plastiche, vergini e non, monocomponenti o sottoforma di miscele, in un fuso omogeneo.

Il macchinario per l'estrusione si compone di diverse parti raffigurate nella Figura 1.6:

- hopper, o tramoggia, nel quale sono contenuti i granuli (pellet, polveri o altro) che verranno trasformati;
- barrel, o cilindro, un corpo cilindrico termoregolato dentro il quale avviene tutta la trasformazione (fusione, omogeneizzazione e compressione) del polimero;
- screw, o vite, è costituito da un nocciolo cilindrico di diametro variabile, sul quale è avvolto a spirale un filetto; la vite è responsabile, tramite la sua rotazione, dell'avanzamento del materiale dalla zona di alimentazione a quella di uscita;
- heaters, sono elementi riscaldatori, contribuiscono alla termoregolazione del cilindro per quanto riguarda la quota di calore da apportare al cilindro;
- air cooling fans, o ventilatori, contribuiscono alla termoregolazione del cilindro (insieme agli heaters), sono necessari nei casi in cui si debba asportare calore dal cilindro;
- motor, o motore (elettrico), dispositivo responsabile della rotazione della vite;

- gearbox, o riduttore di velocità, dispositivo meccanico interposto tra motore e vite necessario a ridurre la velocità proveniente dal motore e trasmessa alla vite;
- belt sheaves, o pulegge, accoppiano meccanicamente motore e riduttore; le pulegge possono essere sostituite da altri sistemi di collegamento (ad esempio giunti elastici);
- pressure sensor, o sensore di pressione, ha il compito di misurare la pressione generata dall'estrusore alla fine della vite;
- control panel, o pannello di controllo, è il "cervello" dell'estrusore, gestisce tutti i parametri di macchina comprese la velocità del motore e la termoregolazione.

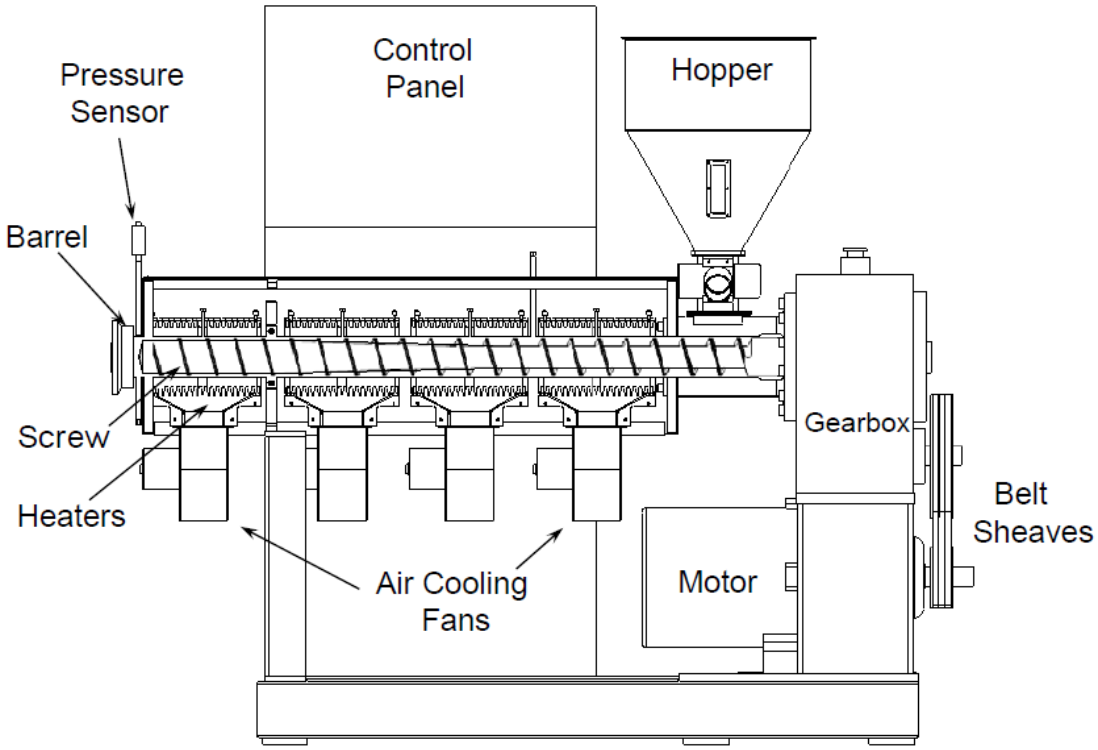

Figura 1.6: Macchinario per l'estrusione [11].

1.3.1 Le tre zone

L'estrusore si compone principalmente da tre zone (Figura 1.7): alimentazione (feeding zone), compressione o transizione (compression zone o transition zone) e dosaggio (metering zone). La divisione nelle tre zone è dovuta sia alle particolari caratteristiche geometriche che possiede la vite in ogni sezione sia alla fisica che avviene in esse.

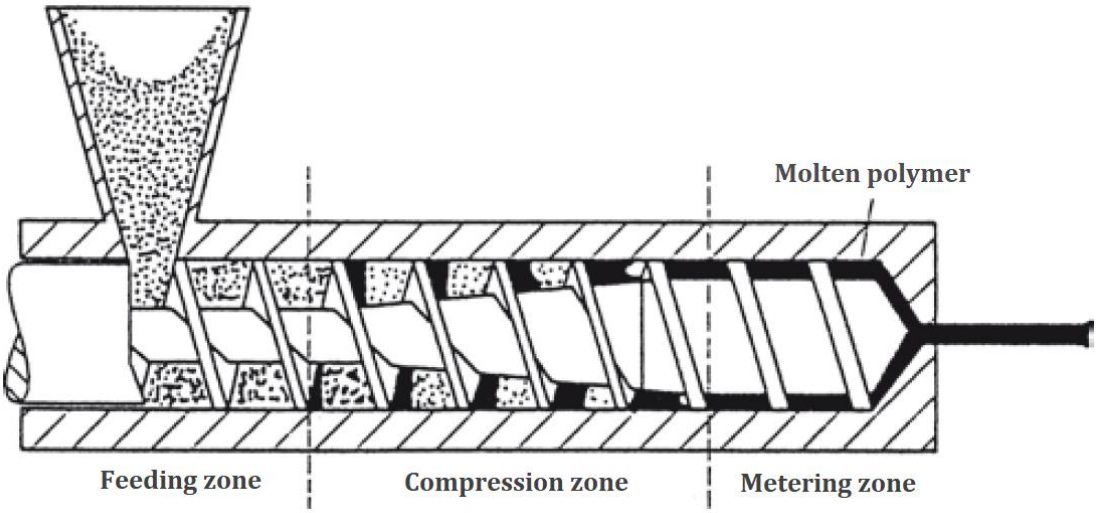

Figura 1.7: Le tre zone della vite di estrusione [12].

La zona di alimentazione è la zona iniziale della vite e parte dalla tramoggia. Qui entra il materiale solido grezzo che viene trasportato avanti verso le zone successive, viene compresso e preriscaldato. La vite, in questo tratto, possiede tipicamente un nocciolo dal diametro costante, minore di quello della zona di metering. Il canale dove passa il materiale è dunque ampio. La zona di alimentazione deve essere in grado di fornire alle zone successive la quantità di materiale che queste ultime sono in grado di processare. Una insufficiente capacità di alimentazione della zona genera fluttuazioni, anche se regolari, di portata in uscita dall'estrusore, mentre una sovrasaturazione delle zone di compressione e dosaggio genera fluttuazioni eccessive e irregolari di portata in uscita. Tutte le fluttuazioni sono indesiderate perché significa che lo spessore del film, ad esempio nel caso di produzione di film in bolla, risulterà incostante. Uno degli obiettivi degli impianti industriali può essere la massimizzazione della produttività e perciò ogni elemento che costituisce l'impianto deve essere progettato e costruito per poter gestire, analizzare, processare la massima quantità di materiale possibile. Ciò si riflette su ogni zona dell'estrusore e per quanto riguarda la zona di alimentazione, la massima capacità di trasporto si ottiene con:

1) Grande profondità del canale; più è profondo il canale più materiale può contenere, la profondità del canale è data dal diametro del nocciolo della vite, il quale non può essere ridotto a piacere perché la vite, in base al materiale con cui è stata costruita, deve possedere sufficiente resistenza torsionale e quindi un diametro minimo;
2) Basso coefficiente di attrito tra materiale e superficie della vite; questo coefficiente di attrito determina lo scorrimento che avviene tra la vite e il polimero, se non ci fosse scorrimento e quindi un coefficiente di attrito elevato, il materiale ruoterebbe solidalmente alla vite senza che avvenga del trasporto in direzione assiale;
3) Alto coefficiente di attrito tra materiale e superficie del cilindro; questo coefficiente di attrito determina lo scorrimento che avviene tra il cilindro e il polimero, un valore elevato consente il movimento del polimero in direzione assiale e quindi favorisce il trasporto;
4) Regolazione dell'angolo d'elica della vite secondo gli effettivi coefficienti di attrito.

Il materiale processato nella zona di alimentazione è chiamato bulk. Per capire cosa è il bulk si può passare attraverso la definizione di una sua proprietà ovvero il volume di bulk:" *The volume of a solid material including the open and closed internal pores*" [13]. Il volume di bulk è il volume occupato

dai granuli di materiale plastico unitamente allo spazio presente tra di essi. Da questa definizione può derivare quella di densità del bulk:" *Mass per unit volume of a bulk material*…" [13], ovvero il rapporto tra la massa dei granuli presenti in un volume di bulk e il volume di bulk stesso.

La zona di compressione o di transizione è così chiamata perché in essa avviene la transizione del polimero, da stato solido a stato viscoso. Qui le particelle solide, o granuli, coesistono fianco a fianco con il materiale già fuso. Il punto di inizio e di fine della transizione del polimero, nonché la lunghezza della zona di transizione dipendono molto dalla capacità di trasporto della vite e dalla quantità di materiale presente nel tratto durante il funzionamento continuo. In ottica di massimizzazione della produttività il punto di transizione può essere spostato maggiormente verso la zona di alimentazione, prestando attenzione che non si verifichi adesione tra polimero e vite e scorrimento tra polimero e cilindro. Il punto di transizione, contrariamente a prima, si sposta in avanti, se si aumenta la velocità di rotazione della vite, quindi il range di velocità a cui può lavorare la vite non è elevato. La zona di transizione non ha solo il compito di plastificare o fondere il materiale, ma anche quello di condurlo nella zona di dosaggio sotto forma di un fuso compatto privo di bolle d'aria o altri componenti gassosi.

La fusione progressiva del materiale nella zona di transizione avviene in un modo ben definito. Le particelle di materiale si muovono molto velocemente lungo la superficie della vite finché incontrano una grande forza di taglio tra il nocciolo della vite e il sottile strato di materiale fuso aderente alle pareti del cilindro. Esse sono distribuite adiacenti alle pareti del cilindro fino a quando non incontrano una faccia del filetto della vite. Qui si mescolano con il materiale già fuso e si muovono verso il basso lungo il filetto, dunque seguono un movimento rotatorio. Questo movimento rotatorio inizialmente è ristretto in una regione adiacente al filetto posteriore (rispetto alla direzione di avanzamento del materiale) del canale, mentre nella regione opposta è contenuto materiale ancora solido. La porzione di canale contenente materiale fuso aumenta procedendo verso l'uscita dell'estrusore finché non il canale non è completamente riempito di polimero fuso e omogeneo. Per migliorare la capacità di mescolamento e omogeneizzazione della zona di transizione è possibile diminuire la profondità del canale e aumentare la contro-pressione. In base a quanto avviene nella zona di transizione è possibile individuare quattro aree all'interno del canale, visibili in Figura 1.8:

- Regione *a*: un sottile film di materiale fuso è a contatto con la superficie del cilindro. Esso è il risultato del riscaldamento esterno e dello sforzo di taglio. Il filetto funge da raschiatore e permette l'accumularsi del materiale nella Regione 2;
- Regione *b*: la pozza di polimero fuso aumenta di dimensione durante l'avanzamento del materiale verso l'uscita. Essa si trova addossata alla faccia anteriore del filetto e occupa lo spazio fino al nocciolo della vite. Qui il fuso compie un movimento rotatorio grazie all'avanzamento del filetto lungo la parete del cilindro;
- Regione *c*: regione di transizione in cui i pellet costantemente rammolliti sono incorporati nel fuso che ricircola nella regione 2. Le particelle che entrano a far parte della pozza di liquido (regione 2) sono completamente fuse. Il calore richiesto per la fusione proviene in parte dal cilindro riscaldato e in parte dalla conversione di energia meccanica;
- Regione *d*: regione adiacente alla faccia posteriore del filetto in cui sono presenti i granuli ancora solidi, denominata anche letto solido. I granuli qui presenti rimpiazzano in modo continuo quelli fusi della regione 3 che sono incorporati nella regione 2.

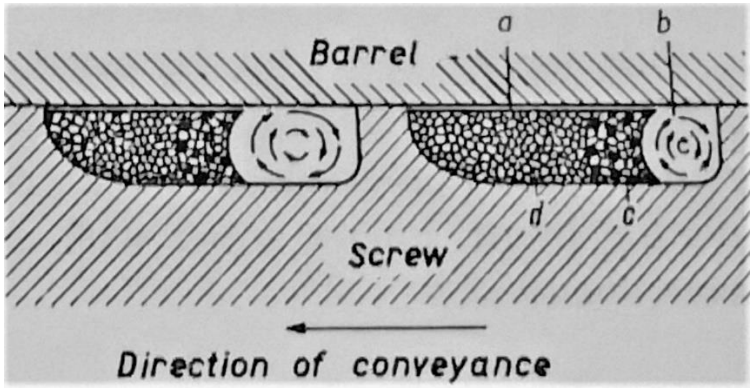

Figura 1.8: Le quattro regioni individuabili nella zona di transizione in due canali successivi. a) film di materiale fuso, b) pozza di liquido con fuso ricircolante, c) regione di transizione con polimero rammollito, d) letto solido con granuli solidi [14].

Il processo di fusione avviene sia a ridosso della superficie del cilindro sia sul contorno della regione *b* che si interfaccia con la regione *c* e la quantità relativa di materiale fuso proveniente dalle due zone dipende dal tipo di materiale, dalla geometria della vite e dalle condizioni operative. Nella zona di transizione, o di compressione, il diametro di nocciolo aumenta procedendo verso l'uscita dell'estrusore.

La zona di dosaggio riceve il materiale fuso o plastificato dalla zona di transizione col fine di omogeneizzarlo, eventualmente scaldarlo ed estruderlo nella filiera a una data pressione e con una portata costante. L'efficacia dell'omogeneizzazione è realizzata attraverso un effetto intensivo di mescolamento operato dagli sforzi di taglio viscosi e un effetto estensivo di mescolamento ad opera del flusso di materiale dovuto alla pressione e al flusso di materiale che avviene trasversalmente nel canale. L'effetto di omogeneizzazione, così come le altre funzioni della zona di dosaggio, ovvero la generazione di pressione e il controllo della temperatura tramite riscaldatori o refrigeratori esterni sono ottimizzate e migliorate con la realizzazione di un canale lungo e stretto. In questa zona il diametro di nocciolo e quindi anche la profondità dal canale sono costanti.

Sono stati effettuati numerosi studi per quanto riguarda la zona di dosaggio. Una analisi semplificata, che si basa su alcune assunzioni che la discostano in parte dalla realtà, ma la rendono comunque valida per un dimensionamento di massima e per la comprensione dell'importanza delle grandezze in gioco, ha portato a una formulazione analitica del calcolo della portata volumetrica Q [m^3/s] [14] [15]:

$$Q = Q_D - Q_P - Q_L \qquad (4)$$

Dove:

- Q_D, la drag flow, è la portata generata dalle forze applicate al melt (o fuso) dalla rotazione relativa della vite di estrusione rispetto al cilindro [m^3/s];
- Q_P, la pressure flow, è la portata che si genera a causa dei gradienti di pressione; può essere paragonata ad un flusso di materiale in un tubo [m^3/s];
- Q_L, la leakage flow, è la portata sopra le creste dei filetti quando questi sono usurati, è dovuta al gradiente di pressione, sarà approfondita nel capitolo 1.3.3 [m^3/s].

Nella Figura 1.9 è possibile vedere la direzione delle varie portate rispetto alla direzione generale del flusso di materiale che attraversa l'estrusore. La drag flow Q_D è l'unica che contribuisce al trasporto di materiale verso la filiera, mentre la pressure flow Q_P e la leakage flow Q_L hanno verso opposto alla Q_D e per questo nella (4) compaiono con il segno meno.

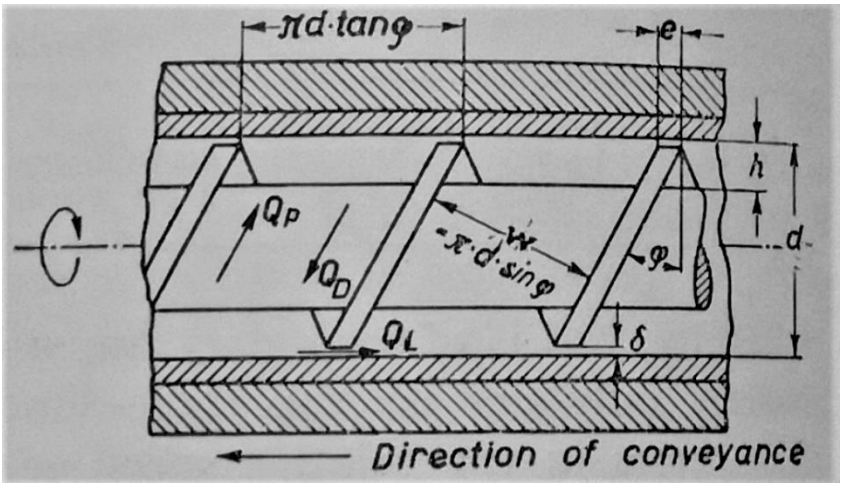

Figura 1.9: Parametri geometrici della vite e portate di materiale [14].

Il primo termine che compare nella (4), ovvero la drag flow Q_D, è calcolata come:

$$Q_D = \frac{\pi^2 \, d^2 \, h \, n \, sin\varphi \, cos\varphi}{2} \tag{5}$$

Mentre il secondo termine, ovvero la pressure flow Q_P è calcolata come:

$$Q_P = \frac{\pi \, d \, h^3 \, sin^2\varphi}{12 \, \eta} \cdot \frac{p_2 - p_1}{l_2} \tag{6}$$

Nelle due formule (5) e (6) per il calcolo analitico della portata, anche in relazione alla Figura 1.9 sono presenti:

- d: diametro nominale della vite o cilindro [m];
- h: altezza della cresta del filetto, o profondità del canale [m];
- n: velocità di rotazione della vite [rad/s];
- φ: angolo di inclinazione dell'elica [rad];
- η: valore di viscosità [Pa*s];
- p_1: pressione all'inizio della zona di metering [Pa];
- p_2: pressione al termine della zona di metering [Pa];
- l_2: lunghezza della zona di metering [m].

Uno dei presupposti più forti per giungere al calcolo delle portate di cui sopra è quella di aver considerato la viscosità come una costante lungo tutto il tratto di metering, presupposto che è conseguenza di altre due ipotesi. La viscosità del polimero infatti, dipende sia dalla temperatura sia dallo shear rate. Per avere un valore costante di viscosità si è assunto che il sistema sia isotermo e che il flusso e il materiale abbiano comportamento il più Newtoniano possibile. In realtà esistono variazioni sia di temperatura che di shear rate non sono lungo lo sviluppo della vite ma anche in direzione trasversale al canale (ovvero in direzione radiale rispetto alla vite) che rendono i valori di

viscosità del polimero fuso molto differenti tra di loro in funzione del punto del canale in cui si trovano. Un'altra ipotesi è stata quella di considerare la profondità del canale *h* piccola rispetto alla sua larghezza *w* e rispetto al diametro *d* della vite, indicativamente un rapporto di $h/w \approx 0,1$ e $h/d \approx 0,07$. Non è raro che le viti costruite e comunemente utilizzate possiedano queste caratteristiche geometriche e per esempio la vite che sarà oggetto della tesi è dotata all'incirca di queste proprietà. Un'ulteriore ipotesi che riguarda la geometria è l'aver considerato uno spessore della filettatura *e* molto minore del passo della vite ($e << \pi \cdot d \cdot \tan\varphi$). Le ultime ipotesi che hanno permesso di giungere alla formulazione analitica della portata sono state: ritenere che la lunghezza dell'elica sia tale che per una data profondità del canale e con una contropressione adatta la zona di dosaggio non si trovi sovralimentata dalle zone precedenti e che la pressione del polimero fuso abbia una crescita lineare e costante lungo la zona di metering.

Le formulazioni analitiche non bastano quando si devono compiere studi del processo di estrusione più approfonditi, come nel caso della presente tesi. Si deve ricorrere perciò ad un approccio numerico il quale pur basandosi su alcune semplificazioni restituisce risultati più accurati e affidabili della via analitica. Le equazioni da risolvere saranno dunque quelle della conservazione della massa, della conservazione della quantità di moto e della conservazione dell'energia totale. La risoluzione delle equazioni può avvenire nelle tre dimensioni spaziali. Il calcolo in una dimensione, per quanto riguarda l'estrusione, non è applicabile poiché il materiale ha un moto tridimensionale. Il calcolo in due dimensioni può già restituire risultati accettabili poiché, ipotizzando di svolgere l'elica del filetto, il materiale, che comunque segue una traiettoria elicoidale all'interno del canale, può essere ben approssimato da un sistema bidimensionale. Il calcolo in tre dimensioni è computazionalmente più dispendioso dei primi due ma restituisce risultati senz'altro più accurati.

È opportuno spendere qualche parola anche sulla generazione di calore viscoso dei polimeri. Questa componente di calore è indispensabile poiché rende il processo di estrusione e in particolare la fase di fusione sia tecnicamente possibile sia economicamente sostenibile. Il trasferimento di calore solamente per conduzione infatti non potrebbe riscaldare tutto il polimero omogeneamente e in tempi rapidi a causa delle proprietà isolanti delle materie plastiche. La viscosità e gli sforzi di taglio che danno origine a gradienti di velocità (shear rate) all'interno del fluido permettono la dissipazione di energia meccanica (proveniente dal motore che mette in rotazione la vite) in calore a causa degli attriti interni o viscosi del materiale. Nel caso di shear unidirezionale, la generazione di calore per attriti viscosi per unità di volume $\dot{E}_d$ vale [16]:

$$\dot{E}_d = \tau\,\dot{\gamma} \qquad (7)$$

Dove τ è lo sforzo tangenziale [Pa] e $\dot{\gamma}$ lo shear rate [1/s]. E inserendo la (1) nella (7) si ottiene:

$$\dot{E}_d = \eta\,\dot{\gamma}^2 \qquad (8)$$

Dove è possibile osservare che la generazione di calore è direttamente proporzionale alla viscosità ma proporzionale al quadrato dello shear rate che dunque assume molta importanza nella quota di generazione di calore.

1.3.2 Punto di funzionamento

L'estrusore ha il compito di preparare il materiale, fondendolo e omogeneizzandolo, per la lavorazione successiva. Il fuso sarà costretto a fluire in una filiera con uno o più condotti e con lunghezze differenti a seconda del prodotto che si desidera ottenere. L'estrusore quindi si troverà a operare sempre accoppiato alla filiera e da questa non può essere indipendente. Il punto di funzionamento dell'estrusore dipenderà dall'estrusore stesso ma anche dalla filiera, più precisamente dalle loro curve caratteristiche. Il sistema così composto è analogo ad un sistema costituito da pompa e circuito idraulico, il primo possiede una curva caratteristica interna di funzionamento e il secondo ha una curva caratteristica esterna, il punto di funzionamento è il punto di intersezione delle due curve. La pompa, pur permettendo diversi livelli di performance, si trova a lavorare nel punto in cui il circuito glielo permette. Nel sistema di estrusione l'estrusore si comporta come la pompa e la filiera come il circuito idraulico. L'interazione tra la vite e la filiera è rappresentata dalla dipendenza della portata di materiale dalla pressione che si genera tra estrusore e filiera.

L'estrusore possiede una caratteristica decrescente, con una portata massima quando la pressione è minima o nulla, e una portata minima o nulla quando la pressione è massima o l'uscita è chiusa. In riferimento alla (4) della portata volumetrica, una volta stabilita la geometria e la velocità di rotazione della vite la portata Q_D è fissata. Il termine Q_P assume significato e sempre più importanza qualora esista differenza di pressione nella zona di metering o più genericamente esista una pressione al termine dell'estrusore, assumendo una crescita lineare della pressione nella zona. L'assunzione è da ritenersi valida poiché proprio su di essa si basa la formulazione delle portate. La portata Q_L, in questo sottoparagrafo, è considerata trascurabile. Se la pressione allo scarico dell'estrusore fosse nulla anche il termine Q_P sarebbe nullo e dunque la portata Q sarebbe costituita solamente dal termine Q_D e sarebbe massima poiché non ci sarebbero termini sottraendi. Al crescere della pressione, Q_P aumenta e perciò, sottraendo il suo valore a quello di Q_D, si otterrà un risultato di Q totale inferiore. Il caso limite si presenta con la bocca di uscita tappata, la pressione è la massima generabile e il suo valore permette alla portata Q_P di essere della stessa entità della portata Q_D, per una portata totale Q pari a zero.

La filiera possiede una caratteristica crescente che parte dall'origine. La filiera può essere assimilata a un tratto di tubazione o condotto. Uno dei due capi è collegato al termine dell'estrusore mentre l'altro scarica in atmosfera. Nel condotto fluisce liquido, o polimero fuso, solamente se ai due capi è presente una differenza di pressione. Se la pressione al termine dell'estrusore è nulla allora la portata di materiale nel condotto è nulla. Aumentando la pressione a monte del condotto la portata di materiale che lo attraversa aumenta sempre di più. La portata della filiera Q_{fil}, assunta come un condotto, è descritta, sfruttando la semplificazione fluido Newtoniano, dalla relazione [14]:

$$Q_{fil} = \frac{\pi r^4}{8 L} \cdot \frac{\Delta P}{\eta} \qquad (9)$$

Nella (9) r è il raggio del condotto [m], L la lunghezza del condotto [m], ΔP la differenza di pressione ai capi del condotto [Pa] e η la viscosità del polimero fuso [Pa*s].

Il punto di funzionamento dell'estrusore risulta dunque l'intersezione della caratteristica dell'estrusore con la caratteristica della filiera, come mostrato in Figura 1.10. Le caratteristiche sono rappresentate per semplicità con delle rette.

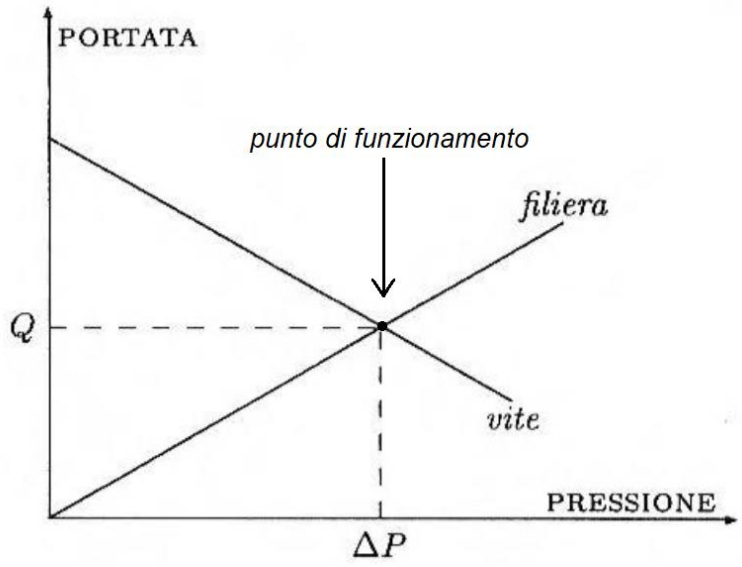

Figura 1.10: Punto di funzionamento estrusore [6].

La pendenza e la posizione (termine noto) delle rette possono essere variate modificando solo la geometria di vite e filiera purché le condizioni operative, quali velocità di rotazione della vite e temperatura, e il materiale rimangano costanti.

La retta che rappresenta la caratteristica della filiera interseca sempre l'origine degli assi poiché se ai capi del condotto "equivalente" non vi è differenza di pressione, o caduta di pressione, il polimero fuso non può fluire. Mantenendo invariata la lunghezza del condotto è possibile ragionare sul suo diametro per poter modificare la pendenza della retta. Si supponga che ai due capi del condotto esista una certa differenza di pressione e dunque si abbia una portata di materiale nota. Diminuendo il diametro di tale condotto si aumentano le resistenze esercitate dal tubo sul materiale e dal materiale sul materiale stesso a causa del suo comportamento non Newtoniano e ne consegue una diminuzione della portata. Se a parità di pressione si ha una diminuzione della portata significa che la retta ha una pendenza minore. La riduzione del diametro dunque, a parità delle altre condizioni sopra esposte, ha come conseguenza il decremento del coefficiente angolare della retta. Un canale più stretto presenta pertanto una caratteristica meno pendente rispetto a quella di un canale più largo.

La retta che rappresenta la caratteristica dell'estrusore ha sempre massima portata in corrispondenza dell'asse delle ordinate, ovvero per pressione pari a zero. L'unica componente di cui è costituita la portata totale è la drag flow la quale, fissati diametro e passo della vite e velocità di rotazione dipende in maniera direttamente proporzionale dalla profondità del canale. L'intersezione della caratteristica dell'estrusore con l'asse delle ordinate si sposta proporzionalmente alla profondità del canale. Se la profondità del canale aumenta allora di conseguenza l'intersezione si sposta verso valori di portata maggiori. Quando inizia ad aumentare la pressione al termine dell'estrusore interviene la pressure flow, ovvero la componente di portata dovuta alla contropressione che agisce in direzione opposta alla drag flow. La portata perciò diminuisce sempre di più all'aumentare della pressione e per questo motivo la retta possiede una inclinazione negativa. La pressure flow dipende dal cubo della profondità del canale dunque l'incremento della profondità rende molto maggiore il peso che ha la pressure flow nel calcolo della portata. L'incremento del canale provoca dunque un aumento del coefficiente angolare della retta, il che significa che passa da valori assoluti maggiori a valori assoluti minori, essendo una pendenza negativa. L'unione delle due componenti di portata, all'aumentare della

profondità del canale, ha come conseguenza, rispetto a prima, un accrescimento della portata a basse pressioni, ma una portata che decresce molto più rapidamente fino ad annullarsi a pressioni più basse rispetto a quanto accade con un canale poco profondo. In altri termini, un canale profondo è più sensibile alle contro pressioni di uno poco profondo perché a fronte di un medesimo incremento di pressione la perdita di portata che si verifica nel canale profondo è maggiore di quella del canale poco profondo.

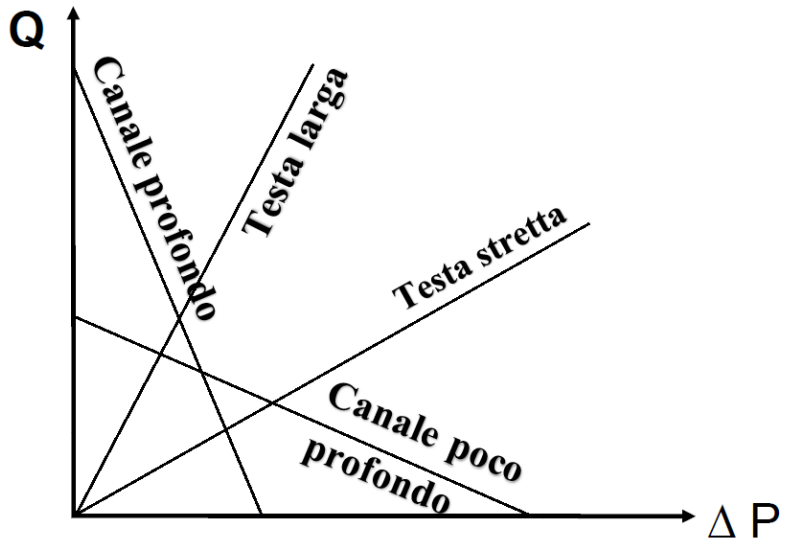

Figura 1.11: Influenza della profondità del canale dell'estrusore sulla caratteristica dell'estrusore e influenza del diametro del condotto della filiera sulla caratteristica della filiera.

Un discorso analogo può essere effettuato considerando la variazione delle temperature. La temperatura infatti, influisce sulla pendenza delle rette. Per comprendere meglio l'importanza che questo fattore possiede sulla inclinazione delle rette e sulla determinazione del punto di lavoro, o punto di funzionamento, si considerano fisse tutte le caratteristiche geometriche di vite e filiera così come la velocità di rotazione.

Si ipotizzi che estrusore e filiera lavorino il polimero a una certa temperatura T_1, dunque siano definite le due caratteristiche e il punto di lavoro *a*. Si supponga che la T_1 aumenti fino ad una temperatura T_2 (dunque $T_2 > T_1$) dapprima solo nella filiera, poi solo nell'estrusore e infine in entrambi. La variazione di temperatura ha effetti soprattutto sulla viscosità del polimero, infatti l'aumento di temperatura provoca la diminuzione della viscosità e viceversa. I nuovi punti di lavoro che ne conseguono sono rappresentati, per ogni caso, nella Figura 1.12.

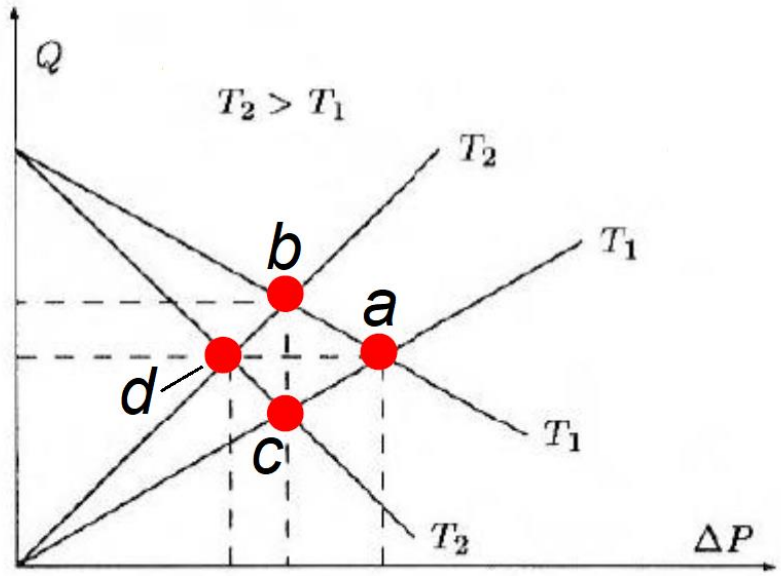

Figura 1.12: Influenza della temperatura sulle caratteristiche di estrusore e filiera e sul punto di lavoro [6].

Nel primo caso la caratteristica dell'estrusore rimane invariata, ma quella della filiera cambia. Come detto poco sopra, l'incremento della temperatura determina la diminuzione della viscosità e nella (9) si osserva che il valore della viscosità è a denominatore. Il decremento del denominatore ha come conseguenza l'aumento del coefficiente angolare e quindi della pendenza della retta. Il nuovo punto di funzionamento si trova in *b* dove, per un delta pressione minore si ha una maggiore portata di materiale lavorato.

Nel secondo caso la caratteristica della filiera resta invariata, ma cambia quella dell'estrusore. Similmente al primo caso la viscosità si trova a denominatore nella (6) e quindi la portata Q_P dovuta alla contropressione aumenta con il crescere della temperatura la cui conseguenza è la diminuzione della viscosità. Nella (4), la drag flow Q_D e poiché la portata sottratta Q_P aumenta, la portata totale Q risulta minore. Questo si traduce nel solo incremento della pendenza della caratteristica dell'estrusore, mentre l'intersezione tra essa e l'asse delle ordinate non cambia poiché la Q_D non varia. Il punto di lavoro si sposta in *c*, dove rispetto ad *a,* si ha la diminuzione sia della pressione sia della portata.

Il terzo caso si tratta della somma dei due precedenti. Entrambe le caratteristiche si modificano poiché la variazione della viscosità, originata dall'incremento della temperatura sia nell'estrusore sia nella filiera, ha effetto sia sulla (6), e quindi sulla (4), sia sulla (9). La combinazione dei due casi precedenti porta il punto di funzionamento in *d.* Qui è processata dall'intero sistema la stessa portata di materiale di *a* ma tramite la generazione di una pressione più bassa.

Si può ragionare ancora sugli effetti della sola velocità di rotazione della vite, considerando invariate la caratteristica della filiera e tutti gli altri parametri geometrici e operativi della vite. La velocità di rotazione modifica solamente la caratteristica della vite poiché compare solamente nel calcolo della drag flow. Nella (5) la velocità è direttamente proporzionale alla drag flow perciò l'incremento della velocità causa l'aumento della quota di portata spinta in avanti dalla vite. Il termine della portata dovuta alla contropressione dipende solamente dalla pressione che si genera al termine della vite e quindi la pendenza della caratteristica della vite non varia. L'incremento della velocità invece, aumentando la drag flow, causa anche l'aumento della portata totale elaborata dall'estrusore. Il fenomeno è rappresentato dallo spostamento della caratteristica verso l'alto, ovvero verso portate più

elevate (Figura 1.13). Il punto di funzionamento si muove verso pressioni maggiori e verso portate maggiori e l'entità dello spostamento dipende dalle inclinazioni delle caratteristiche di vite e filiera.

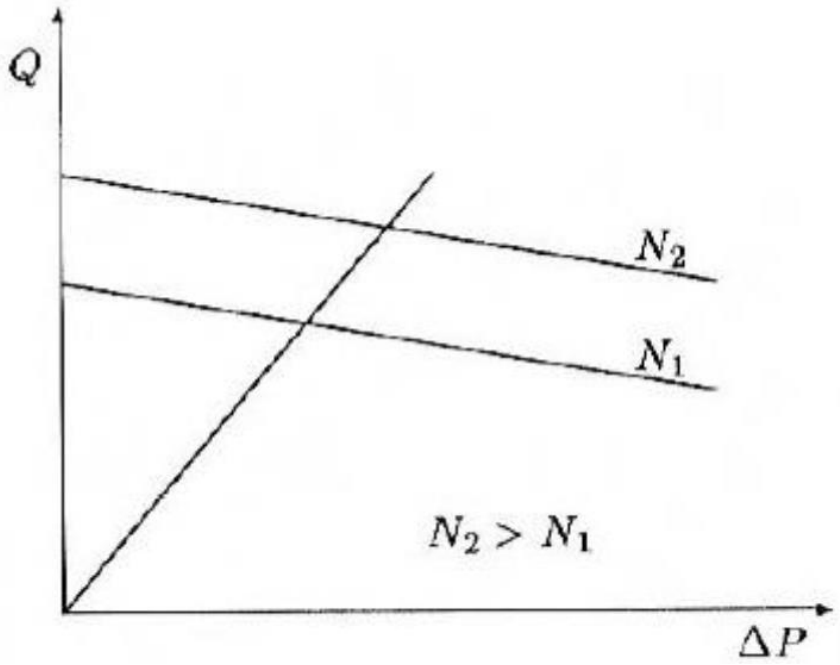

Figura 1.13: Effetto della velocità sulla caratteristica della vite [6].

1.3.3 L'usura, cause ed effetti

I componenti meccanici e in generale la maggior parte dei sistemi ingegneristici nei quali sono presenti corpi in movimento relativo fra loro possono incorrere in disfunzionamenti e/o peggioramenti delle performance a causa dell'usura che si verifica in questi componenti [17].

Nell'estrusore i componenti in movimento relativo sono la vite e il cilindro e inoltre all'interno dei canali scorre un fluido che può causare ulteriore usura. I fattori per cui vite e cilindro possono usurarsi sono molteplici [17] [18]:

- avvio a freddo della vite;
- funzionamento della vite in assenza di materiale;
- processamento del materiale sbagliato (ad esempio polimeri corrosivi per una vite non adatta ai polimeri corrosivi);
- riscaldamento disomogeneo del cilindro;
- vite e cilindro impropri e scorretto allineamento;
- non rettilineità della vite;
- additivi abrasivi nella formula del polimero;
- errato materiale della vite e/o del cilindro;
- corrosione dovuta al polimero o alla degradazione degli additivi.

Tutti questi fattori si ricollegano a tre principali fenomeni di usura: abrasiva, corrosiva e adesiva. L'usura abrasiva è causata dalle particelle dure (ad esempio fibra di vetro, carbonato di calcio, ritardanti di fiamma) con cui sono additivati i polimeri. Lo scorrimento del polimero nel canale della vite ad alte pressioni e temperature causa fenomeni abrasivi ad opera delle particelle dure (in esso contenute) le quali strisciano e/o urtano le superfici metalliche di vite e cilindro. L'ammontare di

usura abrasiva dipende anche dalla durezza delle particelle, dalla loro forma e dimensione. Questo tipo di usura può essere ridotto tramite l'indurimento superficiale di vite e cilindro (ad esempio nitrurazione, cromatura). L'usura corrosiva si deve agli additivi corrosivi e/o alle particelle di polimero degradato che attaccano chimicamente i componenti dell'estrusore. La quota maggiore di usura corrosiva si presenta solitamente nella zona di metering dove le temperature sono più elevate e il materiale rimane per più tempo aumentando la possibilità che si degradino i prodotti. Gli effetti di questa usura possono essere diminuiti utilizzando gli stessi trattamenti superficiali che diminuiscono l'usura abrasiva. L'usura adesiva può avvenire invece dal contatto metallo-metallo tra cilindro e vite, la quale ruotando può causare un contatto momentaneo tra cresta del filetto e superficie del cilindro da cui si origina una sorta di piccola saldatura subito asportata (e con lei anche parte del metallo di vite o cilindro) dalla rotazione della vite. Questo fenomeno di usura può essere ridotto efficacemente o anche annullato da un corretto allineamento della vite nel cilindro e da una quanto più possibile rettilineità di vite e cilindro.

Sia vite che cilindro si usurano durante tutta la loro vita in servizio, ma la vite è progettata per usurarsi più velocemente del cilindro [19]. La prima conseguenza dell'usura che si può osservare è la riduzione della massima portata processabile dall'estrusore. La vite, che è progettata per ruotare all'interno del cilindro, possiede un diametro della filettatura leggermente minore del diametro del cilindro proprio per permettere la libera rotazione della vite. A progetto, il gap che si misura tra la cresta del filetto e la superficie del cilindro è di piccola entità (circa 0,001 volte il diametro del cilindro) ed è riempito da polimero fuso che funge la lubrificante. Polimeri non abrasivi ed un corretto allineamento della vite all'interno del cilindro possono garantire il funzionamento continuativo dell'estrusore per anche dieci anni, quasi senza che si verifichi usura. Quando vengono lavorati polimeri abrasivi, l'allineamento non è corretto o si verificano altri dei sopracitati fattori di usura allora i fenomeni di usura hanno conseguenze soprattutto sul filetto della vite, consumando per lo più la cresta del filetto e aumentando così il gap tra filetto e superficie del cilindro. All'aumentare del gap diminuiscono le prestazioni dell'estrusore, ovvero aumentano le temperature del polimero in uscita dall'estrusore, aumentano le instabilità di processo e diminuiscono le portate [20].

I primi segni del progredire dell'usura si manifestano con la diminuzione della portata di materiale processata dall'estrusore. Ad esempio, una vite dal diametro di 60 mm ha a progetto un gap di 0,06 mm tra cresta del filetto e cilindro e l'usura può portare questo gap fino a 0,4 mm. Quando si raggiunge un'usura così elevata si verifica un eccessivo trafilamento del materiale al di sopra del filetto e dunque la portata totale in uscita dall'estrusore risulta diminuita. Nel caso in cui si abbia una vite usurata è necessario aumentare la velocità di rotazione per mantenere invariate la portata di progetto e la pressione allo scarico originaria. Se l'estrusore lavora già a velocità prossime al suo valore massimo allora la perdita di portata dovuta all'usura non può essere più compensata dall'aumento della velocità. La massima quantità di usura accettabile è quella che rende ancora economicamente conveniente il processo di estrusione. Oltre a questo livello la vite deve essere sostituita con una nuova oppura può essere rigenerata fino a tre volte. L'usura può verificarsi in tutte le parti della vite, ma solitamente tende a essere maggiore laddove le pressioni in gioco sono maggiori e dunque nelle zone di transizione e di dosaggio [19].

La portata di materiale Q_L (leakage flow) che trafila al di sopra della cresta del filetto è presente nella (5) e può essere espressa analiticamente (con le dovute approssimazioni) come:

$$Q_L = \frac{\pi^2\, d^2\, \delta^3\, tan^2\varphi}{12\,\eta'\, e} \cdot \frac{p_2 - p_1}{l_2} \qquad (10)$$

Dove, in riferimento anche alla Figura 1.9:

- d: diametro nominale della vite o cilindro [m];
- δ: gap tra la cresta del filetto e la superficie del cilindro [m];
- φ: angolo di inclinazione dell'elica [rad];
- η': valore di viscosità [Pa*s];
- e: spessore del filetto [m];
- p_1: pressione all'inizio della zona di metering [Pa];
- p_2: pressione al termine della zona di metering [Pa];
- l_2: lunghezza della zona di metering [m].

La pressione del melt nell'estrusore evolve all'interno del canale seguendo il profilo elicoidale del canale stesso. Supponendo di sezionare longitudinalmente la vite, il filetto divide il canale in due camere, come rappresentato in Figura 1.14, le quali si trovano a pressioni differenti poiché sono ad una distanza pari ad una rivoluzione dell'elica. Se tra il filetto della vite e il cilindro non ci fosse un gap allora le due camere rimarrebbero isolate e non ci sarebbe una portata di trafilamento Q_L. Il gap invece è presente anche in una vite nuova, le due camere sono messe in comunicazione e si genera la portata di trafilamento. Aumentando molto il gap non solo la portata aumenta ma la capacità del filetto di mantenere pressioni diverse nelle due camere diminuisce ed estendendo questo discorso a tutta la vite, la capacità dell'estrusore di generare pressione diminuisce.

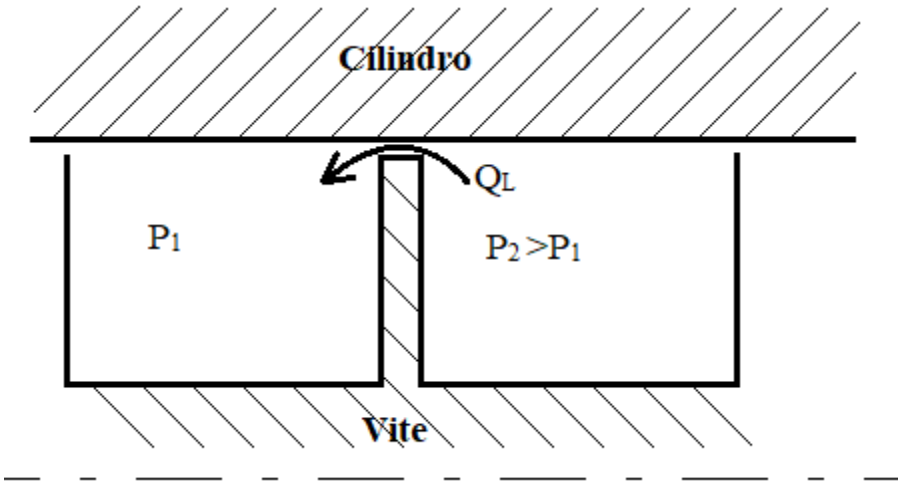

Figura 1.14: Portata di trafilamento Q_L.

Dalla (10) si nota che la portata che trafila è direttamente proporzionale al gradiente di pressione, dunque se le differenze di pressione sono più elevate allora la portata Q_L è maggiore. La portata che trafila dipende fortemente dal gap δ che c'è tra la cresta del filetto e il cilindro, infatti Q_L è direttamente proporzionale al cubo di δ, il che rende fondamentale il ruolo di questo parametro geometrico all'interno del calcolo e della stima della portata trafilata e di conseguenza di quella totale. Ad esempio, se il gap dovesse raddoppiare allora la portata trafilata risulterebbe otto volte maggiore rispetto a prima. Nell'equazione compare inoltre la viscosità η'. Essa possiede un apice poiché è diversa dalla viscosità η della (6) la quale è una proprietà del materiale che risiede nel canale della

vite e non sopra la cresta del filetto. La viscosità η' infatti è più bassa di η poiché al di sopra della cresta del filetto lo scambio di calore, la temperatura e gli shear rate sono maggiori che nel canale [14].

Una delle conseguenze che derivano dall'usura del filetto della vite è l'aumento delle temperature del polimero. L'aumento della temperatura dapprima rompe i legami deboli tra le macromolecole, ma successivamente rompe anche i legami covalenti portando alla degradazione chimica del polimero. La degradazione termica, che avviene sopra alla temperatura di fusione, può avvenire sia perché si raggiungono temperature troppo elevate sia perché il polimero è mantenuto ad alte temperature per un tempo troppo prolungato. La degradazione porta ad una perdita irreversibile delle proprietà meccaniche e ottiche del polimero estruso. La rottura dei legami covalenti porta alla formazione di specie volatili poiché dalla rottura delle macromolecole si formano delle molecole di piccole dimensioni che si trovano allo stato gassoso. Un'altra delle conseguenze della degradazione termica è l'ingiallimento del polimero fuso e quindi del prodotto finito e nei casi peggiori è possibile che si formino anche residui carboniosi (di colore nero) [21].

2 Costruzioni Meccaniche Luigi Bandera S.p.A

In questo capitolo è presente una descrizione dell'azienda Costruzioni Meccaniche Luigi Bandera S.p.A la quale ha permesso lo svolgersi della tesi e presso la quale sono state svolte le attività correlate ad essa. È tracciata brevemente la storia aziendale unitamente alla filosofia perseguita e successivamente sono introdotti i principali macchinari e impianti progettati e costruiti [22].

2.1 Storia e filosofia aziendale

L'azienda Costruzioni Meccaniche Luigi Bandera fu fondata ufficialmente nel 1947 da Luigi Bandera come officina meccanica specializzata nella costruzione di estrusori per le materie plastiche. Essa incominciò con la fabbricazione di estrusori per tubi e profilati in materie plastiche. Negli anni a seguire si è evoluta e trasformata fino ad arrivare alla progettazione e alla costruzione principalmente di tre linee di estrusione: linea di estrusione per film in bolla, linea di estrusione per lastre e linea di granulazione di PVC.

L'azienda, grazie al vasto know-how acquisito, al continuo contatto con i clienti e grazie anche allo spirito innovativo che spinge tutti i reparti, da quello dirigenziale fino a quello produttivo passando per quello tecnico e commerciale, riesce a offrire linee di estrusione flessibili, personalizzabili e ad alto contenuto tecnologico, oltre a porsi le basi per lo sviluppo di prodotti dagli standard sempre più elevati.

Il fondatore, Luigi Bandera, sosteneva che il bene primario della sua azienda erano le persone con il loro valore e questa filosofia è realizzata quotidianamente applicando onestà, trasparenza e rispetto in tutti gli aspetti aziendali.

Figura 2.1: Stemma della Costruzioni Meccaniche Luigi Bandera S.p.A [22].

2.2 Estrusori

L'azienda presso cui è stata svolta la tesi progetta e costruisce diversi tipi di impianti di produzione di film in materiali polimerici (impianti di film in bolla e testa piana) e impianti di granulazione. Tutti gli impianti hanno fondamento su un componente un particolare: l'estrusore. Questo è forse l'unico componente, dall'inizio della storia di Bandera S.p.A, che non è stato mai oggetto di questioni legate alla sua esternalizzazione. Una delle attività principali dell'azienda è infatti la progettazione e costruzione di estrusori, il cui know-how non è stato mai portato al di fuori dell'azienda stessa.

Sono progettati e fabbricati due tipi diversi di estrusore: il monovite, costituito da una sola vite e montato principalmente su impianti di film in bolla e il bivite costituito da due viti accoppiate che possono ruotare nello stesso verso (corotanti) o in verso opposto (controrotanti) e sono montati negli impianti testa piana.

L'azienda produce svariati estrusori monovite che si differenziano gli uni dagli altri per la taglia, ovvero per il diametro della vite, per la lunghezza, per gli elementi che lo costituiscono, per i profili e il numero delle filettature. Tutte queste differenze sono necessarie per garantire diversi livelli di produttività e per poter lavorare al meglio ogni famiglia di materiali. In Tabella 2.1 sono riportate le principali caratteristiche degli estrusori monovite costruiti da Bandera.

Tabella 2.1: Dati degli estrusori monovite costruiti da Bandera S.p.A.

Diametri [mm]	Lunghezza [D]	Degasaggio	Cilindro (zona di alimentazione)
50, 65, 75 85, 100,120, 140 160, 180, 200	30	no	Liscio, rigatura fine (dente di sega), scanalato rettangolare
Filetto	Profili barriera	Elementi mixanti	Pressioni massime [bar]
Un principio	A zona, energy transfer (ET)	Maddock, blister ring, pineapple	500

Tutti gli estrusori monovite sono alimentati da dosatori gravimetrici. Sulla bocca di uscita degli estrusori sono presenti filtri (montati su appositi cambia-filtri) costituiti da reti metalliche a maglie fini che impediscono il passaggio di impurità o corpi estranei.

Anche gli estrusori bivite possiedono diverse caratteristiche che li rendono adatti di volta in volta ai materiali che si vogliono processare e alle portate di materiale che si vogliono raggiungere. Essi sono generalmente di dimensioni maggiori rispetto ai monovite e lavorano materiali differenti.

2.3 Film in bolla

La linea di estrusione di film in bolla produce film monostrato e multistrato per imballaggio tecnico, applicazioni nei settori food e medico farmaceutico, film agricolo, film biodegradabile e geomembrane.

Figura 2.2: Linea di estrusione film in bolla [22].

La linea di estrusione di film in bolla (Figura 2.2) si compone da:

- sistema di dosaggio del materiale il quale miscela e misura la quantità di materiale introdotto nell'estrusore;
- sistema di estrusione che comprende motore, riduttore, vite e cilindro di estrusione il quale è riscaldato da resistenze elettriche e raffreddato da ventilatori. Esso fonde il materiale, lo omogenizza e lo manda in pressione;
- testa la quale raccoglie il materiale fuso dagli estrusori e lo dispone in una corona circolare per formare una sorta di tubo;

- sistema di soffiaggio e traino del film. Il primo espande e raffredda il tubo diminuendo lo spessore del film e il secondo esporta il materiale finito permettendo la produzione di nuovo film;
- sistema di avvolgimento il quale provvede ad avvolgere il film su bobine.

Questo tipo di linea permette di produrre film dallo spessore di poche decine di micron a partire da granuli di plastica sia riciclata che vergine. Il grande pregio di questo macchinario consiste nella sua flessibilità e varietà di produzione, infatti può essere variato il numero di strati (da 1 a 11) di cui si comporrà il prodotto finale, lo spessore di ogni strato, la produzione totale oraria, la larghezza del film e le modalità di avvolgimento.

2.4 Testa piana

La linea di estrusione testa piana permette di produrre film rigido in bobine e foglia ad alto spessore destinati principalmente ai settori della termoformatura e del converting.

Figura 2.3: Linea di estrusione testa piana [22].

La linea di estrusione testa piana (Figura 2.3) si compone di sistema di dosaggio, sistema di estrusione e sistema di avvolgimento, così come per il film in bolla. La testa, invece di disporre il materiale in una corona circolare lo dispone lungo una linea. Il materiale si riversa in una calandra la quale lo assottiglia e lo raffredda.

Questa linea permette di produrre film fino a pochi millimetri di spessore e possiede tutte le versatilità e vantaggi della linea precedente.

2.5 Impianto di granulazione PVC

Gli impianti di granulazione permettono di trasformare PVC da riciclo in granuli utilizzabili come materia prima per altri prodotti.

Questo impianto (Figura 2.4) è costituito da sistema di dosaggio e sistema di estrusione come le due linee precedentemente descritte. Sulla parte terminale dell'estrusore è presente una piastra forata attraverso cui passa il materiale fuso; esso esce sotto forma di fili spessi che vengono tagliati da una lama rotante. I granuli così prodotti vengono aspirati e inviati ai sacchi per lo stoccaggio.

L'impianto di granulazione presenta poca variabilità dei parametri poiché il prodotto finale è molto standardizzato. Proprio per questo presenta un'elevata efficienza e specializzazione che rende elevato lo standard qualitativo del granulo.

Figura 2.4: Impianto di granulazione [22].

3 Operazioni preliminari

Nel capitolo sono esposti i criteri adottati per effettuare la scelta dell'estrusore da studiare, dei materiali da analizzare e del software da utilizzare per le simulazioni numeriche. Dopo aver trattato i criteri si descrivono, per ogni componente, le scelte adottate. Per quanto riguarda l'estrusore sono esposte le principali caratteristiche. I materiali sono presentati attraverso le loro proprietà fisiche e le prove in laboratorio che hanno permesso la loro caratterizzazione. Il software selezionato è descritto tramite la comparazione con gli altri software presi in considerazione.

3.1 Scelta estrusore

L'estrusore è stato scelto seguendo principalmente due criteri e trovando un compromesso che potesse rispettarli il più possibile.

Il primo criterio di scelta è stato la frequenza di utilizzo, ovvero si è cercato un estrusore che fosse impiegato molto spesso nelle linee per estrusione di film in bolla. Ciò avrebbe permesso una più rapida e completa raccolta di dati di processo reali, che sarebbero serviti poi per impostare le simulazioni numeriche a computer e per poter effettuare un confronto tra prove sperimentali e risultati numerici. Inoltre, lo studio avrebbe acquisito un'importanza maggiore dal punto di vista industriale.

Il secondo criterio è stato la semplicità costruttiva e di processo, ovvero l'estrusore avrebbe dovuto avere una geometria semplice da modellare nell'ambiente di simulazione e sarebbe dovuto essere caratterizzato da una fisica anch'essa semplice, per quanto possibile. L'estrusore avrebbe dovuto avere un solo filetto e non possedere profili barriera, zone di degasaggio o elementi miscelatori. Questo criterio è stato adottato perché lo studio che è stato svolto in questa tesi non era mai stato realizzato dall'azienda, dunque si è scelto di iniziare ad analizzare una realtà poco articolata. La semplicità costruttiva permetterebbe di effettuare eventualmente prove sperimentali utili a testare l'affidabilità delle simulazioni numeriche a costi più contenuti.

Tra i numerosi estrusori monovite prodotti da Bandera si è scelto dunque di analizzarne uno a 3 zone dalle principali caratteristiche presentate in Tabella 3.1:

Tabella 3.1: Caratteristiche principali dell'estrusore scelto per lo studio.

Diametro cilindro	65 mm	Zona alimentazione	585 mm
Lunghezza totale	30 diametri	Zona compressione	662 mm
Passo vite	65 mm	Zona dosaggio	715 mm
Numero filetti	1	Rapporto di compressione	1:2,2
Spessore filetto	6 mm		

Questo modello di vite possiede un buon compromesso tra i due criteri sopracitati. La vite in questione è infatti largamente utilizzata da Bandera in vari campi di applicazione, inoltre è in grado di processare diversi materiali (ad esempio LDPE, EVOH, Nylon), infine affianca sempre altri estrusori nella produzione di film multistrato. È montata soprattutto in impianti soffio ovvero sulle linee per estrusione di film in bolla. La geometria, così come i processi fisici che avvengono all'interno dell'estrusore, sono tra i più semplici che si possono trovare nell'intera gamma di estrusori.

3.2 Scelta materiale e raccolta dati

Il materiale è stato selezionato sulla base di uno dei due criteri utilizzati per la scelta dell'estrusore, ovvero sulla frequenza di utilizzo. L'uso di un materiale comune avrebbe reso più rapida e semplice la raccolta dei dati relativi alle proprietà fisiche dello stesso. Inoltre, similmente a prima, lo studio avrebbe potuto avere un campo di applicazione più ampio e quindi importanza maggiore in ottica industriale.

Lo studio di un solo materiale avrebbe restituito risultati troppo particolari allora si è optato per utilizzare più di un materiale. In questo modo si è potuto confrontare il comportamento della macchina con diverse ricette. Nella realtà infatti, un singolo estrusore, è progettato principalmente per lavorare una famiglia di polimeri (e già non per un solo tipo), ma capita molto spesso che venga sfruttato per lavorare diversi altri materiali. Le simulazioni sono state condotte utilizzando tre materiali diversi per individuare con più sicurezza le caratteristiche proprie dell'estrusore. L'uso di un solo materiale infatti non avrebbe permesso di capire se gli andamenti delle grandezze in gioco (ad esempio pressioni e temperature) fossero dovuti alle particolari proprietà di quel materiale o piuttosto alle proprietà dell'estrusore.

I materiali scelti sono stati:

- Exceed 1018 HA, un polietilene metallocenico lineare a bassa densità (mLLDPE);
- 30 LD150BW – 70 LL1001XV, una miscela composta al 30% di polietilene a bassa densità (LDPE) e al 70% di polietilene lineare a bassa densità (LLDPE);
- 70 LD150BW – 30 LL1001XV, una miscela composta dagli stessi componenti del materiale precedente, ma a percentuali invertite: 70% di LDPE e 30% di LLDPE.

Una volta effettuata questa scelta, si è reso necessario reperire i dati relativi alle proprietà fisiche e reologiche dei polimeri. Alcuni dati sono stati ritrovati nelle schede tecniche fornite dai produttori. Le proprietà mancanti sono state reperite con prove in laboratorio ad hoc.

3.2.1 Densità

La densità del polimero allo stato solido è stata l'unica proprietà che è stato possibile prelevare dalle schede tecniche fornite dai produttori. Il valore di densità delle miscele è stato calcolato come media ponderata delle densità dei singoli componenti, dove ogni componente aveva un peso pari alla percentuale di composizione della miscela.

Le densità del bulk e del polimero fuso sono state determinate rispettivamente sulla base di informazioni acquisite dall'azienda e provenienti dai produttori di sistemi di dosaggio e sulla base di valori tipici reperiti dalla letteratura e suggeriti dal software utilizzato.

Nella Tabella 3.2 sono riportati i valori di densità calcolati e stimati dei tre materiali presi in considerazione.

Tabella 3.2: Densità dei materiali oggetto della tesi.

Materiale	*Densità bulk [kg/m³]*	*Densità solido [kg/m³]*	*Densità fuso [kg/m³]*
Exceed 1018 HA	550	918	760
30 LD150BW – 70 LL1001XV	550	919,5	760
70 LD150BW – 30 LL1001XV	550	921,5	760

All'interno del processo di estrusione, la portata volumica di materiale lavorato dipende in maniera importante dalle caratteristiche geometriche di vite e cilindro e dalle pressioni generate all'interno dell'estrusore e presenti nella sua parte terminale, come esposto nel capitolo 1.3.1. La trasformazione da portata volumica a massica è operata dalla densità, la quale è moltiplicata per la portata in volume. A parità di portata in volume, la portata in massa differisce anche di molto a seconda della densità del polimero considerato. Per i materiali scelti le densità non differiscono di molto le une dalle altre.

3.2.2 Viscosità

La viscosità, così come le proprietà nei capitoli successivi, è stata misurata tramite prove in laboratorio ad hoc. Le curve reologiche, ovvero l'andamento della viscosità in funzione dello shear rate, dei tre polimeri sono state tracciate grazie a un reometro a capillare (Goettfert mod. Rheo-Tester 2000), per tre differenti temperature (170 °C, 200°C e 230°C). Il reometro ha fornito dati di viscosità apparente (Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3) i quali dovranno essere corretti per avere valori di viscosità reale.

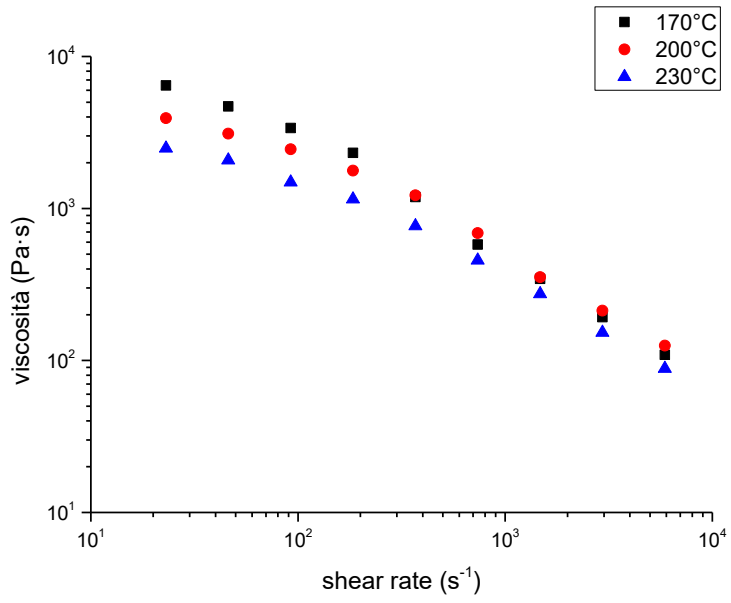

Figura 3.1: Curva di viscosità apparente, materiale Exceed 1018 HA.

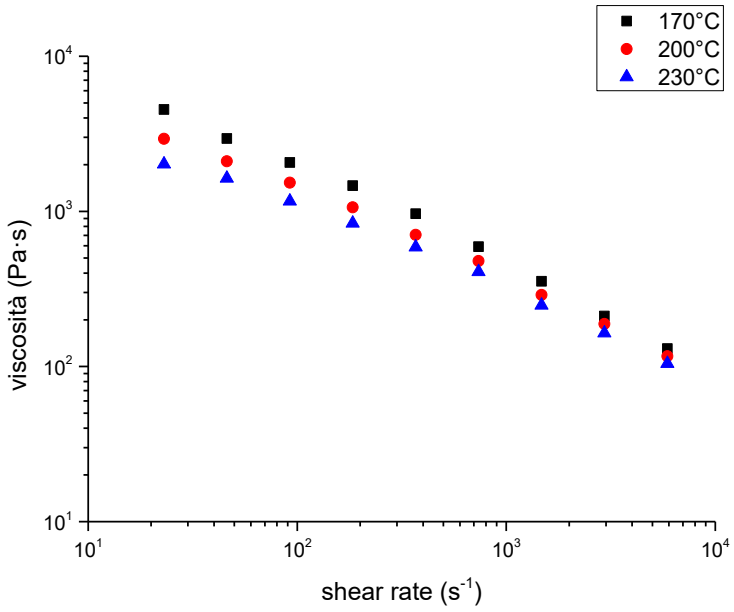

Figura 3.2: Curva di viscosità apparente, miscela 30 LD150BW – 70 LL1001XV.

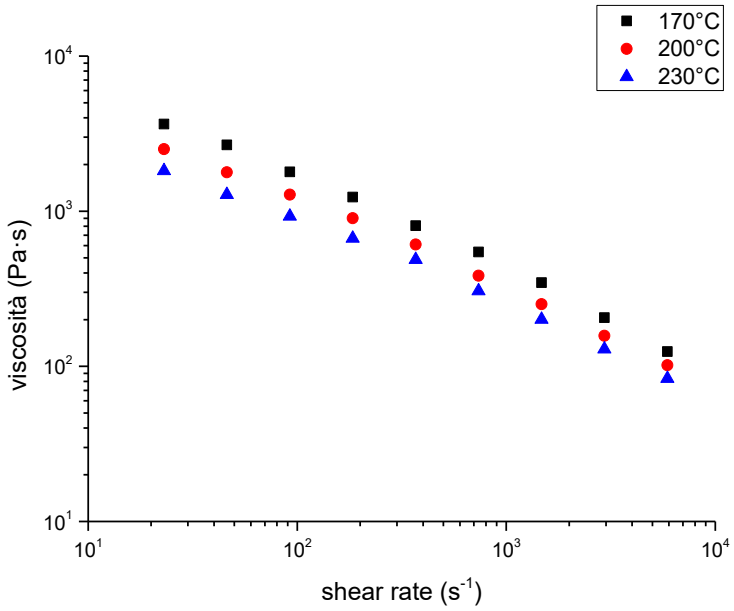

Figura 3.3: Curva di viscosità apparente, miscela 70 LD150BW – 30 LL1001XV.

Nella Figura 3.1 (Curva di viscosità apparente, materiale Exceed 1018 HA.) le curve di viscosità appaiono diverse se confrontate con quelle di Figura 3.2 e Figura 3.3. Per il materiale Exceed 1018 HA infatti, si può notare un comportamento anomalo delle curve di viscosità: i punti riferiti alla temperatura di 170 °C si sovrappongono o si trovano sotto ai punti riferiti alla temperatura di 200 °C.

È stato importante misurare la viscosità dei polimeri perché da essa dipende quasi tutta la fluidodinamica e parte della termodinamica che regolano il flusso del materiale all'interno dell'estrusore, soprattutto nella zona di metering e di compression, ovvero dove il polimero si trova allo stato fuso.

3.2.3 Temperature caratteristiche ed entalpia di fusione

L'entalpia di fusione e le temperature di fusione e solidificazione sono state misurate in laboratorio tramite la calorimetria a scansione differenziale (DSC). Lo strumento utilizzato è stato un DSC mod. Mettler-Toledo DSC 821e. La tecnica di analisi termica calorimetria a scansione differenziale trae i dati relativi al materiale esaminato per differenza rispetto un campione di riferimento. La tecnica consiste nel misurare la differenza di quantità di calore fornita (o sottratta) ai due materiali durante una fase di riscaldamento (o di raffreddamento) controllato affinché il campione da esaminare e il riferimento abbiano la stessa temperatura.

Per la caratterizzazione dei polimeri di questo elaborato si sono utilizzati due cicli termici nell'intervallo di temperature 25 °C e 240°C e in particolare, i cicli sono composti da:

- Riscaldamento con una velocità di riscaldamento pari a 20°C/min;
- Raffreddamento con una velocità di raffreddamento pari a 10°C/min;
- Riscaldamento con una velocità di riscaldamento pari a 10°C/min;
- Raffreddamento con una velocità di raffreddamento pari a 20°C/min;

Il primo ciclo è necessario ad azzerare la storia termica del polimero, storia che lascia tracce e che potrebbe influenzare le proprietà, ma nonostante ciò, saranno utilizzati i dati provenienti dal primo ciclo poiché nell'estrusore verranno lavorati materiali che comunque possiedono una storia termica alle loro spalle.

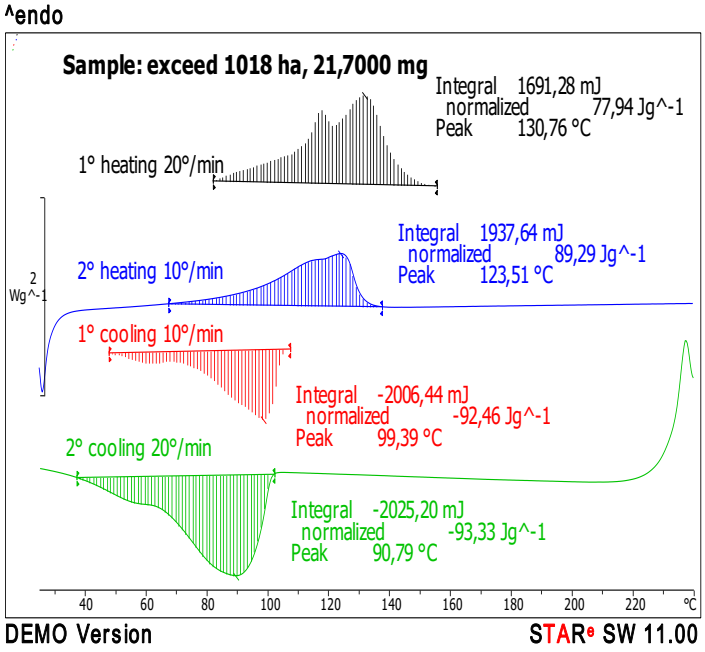

Figura 3.4: DSC del materiale Exceed 1018 HA.

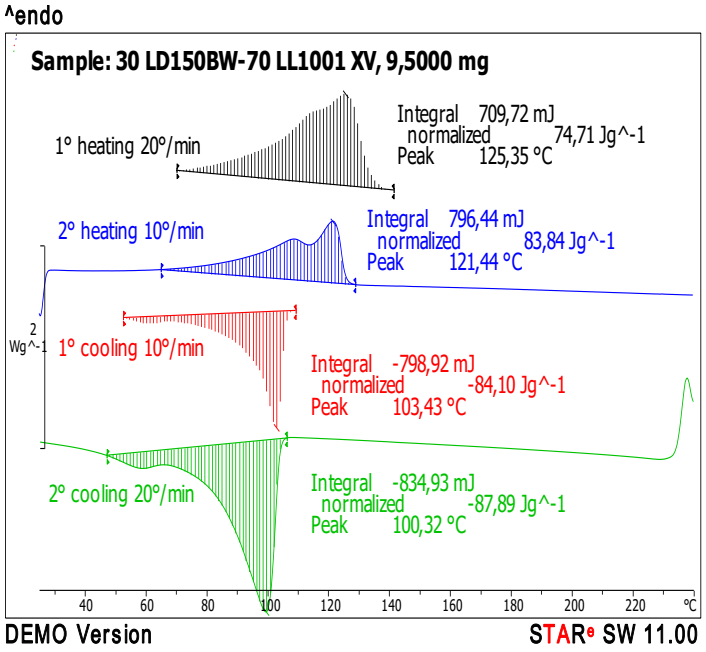

Figura 3.5: DSC della miscela 30 LD150BW – 70 LL1001XV.

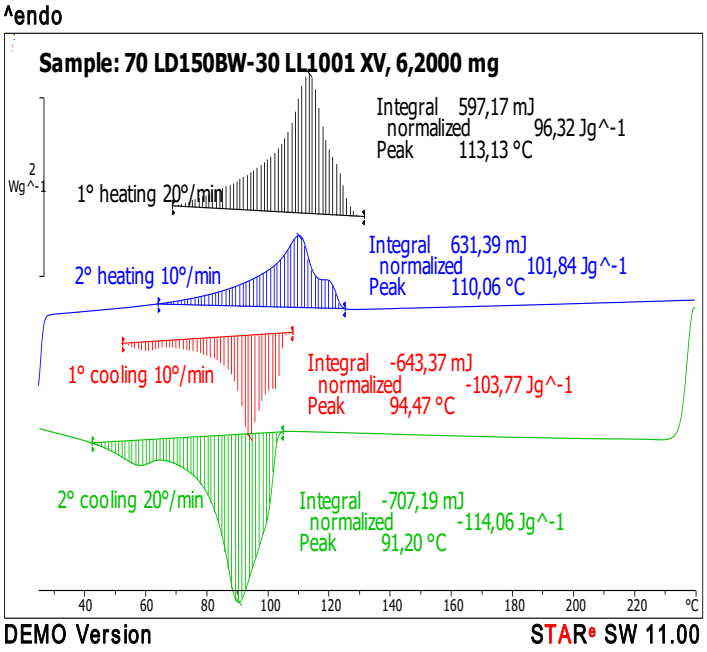

Figura 3.6: DSC della miscela 70 LD150BW – 30 LL1001XV.

I processi di fusione e solidificazione dei polimeri non avvengono in corrispondenza di esatte temperature (come ad esempio nei solidi cristallini metallici) ma più propriamente in intervalli di temperatura. Per semplicità però, si parla di temperatura e non di intervallo. Inoltre, i polimeri presentano un certo grado di isteresi e perciò le temperature di fusione e di solidificazione non coincidono. Tutto ciò è possibile notarlo dalle figure sopra (Figura 3.4, Figura 3.5, Figura 3.6). Sempre dalle stesse figure i valori delle temperature sono presi a fianco della voce "Peak" del primo riscaldamento per quanto riguarda la temperatura di fusione e a fianco della voce "Peak" del primo raffreddamento per quanto riguarda quella di solidificazione.

L'entalpia di fusione è la quantità di energia sotto forma di calore che deve essere fornita a un'unità in massa di materiale affinché passi completamente dallo stato solido allo stato fuso. Ha grandezza di J/g. Il dato di entalpia di fusione è preso dal primo riscaldamento da Figura 3.4, Figura 3.5 e Figura 3.6 a fianco della voce "normalized" (Integral).

Tutti i dati ricavati dalle analisi DSC sono riassunti, per semplicità, nella tabella sottostante (Tabella 3.3)

Tabella 3.3: Temperature caratteristiche ed entalpia di fusione dei materiali esaminati.

Materiale	*Temperatura di fusione [°C]*	*Temperatura di solidificazione [°C]*	*Entalpia di fusione [J/kg]*
Exceed 1018 HA	130,8	99,4	77940
30 LD150BW – 70 LL1001XV	125,4	103,4	74710
70 LD150BW – 30 LL1001XV	113,1	94,5	96320

Le temperature caratteristiche ma soprattutto quella di fusione, influisce sul punto in cui inizia a fondere il materiale, a parità di tutte le altre condizioni. Inoltre, indica la temperatura che si deve raggiungere nei pressi della zona di transizione tra zona di feeding e di compression, punto in cui solitamente si cerca di avviare la fusione del polimero.

L'entalpia di fusione è necessaria per sapere la quantità di calore da fornire al polimero tramite termoresistenze e/o conversione dell'energia meccanica proveniente dal motore. È utile anche in sede di dimensionamento dell'estrusore per scegliere la taglia delle termoresistenze e del motore, essendo a conoscenza della potenza che questi due elementi devono erogare per portare a fusione tutto il materiale.

3.2.4 Calore specifico

Il calore specifico, così come la viscosità, le temperature caratteristiche e l'entalpia di fusione, è stato misurato tramite prove sperimentali in laboratorio. È stato misurato sia per il polimero allo stato solido sia per il polimero allo stato fuso tramite il metodo zaffiro.

Lo strumento per l'analisi è il DSC e il campione di riferimento con cui viene confrontato il materiale realmente da analizzare è lo zaffiro (da qui il nome metodo zaffiro), di cui si conosce con precisione il calore specifico. Con questo metodo si è stimato il C_p (calore specifico a pressione costante). In un intervallo di temperature in cui il polimero si presentava allo stato solido è stata variata la temperatura di un grado centigrado (°C) e per ogni valore è stato calcolato il C_p. Allo stesso modo si sono stimati i valori di calore specifico del polimero fuso.

Gli intervalli di temperature sono stati 40-59 °C per lo stato solido e 170-229 °C per lo stato fuso. All'interno di ogni intervallo e per ogni materiale è stata calcolata la media dei valori di C_p determinati in precedenza. L'operazione è stata svolta soprattutto in vista di quanto avrebbe richiesto il software. Nella Tabella 3.4 sono riportati i valori mediati del C_p.

Tabella 3.4: Valori mediati di calore specifico a pressione costante C_p.

Materiale	*C_p stato solido [J/(kg·K)]*	*C_p stato fuso [J/(kg·K)]*
Exceed 1018 HA	548	2739
30 LD150BW – 70 LL1001XV	1821	1568
70 LD150BW – 30 LL1001XV	3469	3757

Il calore specifico, essendo la quantità di calore necessaria ad aumentare una unità di massa di un K, interviene nelle trasformazioni termodinamiche, in particolar modo caratterizza le quantità di calore da aggiungere o sottrarre per aumentare o abbassare la temperatura del polimero.

3.3 Scelta software

Dapprima è stata sondata l'eventualità di procedere con lo studio in maniera analitica, ma sarebbe risultata troppo semplificativa poiché le ipotesi adottate si discostavano molto dalla realtà. Non sarebbe stato possibile, seguendo quel metodo, giungere a risultati veritieri e fruibili. Si è optato dunque per un approccio numerico e l'utilizzo di un software, il quale avrebbe richiesto più risorse ma senz'altro avrebbe restituito risultati con maggiore dettaglio e maggiormente accostabili alla realtà.

La scelta del software di simulazione del processo di estrusione è stata, seppur in piccola parte, oggetto della tesi. Da questo sarebbe dipeso poi, l'utilizzo di ulteriori software a corredo e/o la necessità di particolari risorse hardware.

I software presi in considerazione sono stati ANSYS Poliflow della casa ANSYS, COMSOL Multiphysics® della COMSOL® e Virtual Extrusion Laboratory™ della CompuPlast®.

Il primo offre una analisi CFD tridimensionale molto dettagliata e approfondita con un pacchetto dedicato esclusivamente all'estrusione, ma il costo elevato e i particolari requisiti minimi hardware, nonché la probabilità di dover usare un ulteriore programma di modellazione 3D per la creazione dei componenti da simulare, hanno impedito l'adozione di tale software.

Il secondo, similmente al primo, consente di effettuare un'analisi CFD tridimensionale abbastanza dettagliata, ma richiedendo anch'esso specifiche hardware non comuni e non possedendo un'implementazione ad hoc per l'estrusione, si è optato per non utilizzarlo.

La scelta definitiva è ricaduta sul terzo poiché, oltre alla disponibilità immediata del software da parte dell'azienda, non ha necessità di essere supportato da una macchina particolarmente performante (effettua una computazione in due dimensioni), è stato studiato appositamente per un utilizzo industriale ed è integrata la funzione per la definizione delle caratteristiche geometriche della vite. Inoltre, quest'ultimo possiede un pacchetto unicamente dedicato alla progettazione e analisi di estrusori monovite.

Virtual Extrusion Laboratory™ è un programma specificatamente studiato per il mondo dell'estrusione, dunque è stato necessario svolgere un periodo di learning e di training per poterlo utilizzare propriamente. Durante il periodo di tesi (febbraio-ottobre 2019) è stata utilizzata la versione 6.10 di tale software.

4 Simulazioni

Nel capitolo sono esposte le operazioni che sono state svolte per avviare e svolgere le simulazioni. La prima operazione è l'inserimento nel software di tutti i materiali con le loro proprietà fisiche e reologiche. La seconda è la modellazione dell'estrusore tramite la definizione di tutte le sue caratteristiche geometriche. Per ultimo si specificano le condizioni di processo a cui opera l'estrusore monovite. La simulazione numerica restituisce in uscita l'andamento di diverse grandezze e in questo capitolo si espongono quelle osservate.

4.1 Materiale

Condurre una buona simulazione significa affidarsi a dati di partenza attendibili, coerenti e compatibili tra di loro. Proprio per questo motivo sono state condotte le prove sperimentali volte alla caratterizzazione dei materiali.

Il software adottato possiede un pacchetto specifico (Material Properties) per l'immissione di tutti i dati dei materiali. Con questo pacchetto è possibile creare e salvare tutti i materiali di cui si ha bisogno e averne un database, dal quale si può attingere di volta in volta per svolgere diversi tipi di simulazione (estrusore, estrusione in bolla, estrusione di lastra piana…).

Sono stati creati in Material Properties i tre materiali Exceed 1018 HA, 30 LD150BW – 70 LL1001XV, 70 LD150BW – 30 LL1001XV. Le curve reologiche sono le prime proprietà che devono essere inserite. I valori di viscosità in funzione di shear rate e temperatura sono importati nel software a partire da una tabella Excel, poi trasferita in un file di testo .txt opportunamente rimaneggiato e dunque inseriti in Material Properties. Con il reometro a capillare si sono tracciate curve di viscosità apparente le quali devono essere corrette e trasformate in curve di viscosità reale. Questo è realizzato automaticamente dal pacchetto software selezionando una casella che indica che i dati in ingresso sono delle viscosità apparenti. L'operazione è di elevata importanza poiché la sua omissione sopravvaluterebbe la viscosità e porterebbe a risultati sicuramente errati.

L'importazione nel software dei dati di viscosità è seguita dalla loro interpolazione secondo diverse formule. Per i polimeri analizzati in questa tesi sono state usate interpolazioni che seguono la legge di Carreau o che seguono un'espressione logaritmico-polinomiale. L'interpolazione scelta, a seconda del materiale, è stata quella che ha restituito il minimo scostamento dai valori noti.

Si sono quindi inseriti tutti i valori riferiti alle proprietà esposte nel Capitolo 3.2 ovvero densità del bulk, densità del polimero solido, densità del polimero fuso, calore specifico, temperatura di fusione, temperatura di solidificazione ed entalpia di fusione.

4.2 Estrusione

Una volta creato il materiale e impostate tutte le sue proprietà, si procede alla configurazione dell'estrusore che sarà oggetto di tutte le simulazioni.

La creazione dell'estrusore è stata effettuata inserendo nel software tutti i dati geometrici dell'estrusore, divisi per cilindro (barrel) e vite (screw).

Per quanto riguarda il barrel sono stati impostati i seguenti valori (si utilizza la nomenclatura presente nel software):

- Extruder inlet, imbocco dell'estrusore, ovvero l'apertura al di sotto della tramoggia di alimentazione, attraverso cui passa il materiale che alimenta tutto l'estrusore. La sezione di apertura (le cui dimensioni sono lunghezza e larghezza) influenza, insieme all'altezza del materiale in tramoggia e alla densità del bulk, il peso che grava sul primo tratto della vite e la capacità di alimentare in modo continuo la vite;
    - Throat length: 80 mm;
    - Throat width: 70 mm.
- Barrel zones, è la divisione delle zone di riscaldamento e raffreddamento presenti sul cilindro. La prima zona (feed zone) è termoregolata tramite acqua, mentre le successive tramite termoresistenze, ventilatori e alette. La lunghezza delle suddette zone è:
    - Feed zone: 382 mm;
    - Zona 1: 446,5 mm;
    - Zona 2: 379 mm;
    - Zona 3: 350 mm;
    - Zona 4: 404,5 mm;
    - Zona 5: 154 mm;

Per la vite è stato impostato un unico filetto la cui lunghezza del passo è costante e pari a 65 mm, e il cui spessore è costante e pari a 6 mm. È stata definita inoltre, la lunghezza di ogni sezione della vite (già esposte nel Capitolo 3.1) e i rispettivi diametri dei noccioli.

Per ogni sezione filettata, il programma dà la possibilità di inserire un "modificatore", denominato "worn flight", che rappresenta l'usura del filetto. In via del tutto teorica non esisterebbe spazio tra la cresta del filetto e la parete interna del cilindro, ovvero le due superfici aderirebbero perfettamente tra di loro. Nella realtà un piccolo gap, non causato da fenomeni di usura, c'è ed è realizzato per poter inserire la vite all'interno del cilindro in fase di montaggio dell'estrusore. Si potrebbe dire in altri termini che si tratta di un accoppiamento con gioco, importante per permettere la libera rotazione della vite all'interno del cilindro.

Il piccolo spazio consente al polimero fuso di inserirsi in esso operando in questo modo una sorta di lubrificazione idrodinamica centrando la vite all'interno del cilindro. Il gap tuttavia presenta uno svantaggio quale può essere il trafilamento di polimero in direzione opposta a quella voluta. In caso di vite nuova i vantaggi sono senz'altro maggiori degli svantaggi e nella simulazione il gap ha un ruolo poco importante ma senz'altro non trascurabile. Nella Tabella 4.1 sottostante si riassumono i dati della vite inseriti nel software.

Tabella 4.1: Caratteristiche geometriche della vite inserite nel software.

Sezione	Lunghezza [mm]	
Feeding	585	Diametro nocciolo inizio sezione: 48 mm. Diametro nocciolo fine sezione: 48 mm. Flight clearance: 0,08 mm.

Compression	662	Diametro nocciolo inizio sezione: 48 mm. Diametro nocciolo fine sezione: 58 mm. Flight clearance: 0,08 mm.
Metering	715	Diametro nocciolo inizio sezione: 58 mm. Diametro nocciolo fine sezione: 58 mm. Flight clearance: 0,08 mm.
Torpedo	154	Diametro: 50 mm.

L'ultimo elemento della Tabella 4.1, ossia il Torpedo, è un elemento cilindrico il cui compito, se ben dimensionato, è quello di miscelare in maniera distributiva il polimero e tutti gli additivi e cariche presenti in esso. Nell'estrusore in esame questo elemento è stato creato però per uno scopo diverso. Esso svolge il ruolo di impedire la stagnazione del polimero fuso nei pressi del cambia-filtro, infatti le sue dimensioni sono assolutamente lontane da quelle che dovrebbe avere un elemento di miscelazione.

La definizione dei materiali e dell'estrusore permette di imbastire la simulazione dell'intero processo di estrusione. Per avviare le simulazioni è necessario inserire ancora i dati riguardanti il processo e le finalità delle stesse.

I parametri di processo ancora da definire sono le temperature di ogni barrel zone. Esse sono state stabilite in base ai dati forniti dalle aziende produttrici di film, utilizzatrici reali di queste macchine, e in base all'esperienza diretta dei collaudatori presenti presso Bandera S.p.A. In questa tesi non sono state ricercate le migliori temperature possibili per il processo esaminato, ma dato che l'argomento è l'usura della vite nelle condizioni di funzionamento più comuni e utilizzate, si sono reperite informazioni proprio sulle temperature più ricorrenti. Le temperature nelle varie zone sono state:

- Feed zone: 50 °C;
- Zona 1: 200 °C;
- Zona 2: 205 °C;
- Zona 3: 210 °C;
- Zona 4: 210 °C;
- Zona 5: 210 °C;

Due importanti parametri nell'estrusione sono i coefficienti di attrito che si possono riferire al contatto tra il materiale e il cilindro e tra il materiale e la vite. Più è elevato il loro valore più la superficie metallica di vite e cilindro è rugosa e quindi il materiale a contatto con le due superfici ha difficoltà a scorrere.

Se la rugosità della vite fosse troppo alta, il polimero tenderebbe a girare solidalmente con la vite senza avere una componente di velocità che lo porti verso l'uscita, perciò si tende ad avere un coefficiente di attrito tra vite e materiale basso, lungo tutta la lunghezza della vite.

La rugosità del cilindro invece, a seconda di dove ci si trovi, è necessario averla alta o bassa. Nel primo tratto, quello di alimentazione, soprattutto nei pressi della bocca di alimentazione, sarebbe necessario avere un coefficiente di attrito elevato per impedire il movimento del materiale nella direzione tangenziale del cilindro e consentire solamente il movimento longitudinale, ovvero quello

che porta il materiale verso l'uscita dell'estrusore. In questo tratto infatti, è fondamentale che il polimero sia trasportato in modo continuo verso le zone successive (di compressione e di metering) così da fornirgli sempre materiale da processare ed evitare che si possano creare dei vuoti. Asportando velocemente il materiale che cade dalla tramoggia nel primo tratto dell'estrusore si evita che la permanenza prolungata dei granuli del polimero all'ingresso dell'estrusore, li faccia aderire l'un l'altro creando una sorta di tappo. Negli altri tratti invece, si vuole una rugosità del cilindro bassa così che il polimero fuso, con il suo passaggio operi un "lavaggio" il più completo possibile delle pareti del cilindro. I coefficienti di attrito, o frizione, richiesti dal software, si riferiscono al primo tratto dunque:

- Coefficiente di attrito materiale-vite: 0,2;
- Coefficiente di attrito materiale-cilindro: 0,3. Si noti che il coefficiente di attrito è basso perché il cilindro è liscio e possiede una rugosità molto bassa; esso però è maggiore del coefficiente di attrito tra materiale e vite.

Un altro elemento da definire è la condizione che si presenta alla fine dell'estrusore, o detto in altri termini, lo stato che il materiale deve raggiungere al termine del processamento. Il software offre l'opportunità di scegliere tra due possibilità. La prima (chiamata screw tip pressure) è quella di impostare una pressione fissa a cui si deve arrivare nell'estremità di uscita dell'estrusore. Nella realtà questa situazione è presente quando al termine dell'estrusore è presente una pompa a ingranaggi oppure un rubinetto calibrato progettato appositamente per creare un valore stabilito di pressione, ad esempio nel corso di test speciali. Nell'ambito di impianti di estrusione di film in bolla, questo solitamente non avviene perché a valle dell'estrusore è presente una testa che dispone il materiale in una corona circolare per formare la bolla. La seconda opportunità (chiamata die definition) che offre il software è quella di ricreare la situazione appena descritta. A tal proposito si definiscono tre parametri che riassumono una specifica condizione operativa della testa, detta anche filiera, o die:

- Equivalent die back pressure: la pressione equivalente generata dai condotti presenti nella testa;
- Equivalent die MFR: MFR o melt flow rate, portata in massa del fuso, è la portata in massa del materiale che attraversa la testa grazie alla equivalent die back pressure e alla equivalent die temperature;
- Equivalent die temperature: è la temperatura alla quale il melt attraversa la filiera alla portata e pressione dei punti precedenti.

Grazie a questi tre dati, il software calcola internamente una filiera virtuale, rappresentata da un tubo, le cui dimensioni permettono il verificarsi delle tre condizioni. La creazione della filiera virtuale consente di simulare una situazione reale, ovvero ricercare il punto di funzionamento che è intersezione della caratteristica dell'estrusore e della testa.

Nell'ambito di questa tesi sono state sfruttate entrambe le opportunità offerte dal software. La "screw tip pressure" è stata utilizzata principalmente per tracciare grafici in cui è possibile individuare il livello di usura della vite a partire dalle condizioni di processo. La "die definition" è stata utilizzata per studiare l'evolversi di alcune grandezze che caratterizzano il processo, le cui variazioni sono causate dall'usura.

I valori di pressione, melt flow rate e temperatura da inserire nel "die definition" sono stati presi da una scheda tecnica di primo avvio, fornita da un cliente di Bandera S.p.A e produttore di film in bolla, di un impianto in cui lavora lo stesso modello di estrusore analizzato in questa tesi. Tale estrusore, essendo un macchinario nuovo, si trova in condizioni di progetto e di usura assente. Il polimero processato è un polietilene metallocenico lineare a bassa densità molto simile a uno di quelli caratterizzati, in particolare a Exceed 1018 HA, dunque i valori della scheda tecnica di avvio sono stati utilizzati per quest'ultimo.

Il software ha calcolato le dimensioni del tubo equivalente che ricrea per Exceed 1018 HA le condizioni presenti nella scheda. Per gli altri due materiali, presenti nella tesi, non sono state reperite informazioni ad hoc perché le miscele in questione sono state create apposta per poter essere testate e confrontate con il simulatore e nell'ambiente produttivo non sono adottate, o almeno non in una forma così semplice.

La filiera, nella realtà non cambia anche se cambia il materiale processato dall'estrusore, dunque le dimensioni del tubo equivalente calcolato risulta lo stesso per tutti e tre i materiali caratterizzati per questa tesi. Sono state utilizzate le sue dimensioni per ricercare i nuovi valori di pressione, melt flow rate e temperatura da inserire nel "die definition". Con un tool interno a Virtual Extrusion Laboratory™ è stato creato un condotto circolare dalle dimensioni ottenute con il primo materiale; di questo sono stata fissate anche la stessa portata e la stessa temperatura e si è calcolata la caduta di pressione con le due miscele di polimeri. Quest'ultima grandezza, diversa per ogni materiale, insieme alle due mantenute fisse sono state le tre componenti necessarie a definire il "die definition" e sono state riassunte in Tabella 4.2.

Tabella 4.2: Valori impostati per il "die definition".

Exceed 1018 HA	Equivalent die back pressure: 338 bar; Equivalent die MFR: 72 kg/h; Equivalent die temperature: 238 °C.
30 LD150BW – 70 LL1001XV	Equivalent die back pressure: 306,6 bar; Equivalent die MFR: 72 kg/h; Equivalent die temperature: 238 °C.
70 LD150BW – 30 LL1001XV	Equivalent die back pressure: 245,4 bar; Equivalent die MFR: 72 kg/h; Equivalent die temperature: 238 °C.

L'ultimo dato necessario per svolgere la simulazione può essere scelto tra la portata di materiale obiettivo e la velocità di rotazione della vite a cui deve operare l'estrusore. Le simulazioni infatti possono essere avviate solo definendo uno dei due dati, mentre l'altro sarà calcolato. Stabilendo il MFR (melt flow rate o portata in massa di materiale fuso) che deve processare l'estrusore, il programma calcola la velocità di rotazione che deve raggiungere la vite affinché si ottenga la portata prefissata. Viceversa, è possibile stabilire la velocità della vite e di conseguenza il programma determina la portata di materiale elaborata dall'estrusore a quella prefissata velocità.

Nelle attività industriali, per esigenze di prodotto e di produttività, si richiede una certa portata all'estrusore e questo deve adattare la sua velocità in modo da fornire la quantità di polimero fuso richiesta. Similmente alla pratica industriale, le simulazioni verranno impostate per calcolare le

velocità, avendo fissato il MFR. Inoltre, per l'impostazione delle computazioni numeriche sono state utilizzate portate comunemente processate dall'estrusore di diametro 65 mm in possesso dalla Bandera. Le portate usate sono 50, 60 e 70 kg/h.

Lo studio di questa tesi si concentra sull'usura della vite e dunque il modificatore "worn flight" diventa fondamentale in questo tipo di lavoro. Si è riprodotta nel software l'usura del filetto della vite, in diversi gradi e posizionata in differenti zone dell'estrusore. Le simulazioni sono state svolte aumentando di volta in volta il valore relativo al consumo del filetto seguendo tre schemi:

- Filetto della vite usurato prevalentemente nella zona di compressione dove il valore di "flight clearance", ovvero il gap esistente tra la cresta del filetto e il cilindro è pari a due volte quello delle zone di alimentazione e di dosaggio. Questo schema è chiamato sinteticamente "1-2-1";
- Filetto della vite usurato prevalentemente nella zona di dosaggio dove la "flight clearance" ha valore doppio rispetto alle altre due zone dell'estrusore. Lo schema è definito "1-1-2";
- Filetto della vite usurato della stessa entità e prevalentemente nelle zone di compressione e di dosaggio. La "flight clearance", in queste due zone, vale due volte di quella della zona di alimentazione. Lo schema è definito "1-2-2".

Gli schemi sono stati scelti sulla base delle misurazioni di viti usurate effettuate negli anni e possedute negli archivi dell'azienda. Si è notato che l'usura avviene principalmente nelle zone di compressione e di dosaggio, mentre la zona di alimentazione rimane solitamente più integra. Nelle simulazioni si è considerato un livello di usura uniforme all'interno di ogni zona dell'estrusore, anche se nella realtà accade spesso che l'usura sia concentrata in un tratto molto più breve delle zone. È stata adottata questa semplificazione poiché lo studio che si tratta nella presente tesi è di carattere esplorativo per capire la validità del metodo e aggiungere questo aspetto realistico avrebbe complicato oltremodo l'analisi, la modellazione dell'estrusore e la conduzione delle simulazioni.

I valori di flight clearance utilizzati sono distribuiti nell'intervallo che va da 0,08 mm a 0,52 mm nelle zone in cui l'usura ha entità unitaria e nell'intervallo compreso tra 0,08 mm e 1,04 mm nelle zone in cui l'usura ha entità doppia. Nelle seguenti Tabella 4.3, Tabella 4.4, Tabella 4.5 sono mostrati gli schemi e i rispettivi valori di flight clearance, ovvero di usura, utilizzati per le simulazioni.

Tabella 4.3: Valori di flight clearance nelle diverse zone per lo schema 1-2-1.

Schema 1-2-1													
	Flight clearance [mm]												
Zona di alimentazione	0,08	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4	0,44	0,48	0,52
Zona di compressione	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72	0,8	0,88	0,96	1,04
Zona di dosaggio	0,08	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4	0,44	0,48	0,52

Tabella 4.4: Valori di flight clearance nelle diverse zone per lo schema 1-1-2.

Schema 1-1-2													
	Flight clearance [mm]												
Zona di alimentazione	0,08	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4	0,44	0,48	0,52
Zona di compressione	0,08	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4	0,44	0,48	0,52
Zona di dosaggio	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72	0,8	0,88	0,96	1,04

Tabella 4.5: Valori di flight clearance nelle diverse zone per lo schema 1-2-2.

Schema 1-2-2													
	Flight clearance [mm]												
Zona di alimentazione	0,08	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4	0,44	0,48	0,52
Zona di compressione	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72	0,8	0,88	0,96	1,04
Zona di dosaggio	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72	0,8	0,88	0,96	1,04

4.3 Grandezze osservate

Il software computa numerosissime grandezze al suo interno. I risultati provenienti dai calcoli possono mostrare l'andamento di queste grandezze sia lungo lo sviluppo della vite che attraverso il canale, ovvero in direzione radiale rispetto all'asse di rotazione della vite.

La temperatura è una delle grandezze che viene monitorata durante l'attività dell'estrusore. A tale scopo sono montate quattro termocoppie lungo il cilindro e una termocoppia nella feed zone. Queste sono responsabili del rilevamento della temperatura lungo tutta la lunghezza dell'estrusore. Avendo impostato la temperatura che deve raggiungere il polimero in ogni zona, lo scarto tra la temperatura impostata e quella misurata genera l'attivazione delle termoresistenze o degli elettroventilatori. Se la temperatura misurata è inferiore a quella impostata allora significa che il polimero deve essere riscaldato e dunque si accendono le termoresistenze. Viceversa, se la temperatura misurata è superiore a quella impostata significa che il polimero deve essere raffreddato e in questo caso intervengono gli elettroventilatori per asportare calore. Una temperatura troppo bassa in alcuni punti può permettere il formarsi di indesiderate piccole particelle di polimero solido all'interno del melt, mentre una temperatura troppo bassa misurata in una zona estesa dell'estrusore può impedire il corretto fondersi del materiale. Le temperature troppo elevate hanno la conseguenza di degradare il materiale o addirittura bruciarlo. Per questo scopo il software mostra lungo l'estrusore l'andamento della "bulk temperature", ovvero la temperatura media del materiale in ogni sezione, oltre a ciò è possibile seguire gli andamenti delle temperature minime e massime.

L'estrusore monovite deve essere in grado di generare una notevole pressione per permettere al polimero fuso di fluire lungo tutta la lunghezza dei canali della filiera. Tramite il software si osserveranno le variazioni sulla pressione causate dall'usura.

La vite, per poter girare, è collegata ad un riduttore di velocità e ad un motore elettrico. Per imporre alla vite la velocità desiderata, ovvero quella che permette il raggiungimento della portata obiettivo, si agisce sul motore, modificando la sua velocità. Il motore elettrico, a seconda della conformazione con cui è stato costruito (numero di poli), ha un limite di velocità oltre al quale non può andare. Si monitora dunque la velocità della vite, la quale moltiplicata per il rapporto di trasmissione del riduttore, non deve superare la velocità limite del motore.

5 Risultati

Nel capitolo sono presentati i grafici realizzati con le simulazioni, corredati di commenti. Sono esposti i principali effetti dell'usura sulle grandezze osservate, in seguito si operano confronti tra dati provenienti dallo stesso materiale e infine confronti tra i risultati numerici ottenuti con i diversi polimeri.

5.1 Andamento generale

L'usura, come già detto nei capitoli introduttivi, abbassa le prestazioni dell'estrusore. Un filetto consumato genera l'instaurarsi di una portata di materiale al di sopra dello stesso e in direzione opposta a quella desiderata. L'incremento della quota di usura aumenta anche il valore di portata che oltrepassa la cresta del filetto, detta leakage flow. A parità di tutte le altre condizioni che rendono costanti le componenti di portata definite drag flow e pressure flow, la portata totale di materiale lavorata dall'estrusore risulterà diminuita, ma per l'ottenimento di un prodotto qualitativamente accettabile, la portata totale deve rimanere sempre costante.

Si pensi ad esempio ad un film multistrato. Gli strati che lo compongono devono avere sempre un ben definito spessore affinché il prodotto finale possegga le proprietà meccaniche e di permeabilità/impermeabilità desiderate. Per raggiungere questo scopo ogni estrusore deve processare una fissa e ben determinata portata.

Per controbilanciare la portata che trafila al di sopra delle creste della filettatura e per raggiungere nuovamente la portata iniziale la vite deve aumentare la portata di trasporto, o drag flow. Dato che la geometria è fissa, l'unico modo per incrementarla è aumentare la velocità di rotazione della vite. Questo aumento genera shear rate più elevati, i quali causano una generazione maggiore di calore e quindi l'innalzamento delle temperature. Temperature maggiori abbassano la viscosità del polimero e ciò implica l'aumento indesiderato dei termini di portata dovuti alla contropressione (pressure flow) e all'usura del filetto (leakage flow). La drag flow dunque deve essere riaumentata per compensare anche gli effetti dell'aumento di temperatura. L'obiettivo di mantenere costante la portata sembrerebbe irraggiungibile dato che l'aumento della velocità di rotazione ha come conseguenza anche l'aumento delle portate in direzione contraria a quella di uscita. In realtà si raggiunge l'equilibrio e la compensazione delle portate perché gli effetti della velocità sulla drag flow sono più consistenti rispetto a quelli che l'innalzamento delle temperature (conseguenza dell'aumento della velocità) hanno su pressure flow e leakage flow.

Lo shear rate di un fluido, o velocità di deformazione, è un gradiente di velocità che dipende dalle condizioni operative in cui lavora il fluido. Considerando il modello proposto nei capitoli introduttivi, è possibile comprendere che al variare della velocità di rotazione della vite varia di conseguenza anche lo shear rate. In particolare, aumentando la velocità della vite, aumenta anche lo shear rate registrato nel canale.

In Figura 5.1 è mostrato proprio l'effetto della velocità sullo shear rate; i valori di shear rate riportati si riferiscono a quelli registrati nei pressi della superficie della vite. La vite usurata, la quale gira a velocità maggiori di quella nuova, ha valori maggiori di shear rate lungo tutta la vite ove è presente del polimero fuso.

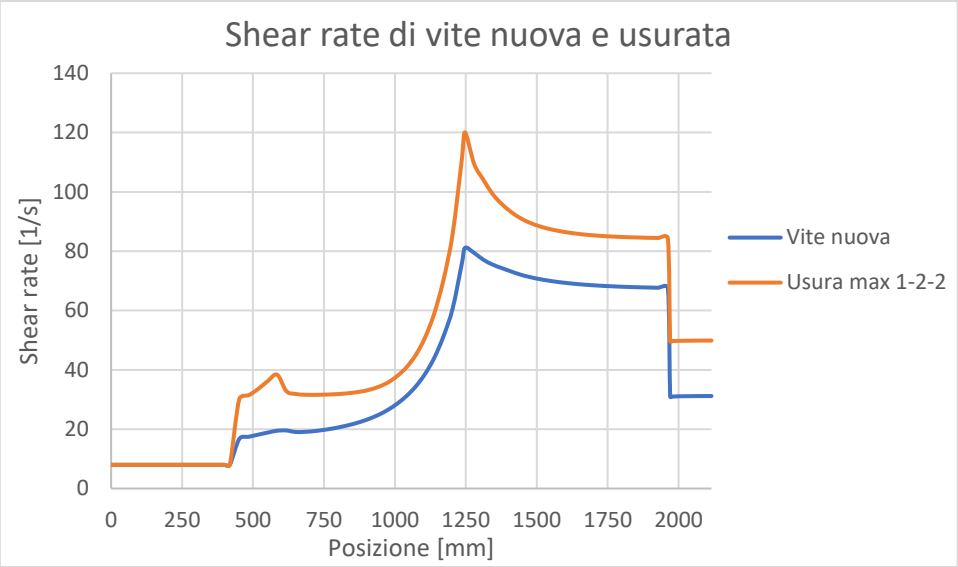

Figura 5.1: Shear rate vite di vite nuova e usurata. Materiale 30 LD150BW - 70 LL1001XV, MFR=60 kg/h.

L'estrusore non è un'entità a sé ma lavora in cooperazione con una filiera e dunque è importante considerare il punto di lavoro, intersezione delle caratteristiche dei due componenti. La modifica apportata alla velocità di rotazione che causa l'aumento della temperatura, si riflette anche sulla caratteristica della filiera. Supponendo infatti che la temperatura raggiunta all'uscita dell'estrusore sia la stessa che il materiale possiede durante il passaggio nella filiera, la caratteristica della filiera risulta modificata. Dato che entrambi i componenti lavorano alla medesima temperatura, più elevata di quella in origine, ovvero rispetto a quella presente in una vite intatta, il punto di lavoro si sposta orizzontalmente sul grafico pressione-portata (Figura 1.12). La portata risulta invariata, ma la pressione raggiunta al termine dell'estrusore diminuisce. L'usura dunque causa anche la diminuzione della pressione allo scarico dell'estrusore.

L'incremento della velocità di rotazione della vite di estrusione e il fatto che si consideri che la temperatura del melt nell'estrusore sia la stessa anche nella filiera, sono i fattori che permettono di mantenere costante la portata nonostante il progredire dell'usura. Le caratteristiche di estrusore e filiera si modificano e il nuovo punto di funzionamento può essere ritrovato combinando le influenze dei parametri in questione (velocità e temperatura) sulle caratteristiche, esposte nel sottoparagrafo 1.3.2.

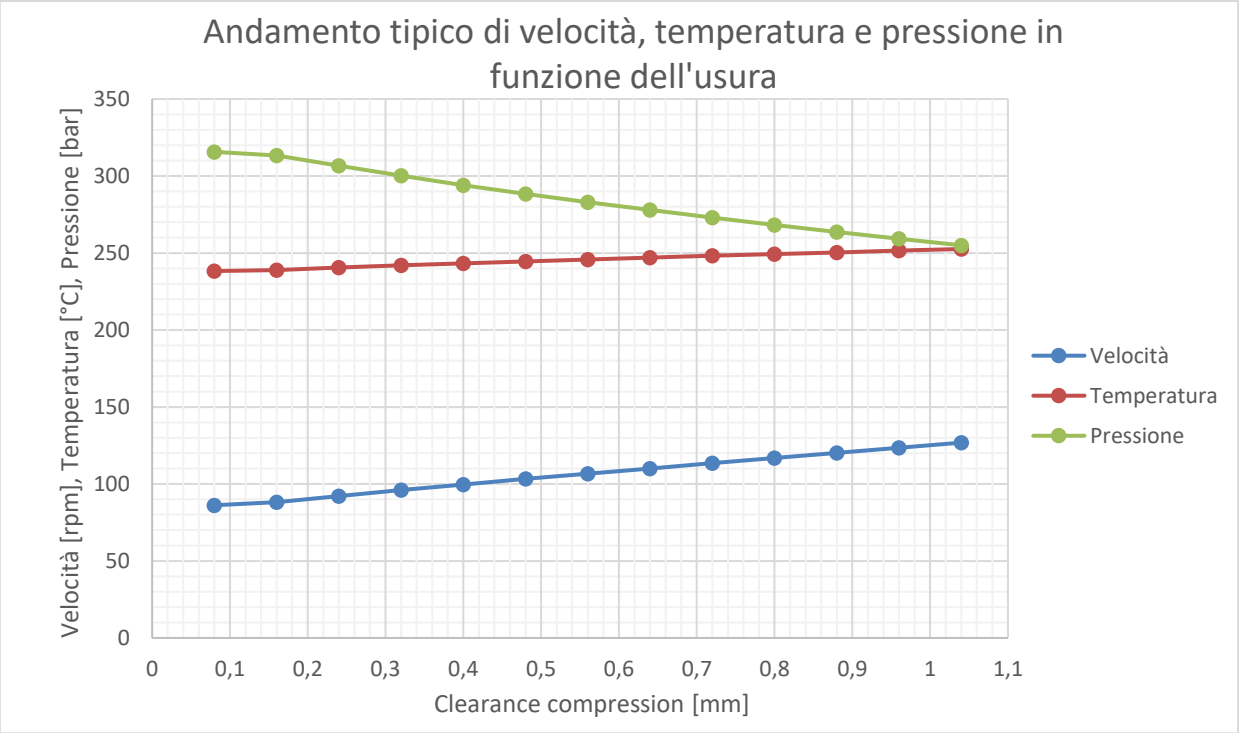

Figura 5.2: Andamento di velocità, temperatura e pressione in funzione del valore di usura della zona di compressione. Exceed 1018 HA, usura 1-2-1, ottenuta con die definition, MFR=60 kg/h.

In Figura 5.2, è rappresentato l'andamento delle tre grandezze nominate finora, ovvero la velocità di rotazione della vite e la temperatura e la pressione allo scarico dell'estrusore, in funzione dell'usura, quando si verifica una portata di 60 kg/h e per un profilo di usura 1-2-1. Gli andamenti sono riassunti in un unico grafico solamente per visualizzare l'evolversi delle tre grandezze in modo simultaneo. Il convergere delle linee riferite a temperatura e pressioni ad esempio non ha alcun significato fisico e ogni linea deve essere considerata singolarmente.

Nella Figura 5.2 si può vedere l'aumento della velocità che da circa 86 rpm in condizioni di vite nuova passa a circa 127 rpm nel caso in cui l'usura nella zona di compressione vale 1,04 mm. Per gli stessi valori di usura, l'aumento della temperatura va da 238 °C a 255 °C e si ha una diminuzione corrispondente della pressione di 60 bar, da un valore di 315 bar fino a 255 bar. Gli andamenti delle grandezze, presentati qui in maniera generica, saranno approfonditi nei paragrafi successivi, infatti l'evoluzione delle grandezze in funzione dell'usura cambia al variare del profilo di usura (1-1-2, 1-2-1 o 1-2-2) e del materiale

Le temperature citate sono le temperature medie nella sezione di uscita dell'estrusore e sono indicative per capire se il materiale, in uscita, è troppo caldo, o caso più raro per quanto riguarda l'usura, troppo freddo. All'interno del canale della vite però, in una sezione trasversale allo sviluppo del canale, si può osservare che la temperatura non è costante, ma assume valori diversi in funzione della distanza dalle pareti di cilindro e vite. Si crea dunque un profilo di temperatura, favorito dalle proprietà isolanti dei polimeri.

La temperatura del polimero fuso a contatto con la superficie interna del cilindro è da considerare fissa poiché si suppone che le termoresistenze e i ventilatori mantengano costante la temperatura "del cilindro" impostata a progetto e questo è valido sia nella realtà che nell'ambiente di simulazione. Il software considera che anche la temperatura della vite sia costante e fissata allo stesso valore del

cilindro, ma nella realtà non avviene questo. Fissati questi due valori (nel software), il profilo di temperatura varia in funzione della dimensione del canale e della viscosità del materiale.

Possono verificarsi principalmente due casi di sviluppo di temperatura nella sezione. Canale stretto e alta viscosità producono una elevata dissipazione. La bassa conducibilità termica dei polimeri impedisce in questo caso la trasmissione del calore verso l'esterno e quindi il suo smaltimento tramite i dispositivi di raffreddamento. La temperatura al centro del canale è più alta di quella ai bordi, ovvero a contatto con le superfici di vite e cilindro. Un canale largo e un materiale poco viscoso al contrario generano poca dissipazione. Le proprietà isolanti dei polimeri, in questo secondo caso, impediscono la trasmissione di calore, prodotto dalle termoresistenze, dall'esterno verso il centro del canale. In questo caso la temperatura al centro del canale risulta minore rispetto a quella lungo i bordi.

Nell'estrusore analizzato si verifica il primo profilo di temperatura, ovvero quello soggetto a elevata dissipazione. Nella zona di metering si osserva in particolar modo questo fenomeno a causa dell'altezza ridotta del canale in relazione alla viscosità dei materiali considerati.

In Figura 5.3, in blu, è tracciato il profilo di temperatura di una sezione posizionata a 1500 mm dalla bocca di alimentazione, dunque nella zona di dosaggio. In ascissa è presente la distanza dal fondo del canale considerando la sua profondità di valore unitario: lo zero indica il fondo del canale, ovvero la superficie del nocciolo della vite, e l'uno indica la sommità del canale, cioè la superficie interna del cilindro. Si osserva che il profilo di temperatura ha concavità verso il basso e la temperatura al centro del grafico (e del canale) è più elevata di quella ai bordi. Tale differenza vale circa 25 °C per la vite nuova.

In una vite usurata, lo scarto tra temperatura minima e massima aumenta proprio in funzione dell'usura. Quest'ultima porta la vite a girare più velocemente (per mantenere costante la portata), aumenta lo shear rate e di conseguenza aumenta anche la dissipazione di energia meccanica in calore. Non tutto il calore in eccesso viene asportato a causa della bassa conducibilità termica dei polimeri e quindi si verifica un riscaldamento del materiale.

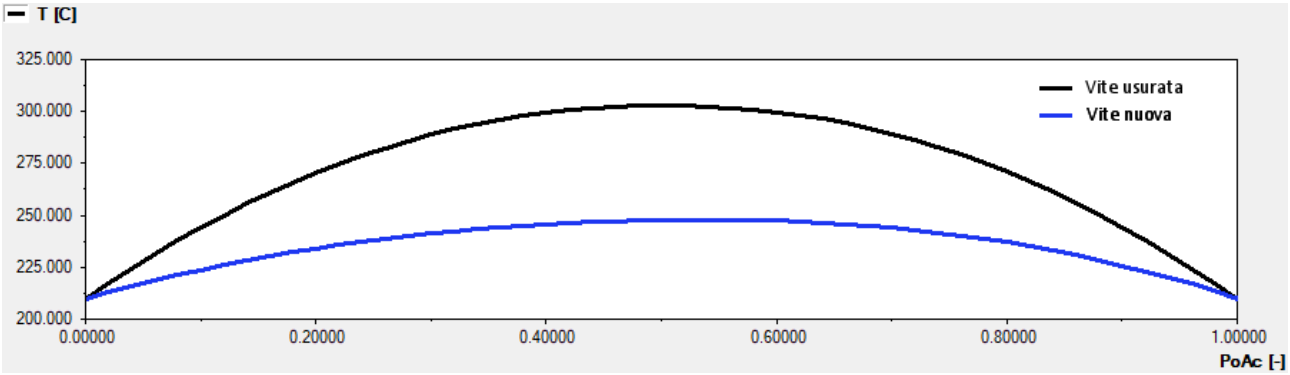

Figura 5.3: Profili di temperatura di una vite nuova e una usurata, in una sezione del canale nella zona di dosaggio.

Nella medesima figura (Figura 5.3) è tracciato in nero il profilo di temperatura della sezione precedentemente considerata, ma nel caso in cui la vite è fortemente consumata. Si nota l'amplificazione del profilo di temperatura del canale ad alta dissipazione, dove la differenza di temperatura vale addirittura 90 °C circa. Ne consegue anche che la temperatura media nella sezione

è più elevata e aumenta con il progredire dell'usura. La temperatura dunque non evolve solamente lungo il canale che avvolge la vite ma anche nella sezione trasversale ad esso.

Fino a questo punto, e così sarà anche più avanti, ci si è concentrati solamente sulla pressione raggiunta allo scarico dell'estrusore, ma può essere importante soffermarsi un poco sullo sviluppo della pressione lungo tutto l'estrusore.

La pressione, in rari casi, si evolve incrementando linearmente il suo valore, da nullo nei pressi della bocca di alimentazione fino al valore massimo allo scarico dell'estrusore. A seconda della conformazione dell'estrusore e degli elementi che lo compongono, la pressione può aumentare secondo diversi regimi e diminuire in alcuni tratti. Possono quindi verificarsi uno o più massimi lungo l'estrusore.

In Figura 5.4 sono rappresentati gli andamenti della pressione delFigura 5.4: Andamento della pressione lungo l'estrusore per diversi profili e livelli di usura. Materiale 30 LD150BW - 70 LL1001XV, MFR=60 kg/h.l'estrusore analizzato in questa tesi, per diversi profili e livelli di usura. Tutte le curve sono accomunate da uno sviluppo simile. Esse presentano un valore di pressione pressoché nullo in quasi tutta la zona di alimentazione. Nell'intero tratto di compressione, la pressione aumenta molto rapidamente fino a raggiungere un massimo proprio in corrispondenza del tratto finale della zona. Nella zona di dosaggio e nel torpedo invece, la pressione decresce fino al valore che permette al melt di fluire nella filiera per ottenere la portata obiettivo.

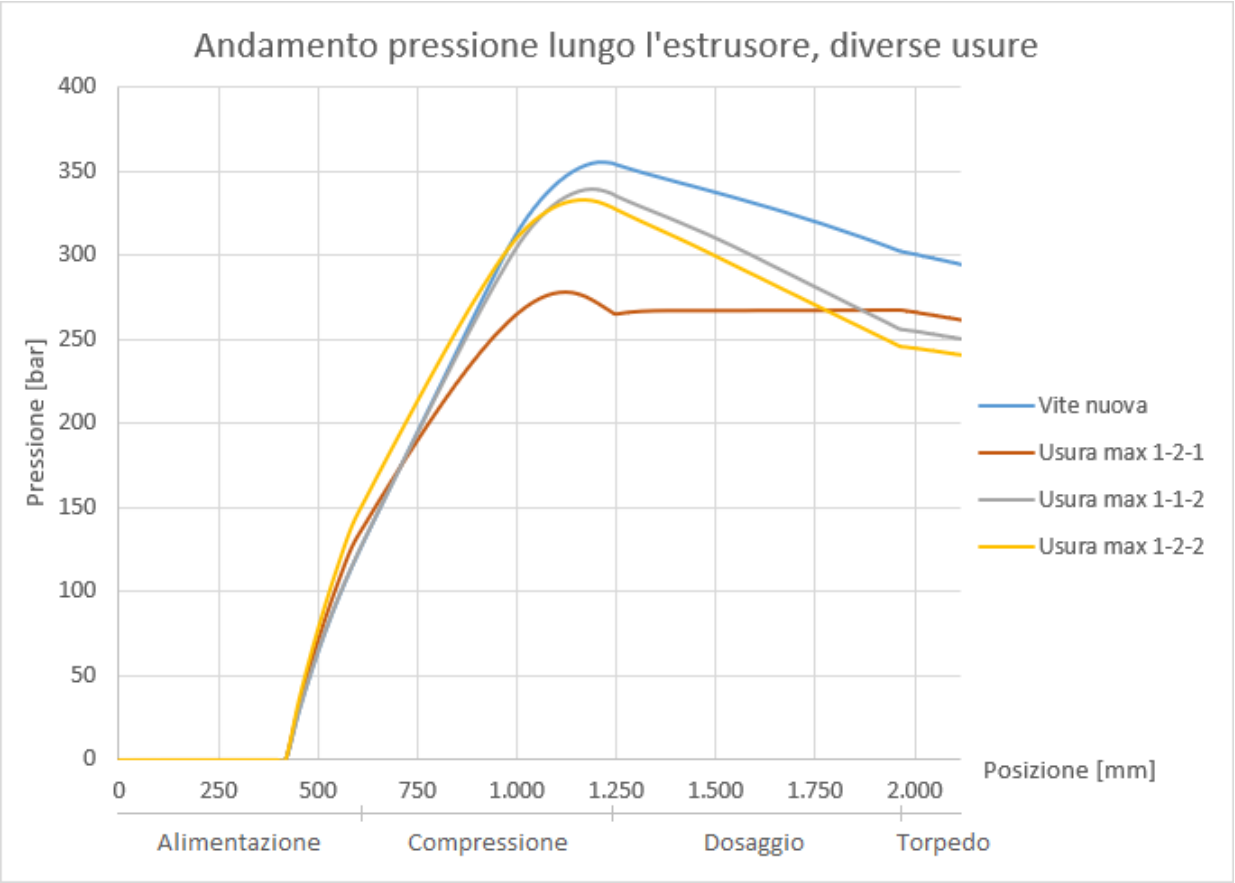

Figura 5.4: Andamento della pressione lungo l'estrusore per diversi profili e livelli di usura. Materiale 30 LD150BW - 70 LL1001XV, MFR=60 kg/h.

La linea blu si riferisce ad una vite integra e i valori di pressione sono più elevati rispetto alle altre linee le quali rappresentano il livello massimo di usura considerato in questa tesi, e per diversi profili di usura (1-2-1, 1-1-2 e 1-2-2). Le pressioni delle viti usurate sono generalmente inferiori a quelle della vite nuova per le stesse considerazioni fatte poco più sopra. Il profilo 1-2-1 presenta un massimo inferiore agli altri due profili poiché l'elevata usura nella zona di compressione diminuisce la capacità di questa zona di creare pressione. La zona successiva invece genera poche perdite di pressione per attrito viscoso, dunque la pressione raggiunta al termine dell'estrusore è maggiore degli altri due profili. Il profilo 1-1-2 presenta invece resistenze fluidodinamiche più elevate e quindi una caduta di pressione più marcata rispetto anche alla vite nuova. Il profilo 1-2-2 presenta come il profilo 1-1-2 una caduta di pressione nella zona di dosaggio elevata, in quanto possiede lo stesso livello di usura. Esso presenta però un massimo più elevato del profilo 1-2-1 anche se ha gli stessi valori di usura perché per garantire al termine dell'estrusore una certa pressione che consenta di avere la stessa portata degli altri due profili, la vite ruota molto più velocemente e di conseguenza la pressione generata è maggiore.

5.2 Valori limite

L'usura causa un peggioramento generale delle performance dell'estrusore. Per produrre la stessa quantità di prodotto finito, per esempio, si incrementano anche i consumi di elettricità. Un altro rischio che si corre è l'aumento della probabilità che avvenga la degradazione del polimero e che quindi il materiale estruso presenti dei difetti. Per evitare tutto ciò si deve ricercare tra le grandezze monitorabili quelle che possono fungere da segnale della progressione dell'usura. Individuate le

grandezze è necessario stabilire i valori limite che esse possono assumere affinché sia garantita una certa produttività e una certa qualità del polimero estruso.

Saranno individuate come grandezze indicatrici dell'usura la velocità di rotazione della vite necessaria per una certa portata e la temperatura del melt raggiunta nell'estrusore. I valori limite di queste due grandezze dovranno essere rispettati entrambi poiché l'estrusore deve garantire contemporaneamente sia la produttività richiesta che la qualità del prodotto estruso.

5.2.1 La velocità di rotazione della vite

La grandezza da osservare per garantire la produttività richiesta è stata rintracciata nella velocità di rotazione della vite di estrusione. In particolar modo si ricerca, se esiste, un limite della velocità della vite che non deve o non può essere superato, al di sotto del quale è garantita la portata di materiale richiesta.

Supponendo di voler processare sempre la medesima portata di materiale, è necessario aumentare la velocità della vite per contrastare la perdita di portata dovuta all'usura. Il calo della portata può non essere più bilanciato dall'incremento della velocità e questo può avvenire per due motivi.

Il primo è che il consumo del filetto sia talmente elevato che anche velocità altissime non siano in grado di compensare il riflusso del materiale. Il caso più estremo può essere l'usura totale del filetto, dove dunque la filettatura che genera la drag flow è scomparsa e l'aumento delle rivoluzioni per minuto non avrebbe alcun effetto.

Il secondo motivo, è che la velocità della vite non possa essere più aumentata perché ha raggiunto un valore limite imposto dal motore. La vite infatti è azionata, tramite un riduttore, da un motore elettrico il quale è stato progettato per lavorare fino ad una determinata velocità massima. In questo elaborato si assiste al secondo caso.

Si è calcolata la massima velocità raggiungibile dalla vite a partire dai dati di targa del motore elettrico (in particolare dalla sua velocità massima) e dal rapporto di trasmissione del riduttore. Tramite un'opportuna relazione (11) che lega le tre grandezze si è giunti al valore limite della velocità della vite.

$$n_v = \frac{n_m}{t} \qquad (11)$$

Dove n_v è la velocità di rotazione della vite in rpm, n_m è la velocità di rotazione del motore in rpm e t è il rapporto di trasmissione inteso come rapporto tra la velocità in ingresso e la velocità in uscita $\left(t = n_{ingresso}/n_{uscita}\right)$. La massima velocità del motore è pari a 2100 rpm e il rapporto di trasmissione è pari a 14,02. La massima velocità raggiungibile dalla vite risulta dunque 150 rpm.

Si potrebbe pensare di monitorare il motore al posto della vite dato che il valore di soglia è imposto dal motore, ma ciò risulterebbe poco agevole. Nella pratica industriale infatti è la velocità della vite ad essere mostrata sugli schermi degli operatori e quindi è questa ad essere monitorata. Questa scelta è supportata dalla diretta proporzionalità che esiste tra le due velocità e che quindi permette di potersi riferire equivalentemente all'una o all'altra grandezza.

Ad esempio, nella Figura 5.5, sono mostrati gli andamenti della velocità della vite all'aumentare del livello di usura e per i tre profili di usura. È stato evidenziato inoltre il limite di velocità di 150 rpm oltre il quale il grafico non ha più senso poiché non è possibile superare quella velocità. Dal grafico si può desumere che, nel caso della miscela 30 LD150BW - 70 LL1001XV, con impostata una portata di 70 kg/h, i profili di usura 1-1-2 e 1-2-1 permettono la lavorazione della portata obiettivo fino ai livelli massimi di usura considerati. Il profilo 1-2-2 invece non lo permette e il livello massimo di usura che garantisce una portata di 70 kg/h è quando nelle zone di transizione e di dosaggio si ha un gap di 0,8 mm.

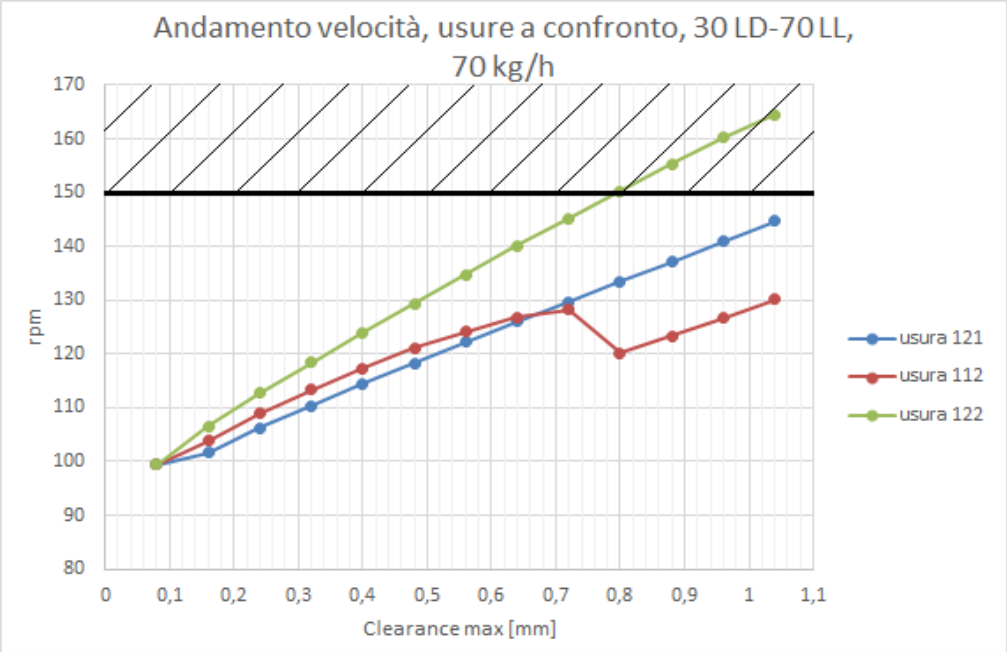

Figura 5.5: Andamento delle velocità per diversi profili di usura con limite di velocità in evidenza. Materiale 30 LD150BW - 70 LL1001XV, MFR=70 kg/h.

Nella trattazione fin qui seguita si sono trascurati gli aspetti legati ai consumi di elettricità assorbita dal motore come anche la perdita di coppia che avviene con l'approssimarsi alla velocità massima.

5.2.2 La temperatura del melt

Una delle grandezze che indicano la probabilità che il polimero estruso abbia dei difetti, come già anticipato, è la temperatura del fuso. Se la temperatura del polimero, durante la lavorazione si mantiene sotto determinati valori allora il prodotto che ne esce sarà privo di imperfezioni. Se invece questi valori vengono superati, allora il polimero durante la lavorazione si degraderà e quindi il prodotto presenterà difetti e diminuzione della lunghezza delle catene con associate minori proprietà meccaniche. Il numero di difetti sarà maggiore quanto più le temperature sono alte.

Come visto nel paragrafo 5.1 e in particolare nella Figura 5.3, le temperature massime si raggiungono al centro del canale, o comunque all'interno del canale perché la geometria della vite accoppiata ai materiali scelti causa alta dissipazione. Il rilevamento della temperatura del melt al centro del canale, durante il funzionamento dell'estrusore, è un'operazione estremamente complicata e quindi non attuabile.

Si misura invece la temperatura del melt inserendo nel cilindro alcune termocoppie le quali però non sono a contatto con il polimero. Alcuni millimetri di acciaio (del cilindro) infatti separano la

termocoppia dal melt, come mostrato in Figura 5.6, per proteggere lo strumento di misura dalle alte pressioni raggiunte nell'estrusore e per evitare discontinuità della superficie del cilindro dannose per il materiale e dannose per la vite. Queste termocoppie sono le stesse che fungono da feedback per la termoregolazione di tutto l'estrusore.

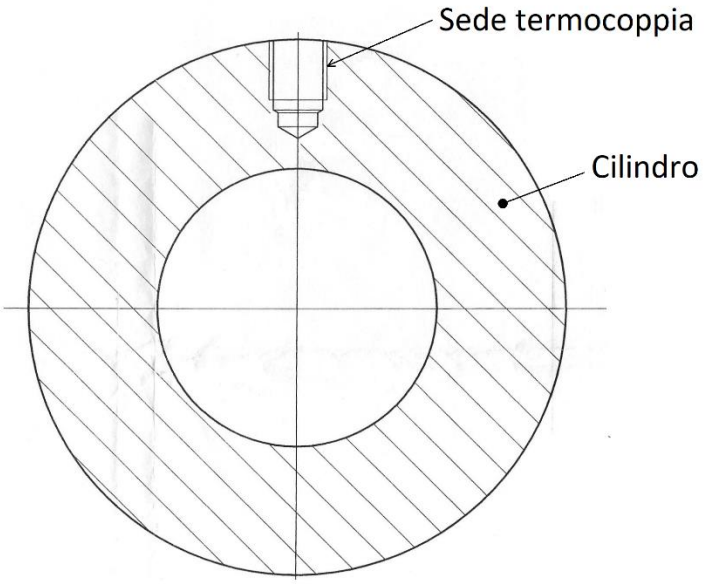

Figura 5.6: Posizionamento termocoppia all'interno del cilindro.

La temperatura rilevata è dunque quella del cilindro, ma l'elevata conducibilità termica dell'acciaio permette di affermare che la temperatura misurata sia quella del melt nei pressi della superficie interna del cilindro. In condizioni ideali questa temperatura è quella impostata a progetto, ad esempio nelle zone termiche 3, 4 e 5 è pari a 210 °C, ed è mantenuta costante da termoresistenze e ventilatori, infatti si considera che questi dispositivi siano in grado di fornire o asportare tutto il calore richiesto. Questa condizione è anche quella su cui si basa la computazione del software, che considera immutabili le temperature impostate come condizioni al contorno per la simulazione.

In realtà può avvenire che le resistenze elettriche non siano in grado di fornire tutto il calore che il polimero necessita (caso raro) o che i ventilatori non riescano ad asportare tutto il calore in eccesso. Il secondo caso può avvenire quando la vite si usura e quindi la dissipazione meccanica in calore dovuta alla viscosità del polimero è elevata. I dispositivi di raffreddamento nonostante il loro funzionamento ininterrotto non sottraggono abbastanza calore e dunque il materiale lavorato aumenta la sua temperatura e le termocoppie registrano temperature superiori a quelle impostate. Ad esempio, nelle zone termiche 3, 4 e 5 misurano temperature superiori ai 210 °C.

L'esperienza accumulata dall'azienda individua nel valore di 230 °C la temperatura, misurata dalle termocoppie, a partire dalla quale iniziano a presentarsi difetti nel materiale. Il software non permette di inserire le caratteristiche di termoresistenze e ventilatori e calcolare in modo automatico l'aumento delle temperature qualora questi dispositivi non siano dimensionati in modo opportuno. È stata seguita quindi una procedura diversa per la stima della massima temperatura sulla base dei dati che è possibile inserire nel software e sui risultati che può mostrare il software.

È stata impostata una temperatura di 230 °C nelle zone 3, 4 e 5 per simulare la condizione in cui si raggiunga quella temperatura limite nelle zone più calde dell'estrusore e sia registrata dalle

termocoppie. Si è impostato anche un valore di usura nullo, ovvero ogni zona presenta un gap di 0,08 mm tra la cresta del filetto e il cilindro, ed è stata avviata la simulazione per calcolare l'andamento della temperatura lungo l'estrusore nelle suddette condizioni. A questo punto si è ricercato il valore massimo della temperatura media in ogni sezione, denominata nel software "bulk temperature". Questa temperatura sarà la nuova temperatura limite che non potrà essere superata dai risultati provenienti dalle simulazioni in cui la temperatura impostata è di 210 °C.

Non conoscendo il reale livello di usura per cui si registra la temperatura di 230 °C, il valore massimo di temperatura (con 230 °C impostati) è stato calcolato utilizzando il minimo livello di usura, in via cautelativa e per poter avere un margine di sicurezza. La simulazione è stata condotta inoltre per ogni materiale poiché la temperatura in generale così come anche quella massima varia in funzione del polimero e delle sue caratteristiche. Per svolgere la simulazione è stata scelta la portata di 60 kg/h, poiché è il valore intermedio tra le portate utilizzate. Le temperature massime così ottenute sono:

- Exceed 1018 HA: 254,5 °C;
- 30 LD150BW - 70 LL1001XV: 253,2 °C;
- 70 LD150BW - 30 LL1001XV: 240,2 °C.

Esse sono state ritrovate nel tratto terminale della zona di dosaggio e in prossimità proprio della termocoppia che monitora la temperatura nella zona 4 dell'estrusore.

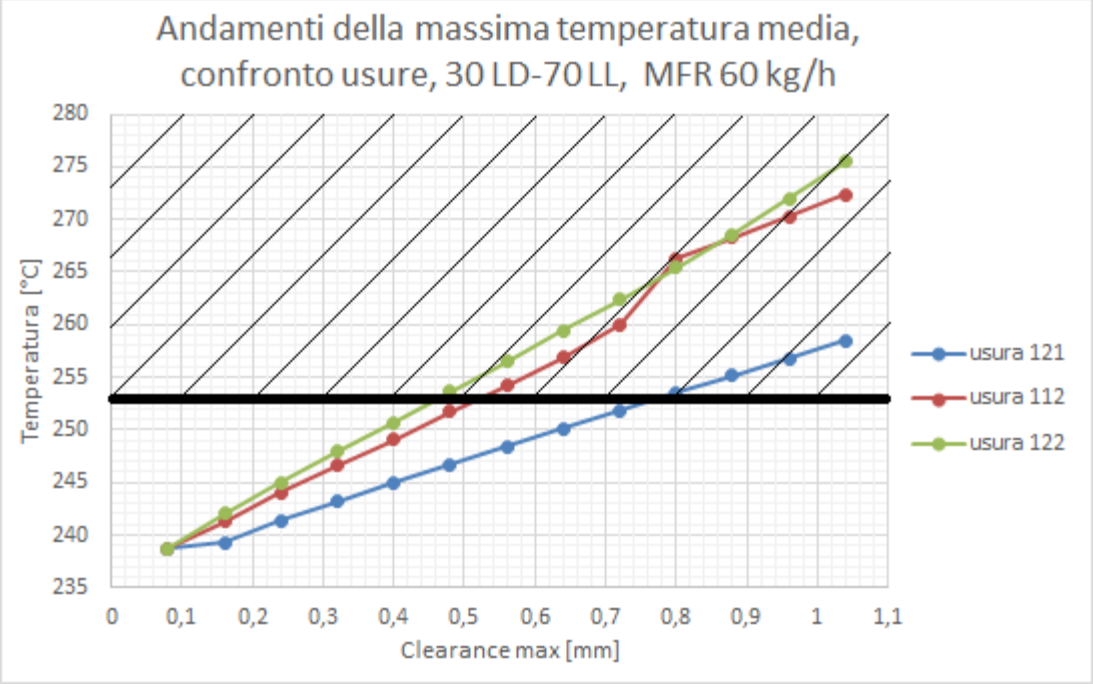

Figura 5.7: Andamento delle massime temperature medie per diversi profili di usura con limite di temperatura in evidenza. Materiale 30 LD150BW - 70 LL1001XV, MFR=60 kg/h.

Nella Figura 5.7, ad esempio, sono mostrati gli andamenti della massima temperatura media del melt all'aumentare del livello di usura e per i tre profili di usura. È stato evidenziato inoltre il limite di temperatura che per il materiale considerato (30 LD150BW - 70 LL1001XV) vale 253,2 °C. Oltre questo valore la probabilità che si creino difetti dovuti alla degradazione termica è elevata e dunque sarebbe opportuno escludere l'area al di sopra della temperatura limite per non incorrere in difetti del materiale. Dal grafico si può desumere che, con impostata una portata di 60 kg/h, nessun profilo di

usura permette la lavorazione di quella portata fino ai livelli massimi di usura considerati. Il profilo 1-2-1 riesce a "sopportare" un'usura maggiore (gap di circa 0,75 mm) rispetto agli altri due che con un gap superiore ai 0,45-0,5 mm causano un surriscaldamento indesiderato del polimero.

Il software restituisce anche la temperatura massima raggiunta all'interno di ogni sezione del canale, dunque più alta della temperatura media nella sezione, ed è questa la vera temperatura critica da monitorare affinché non avvenga la degradazione del polimero. Per effettuare questa analisi più dettagliata è necessario però conoscere la temperatura di degradazione del polimero e a tal fine è stata condotta una analisi termogravimetrica (TGA) su tutti e tre i materiali, in ambiente inerte (N_2). La TGA monitora il peso di un campione di materiale la cui temperatura è aumentata linearmente (10 °C/min). All'aumentare della temperatura, se il polimero inizia a degradarsi, il peso del campione diminuisce perché la degradazione rompe le catene del polimero e parte di esso si trasforma in specie volatili che vengono disperse. Nella Figura 5.8 è riportata la TGA per i tre materiali dove in ascissa è presente la temperatura, nell'ordinata di sinistra il peso del campione espresso come percentuale del peso del campione ad inizio prova e nell'ordinata di destra la derivata della curva del peso percentuale. La curva relativa all'ordinata di sinistra è quella che inizia dal valore 100 % e nel primo tratto ha un andamento orizzontale. Nel grafico vi è indicata anche la temperatura di degradazione pari a 477,8 °C, molto simile per i materiali considerati. Una leggera perdita di peso comincia già a una temperatura di 375 °C e aumenta fino alla massima perdita in peso corrispondente alla temperatura di degradazione. Nell'estrusore, anche considerando le peggiori condizioni analizzate nella presente tesi, non si raggiungono temperature così elevate. Teoricamente dunque l'usura potrebbe essere incrementata ulteriormente, ma la pratica industriale individua livelli di usura critici che sono inferiori a quelli massimi considerati in questa tesi.

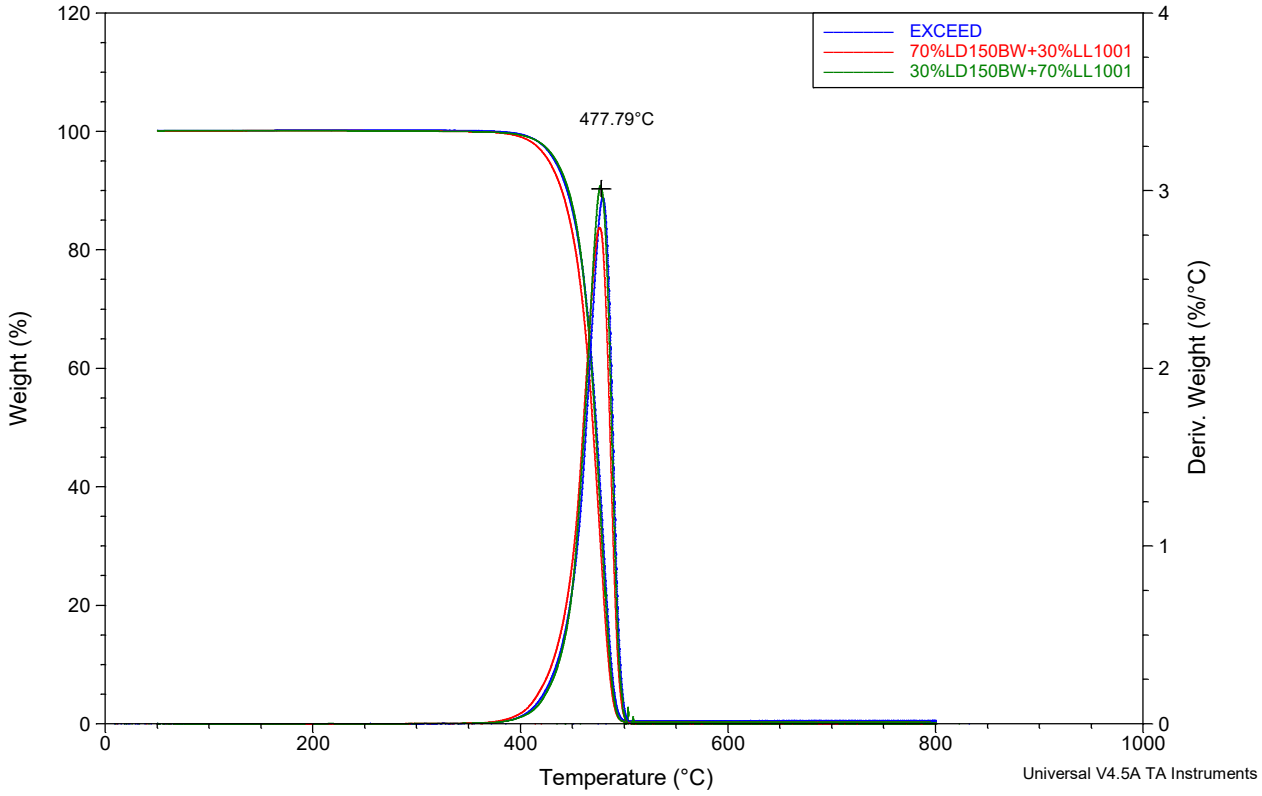

Figura 5.8: TGA per i tre materiali e temperatura di degradazione.

È stata condotta una TGA per individuare anche il tempo oltre al quale il polimero, mantenuto ad una elevata temperatura (prova isoterma) inizia a degradare. È stata considerata una temperatura di 260 °C, raggiunta molto spesso all'interno del canale della vite per basse e una finestra temporale di 30 minuti. I risultati di tale TGA sono riportati in Figura 5.9 dove sono tracciati gli andamenti del peso in percentuale dei campioni in funzione del tempo. Con lo scorrere del tempo si nota che avviene perdita di peso e il calo maggiore si riscontra con il blend 70 LD150BW - 30 LL1001XV. I valori di perdita di peso però sono molto bassi, infatti la massima perdita vale poco meno dello 0,2% del peso iniziale e perciò non si può affermare che avvenga una significativa degradazione del materiale. I dati di questa prova devono essere confrontati con la massima temperatura raggiunta dal melt nell'estrusore e in contemporanea al tempo di residenza massimo del materiale nell'estrusore.

Il massimo tempo di residenza, secondo quanto simulato con il software, si ha per portate basse di materiale (50 kg/h) ed ammonta a 495 secondi, ovvero poco più di 8 minuti. Ad esempio, considerando il materiale che si scalda maggiormente (Exceed 1018 HA) e un profilo di usura 1-2-2 (dai paragrafi successivi risulta il più critico), la temperatura massima di circa 260 °C si raggiunge per un livello di usura massimo di 0,4 mm. Considerando anche che il materiale non permane all'interno dell'estrusore alla massima temperatura per tutto il tempo di residenza, si può affermare che il polimero non degrada. Avendo preso in considerazione il caso peggiore, tutti i casi in cui il livello di usura e il profilo di usura sono inferiori, anche per gli altri due materiali non si assiste ai fenomeni di degradazione del polimero.

Le temperature massime raggiunte nell'estrusore e provenienti dai calcoli del software sono in realtà anche più elevate e i livelli di usura raggiungibili, utilizzando il metodo della massima temperatura media del melt, sono un poco più elevati. Questa TGA conferma dunque i risultati ottenuti col metodo precedente senza limitare ulteriormente i livelli di usura raggiungibili.

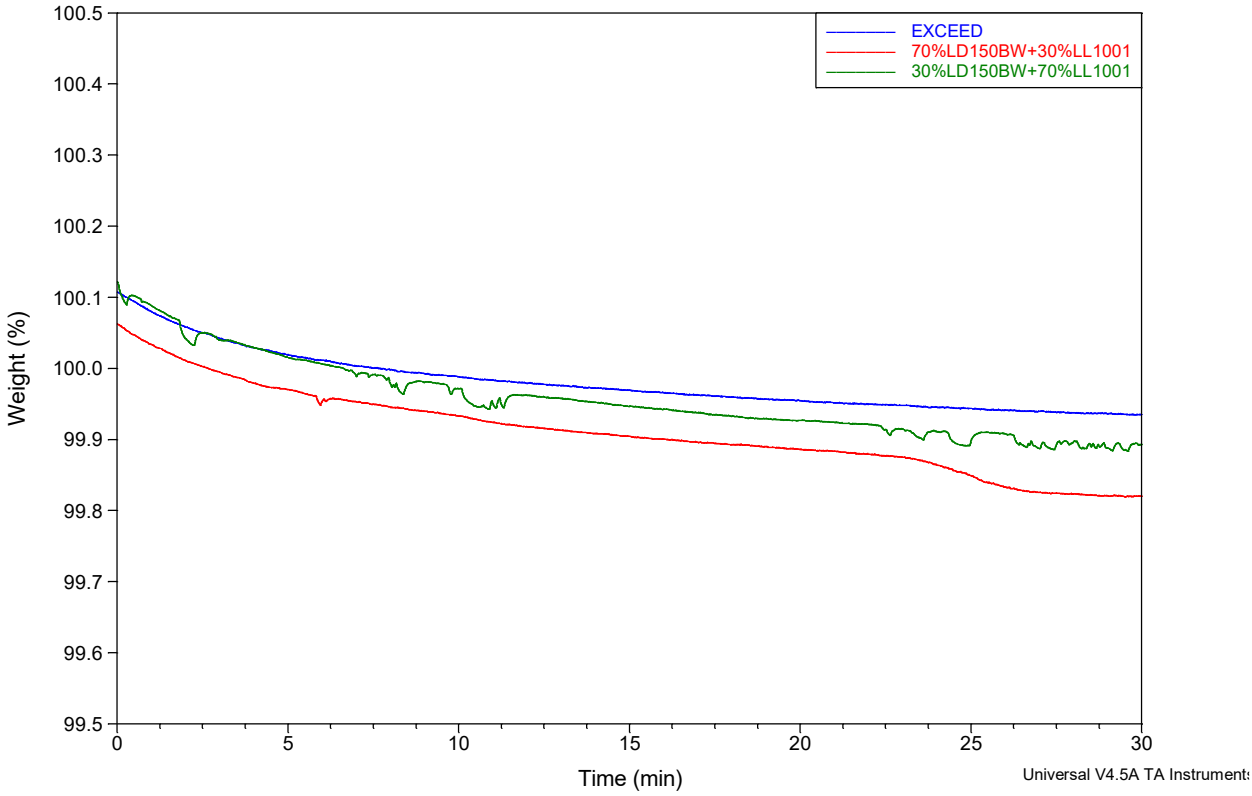

Figura 5.9: TGA per i tre materiali. Tempo di degradazione per una prova isoterma a 260 °C.

5.3 L'influenza della portata e del profilo di usura

Si procede in questo paragrafo a presentare la maggior parte, o almeno i più significativi grafici ottenuti dalle simulazioni. Le simulazioni svolte con diversi materiali, diverse portate e diversi profili di usura hanno prodotto andamenti di velocità, temperatura e pressione differenti tra loro. Per ogni materiale i risultati variano in funzione sia della portata che del profilo di usura. L'influenza di questi parametri è però molto simile tra tutti i materiali dunque in questo paragrafo ci si concentra sui risultati ottenuti per un materiale di esempio. Laddove questi parametri influenzano in maniera diversa, al variare del materiale, gli andamenti di velocità, temperatura e pressione sarà specificato il materiale in cui si verificano le differenze.

Il primo materiale processato virtualmente nell'estrusore è stato l'Exceed 1018 HA, il polietilene metallocenico lineare a bassa densità e a questo materiale si riferiranno tutti i grafici, se non diversamente specificato. Per ogni profilo di usura e portata è stato prodotto un grafico che riassume i tre andamenti di velocità di rotazione, pressione raggiunta al termine dell'estrusore e massima temperatura media raggiunta all'interno dell'estrusore in funzione del livello di usura.

Un esempio è il grafico in Figura 5.10 in cui in ascissa c'è il massimo gap (in mm) imposto tra la cresta del filetto e la superficie interna del cilindro e nel caso del profilo di usura 1-2-1 rappresenta il gap nella zona di compressione. In ordinata ci sono i valori assunti dalle tre grandezze osservate con le relative unità di misura. In un grafico di questo tipo è possibile tracciare sia i limiti di velocità che di temperatura (rispettivamente in blu scuro e rosso scuro). L'intersezione di queste ultime con l'andamento della velocità e della temperatura determinano il massimo livello di usura che può garantire il raggiungimento della portata richiesta e l'assenza di difetti. Se non si verifica

l'intersezione (come per la velocità in questo caso) significa che può essere raggiunto il massimo livello di usura senza che si presentino problemi.

Si può operare un confronto tra i due limiti e individuare la condizione più restrittiva. Se l'intersezione della temperatura limite con l'evoluzione della massima temperatura media avviene ad usure minori dell'intersezione tra la velocità limite e l'andamento della velocità significa che si presenterebbero difetti nel materiale prima di raggiungere la velocità massima possibile. La condizione più restrittiva è il raggiungimento della temperatura massima. Se viceversa l'intersezione delle velocità avviene ad usure minori dell'intersezione delle temperature allora significa che la portata non può essere più mantenuta costante anche se il materiale non presenta difetti. La condizione limitante è la velocità. Entrambe le limitazioni devono essere rispettate contemporaneamente quindi il massimo livello di usura sopportabile dall'estrusore e dal materiale è quello per cui si verifica la condizione più restrittiva.

Nel grafico di Figura 5.10, l'intersezione delle temperature avviene per un valore di usura nella zona di transizione pari a 0,68 mm, mentre non esiste intersezione tra le velocità. La vite dunque, per realizzare la portata di 60 kg/h, avendo collegata la filiera definita in Tabella 4.2, e senza produrre materiale con difetti può subire un'usura al massimo di 0,64 mm nella zona di transizione e di 0,32 mm nelle altre due zone.

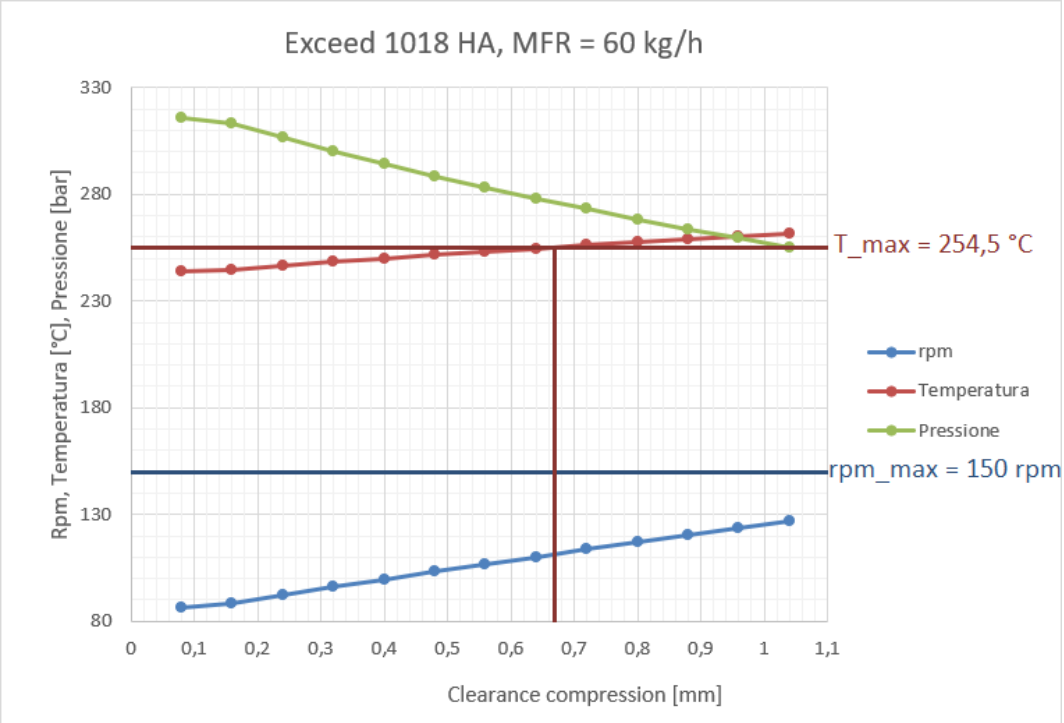

Figura 5.10: Andamento velocità, pressione e massima temperatura media con ricerca massimo livello di usura. Exceed 1018 HA, 60 kg/h, usura 1-2-1.

Per tutti i materiali analizzati, le portate e i profili di usura presi in considerazione per questa tesi, la condizione più restrittiva è il raggiungimento della temperatura limite.

Si presentano di seguito gli andamenti di velocità, temperatura e pressione in determinate condizioni di portata e usura, per il materiale Exceed 1018 HA, omettendo per un attimo la rappresentazione

grafica dei limiti di velocità e in alcuni casi poco significativi della temperatura. I limiti saranno reintrodotti poco più avanti.

In Figura 5.11, sono tracciati gli andamenti della velocità di rotazione della vite per diverse portate, avendo definito la filiera a valle, e per il profilo di usura 1-2-1. Si può notare che la velocità della vite aumenta con il progredire dell'usura in maniera pressoché lineare. Le velocità raggiunte per produrre maggiore portata sono necessariamente più elevate di quelle necessarie per realizzare portate più basse e questo è valido per tutti punti a parità di usura. Ad esempio infatti, in assenza di usura (Clearance compression = 0,08 mm), la velocità per processare una portata di 70 kg/h è di 103,1 rpm la quale è maggiore degli 86,2 rpm per processare 60 kg/h e maggiore a sua volta dei 70,3 rpm necessari per produrre 50 kg/h. Aumentando l'usura aumenta in maniera progressiva anche la velocità fino a raggiungere, per un valore di usura della zona di compressione pari a 1,04 mm, i 152,2 rmp per i 70 kg/h, i 126,8 rpm per i 60 kg/h e i 103 rpm per i 50 kg/h.

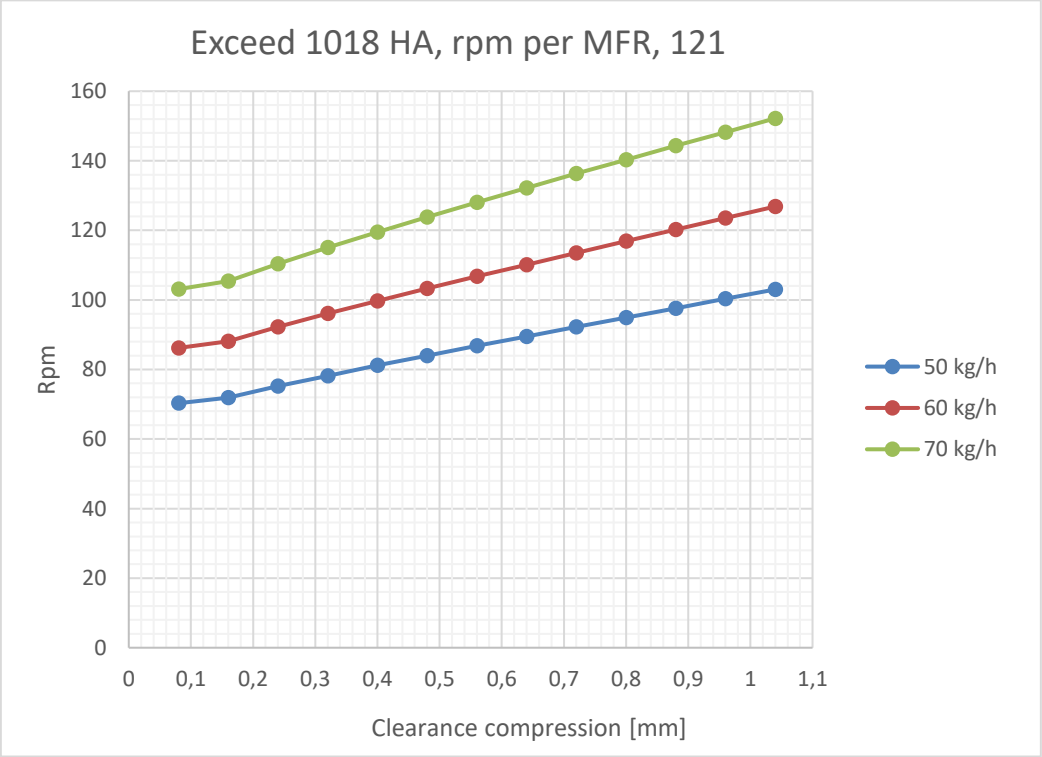

Figura 5.11: Andamento della velocità per diverse portate. Die definition, materiale Exceed 1018 HA, profilo di usura 1-2-1.

Si può notare che le tre rette siano leggermente divergenti tra loro e ciò significa che la velocità della vite, con il progredire dell'usura, deve essere incrementata in misura maggiore se le portate sono più elevate. L'incremento in percentuale della velocità, utilizzando come riferimento la velocità in cui non c'è usura, è però il medesimo per tutte e tre le portate, a parità di livello di usura. Ad esempio, dalla condizione di vite nuova a quella di massima usura considerata per le simulazioni, si assiste ad un aumento della velocità pari al 47% della velocità nel caso di usura assente, sia per la portata di 50 kg/h che di 60 kg/h che di 70 kg/h. Oppure ancora, in corrispondenza di una clearance nella zona di compressione pari a 0,56 mm si ha un incremento del 24% della velocità a partire da quella raggiunta in condizioni di vite intatta.

Gli andamenti delle velocità in funzione delle tre portate hanno un comportamento simile anche per gli altri due profili di usura. Sia nel profilo 1-1-2 che in quello 1-2-2 i tre andamenti (uno per ogni portata) sono leggermente divergenti tra loro. L'incremento della velocità per il profilo 1-2-2 è lineare similmente all'1-2-1 e anche per questo profilo l'incremento in percentuale della velocità dipende solo dall'usura e dal valore iniziale della velocità, legato alla portata. In questo caso, si assiste ad un aumento del 65% circa della velocità in caso di usura massima e del 37 % circa quando il gap nelle zone di compressione e di dosaggio vale 0,56 mm.

L'evoluzione della velocità per il profilo 1-1-2 (Figura 5.12) si discosta molto dagli altri due. Per questo infatti la velocità dapprima aumenta, poi diminuisce e infine aumenta nuovamente realizzando così un andamento anomalo. Questa anomalia sarà approfondita nel sottoparagrafo 5.3.1.

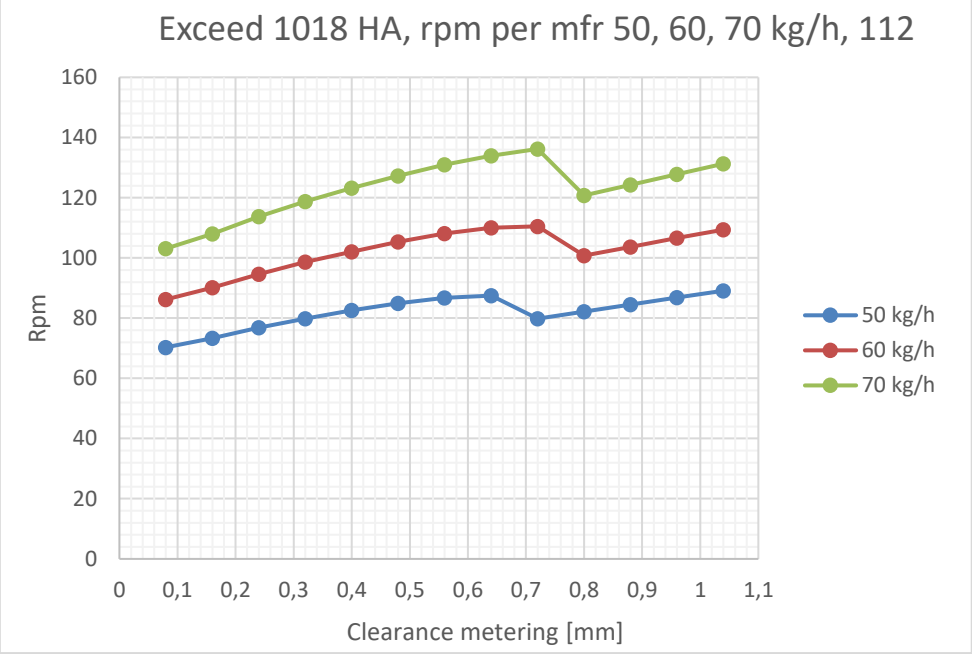

Figura 5.12: Andamento della velocità per diverse portate. Die definition, materiale Exceed 1018 HA, profilo di usura 1-1-2.

Per quanto riguarda la velocità si può realizzare ancora un confronto tra i diversi livelli di usura a parità di portata. Si riporta come esempio la portata di 60 kg/h, in Figura 5.13. Il profilo 1-2-2 causa un incremento più marcato delle velocità rispetto agli altri due, infatti presenta un'usura complessiva maggiore degli altri e per compensare il trafilamento di portata che ne consegue, è necessario aumentare la velocità in misura maggiore. Trascurando il tratto anomalo del profilo 1-1-2 e considerando quindi solo i valori di velocità per basse usure, si può notare che il profilo 1-1-2 ha conseguenze peggiori sulle performance dell'estrusore rispetto al profilo 1-2-1. Questo comportamento è presente per tutti e tre i valori di portata considerati.

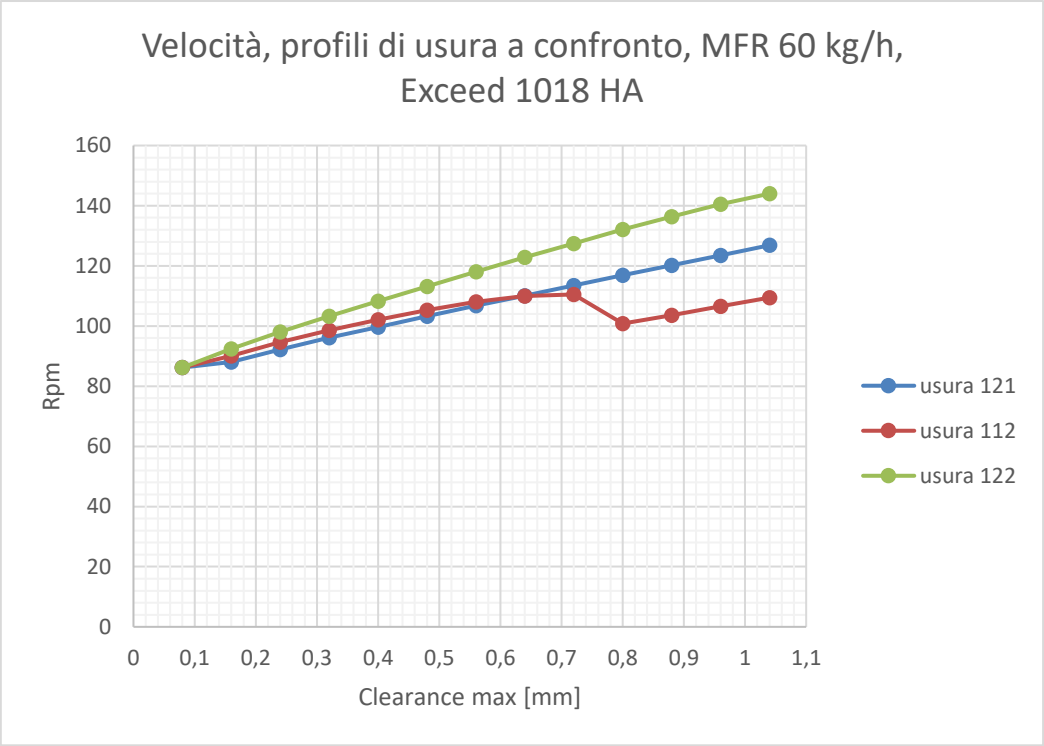

Figura 5.13: Andamento della velocità per diversi profili di usura. Die definition, materiale Exceed 1018 HA, portata di 60 kg/h.

Si passa ora ad analizzare gli andamenti delle temperature, in particolare della massima temperatura media raggiunta nell'estrusore, in questo caso sempre per il materiale Exceed 1018 HA. In Figura 5.14, sono tracciati gli andamenti delle temperature per tutti e tre i valori di portata nel caso del profilo di usura 1-2-1. In assenza di usura, all'aumentare della portata aumenta anche la temperatura, infatti per avere portate maggiori la vite deve ruotare più velocemente e questo causa in ultimo il riscaldamento del polimero. Questo è valido anche per viti usurate. L'aumento dell'usura ha come conseguenza anche l'incremento delle temperature che in questo caso seguono uno sviluppo lineare. Diversamente dalla velocità, le tre linee non divergono, ma si trovano spostate in direzione verticale di un valore pari alla differenza che intercorre tra le temperature raggiunte quando l'usura è nulla. Ad esempio, tra l'andamento della temperatura per una portata di 60 kg/h e quello per una portata di 70 kg/h è presente una differenza costante di circa 6,5 °C.

Il profilo di usura 1-2-2 presenta un aumento lineare delle temperature del tutto simile a quello di 1-2-1 per quanto riguarda lo scostamento reciproco dei vari andamenti. Ad esempio infatti, anche per questo profilo la differenza tra l'andamento relativo ai 60 kg/h e quello relativo ai 70 kg/h rimane costante e vale circa 6,5 °C. Il profilo 1-1-2 invece mostra solo una tendenza approssimativamente lineare.

In Figura 5.15 sono mostrati tre grafici con gli andamenti delle massime temperature medie in funzione del profilo di usura e ogni grafico differisce dall'altro per la portata imposta. Si può osservare che, ad esempio per la portata di 60 kg/h, la temperatura per il profilo di usura 1-2-2 aumenta in misura maggiore rispetto agli altri due profili, in linea anche con i risultati delle velocità. Il profilo 1-2-1 risulta nuovamente il meno impattante sulle performance dell'estrusore, per quanto riguarda le temperature di esercizio, a differenza del profilo 1-1-2 che si posiziona in una zona intermedia tra gli altri due profili.

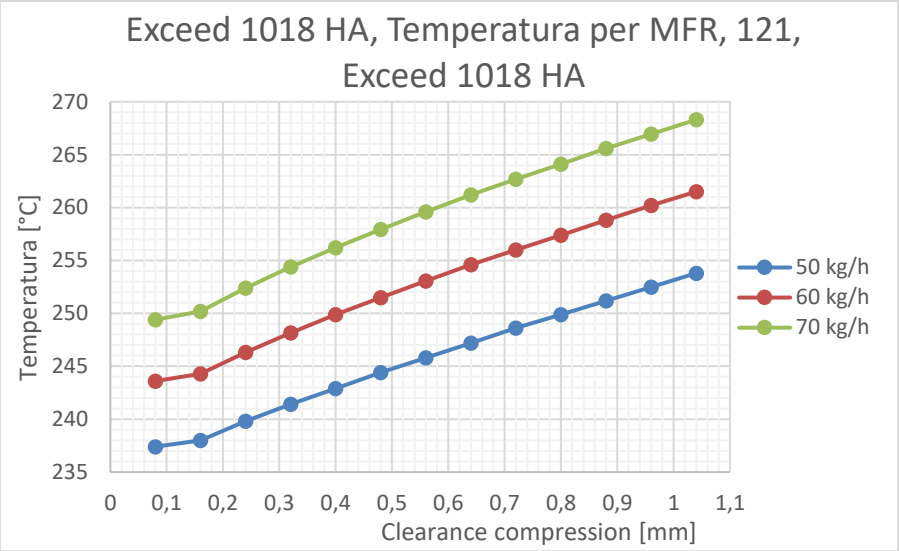

Figura 5.14: Andamento della massima temperatura media per diverse portate. Die definition, materiale Exceed 1018 HA, profilo di usura 1-2-1.

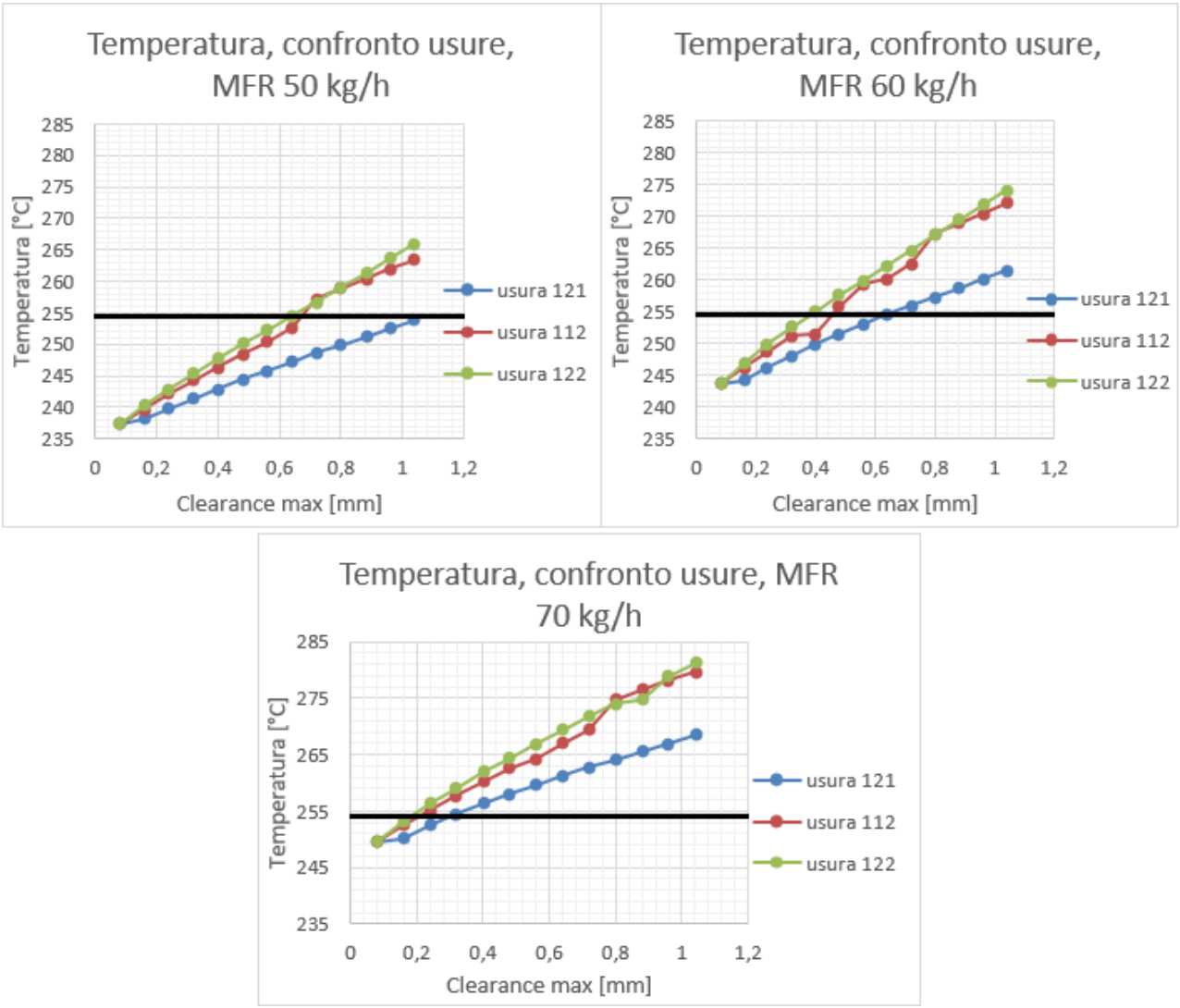

Figura 5.15: Andamenti delle massime temperature medie per i tre profili di usura con tracciamento della temperatura limite e a portata costante in ogni grafico. I grafici si differenziano per la portata imposta. Die definition, materiale Exceed 1018 HA.

Sempre in Figura 5.15 sono stati tracciati i limiti di temperatura per poter individuare i profili di usura che maggiormente influenzano il mantenimento delle prestazioni dell'estrusore, quindi ricercare se la portata di materiale è una variabile significativa e identificare dunque i livelli di usura che l'estrusore può sopportare.

Per quanto riguarda i profili di usura si può subito notare che il più debilitante è l'1-2-2, seguito dall'1-1-2, infine dal 1-2-1. Prendendo ad esempio il grafico con 50 kg/h l'intersezione dell'andamento della massima temperatura media del melt con la temperatura limite per il profilo 1-2-2 avviene per un livello di usura di 0,64 mm nelle zone di compressione e dosaggio, mentre l'intersezione non si verifica per il profilo 1-2-1. Ciò significa che l'estrusore può processare 50 kg/h indipendentemente dall'usura registrata se questa avviene con un profilo 1-2-1, mentre per l'altro profilo esiste un limite di usura oltre al quale l'estrusore non può andare senza che ci sia degradazione del polimero.

Osservando i tre grafici contemporaneamente (Figura 5.15) si nota subito che la portata è un fattore importante per sapere se il polimero estruso sarà qualitativamente accettabile. Aumentando la portata infatti l'intero set di curve si sposta verso temperature più elevate e di conseguenza l'intersezione avviene a usure sempre minori. Si analizza ad esempio il profilo 1-2-1. Per una portata di 50 kg/h l'usura massima che può sopportare la vite è la massima considerata in questa tesi, per una portata di 60 kg/h l'usura ammissibile è di 0,64 mm nella zona di compressione, infine per la portata di 70 kg/h l'usura permessa scende ancora fino a 0,32 mm nella zona di compressione.

Dagli andamenti delle temperature e le relative intersezioni con la temperatura limite si può desumere che se l'estrusore deve garantire la possibilità di processare portate elevate senza che avvenga degradazione del polimero allora l'usura che può tollerare il filetto della vite è basso. La vite, nel caso lavori l'Exceed 1018 HA, può sopportare un'usura massima di circa 0,2 mm. Se invece è permesso che l'estrusore processi meno portata l'usura ammissibile cresce, e sapendo il profilo di usura e il livello di usura che presenta la vite è possibile stabilire la massima portata che l'estrusore può ancora lavorare senza che si originino difetti nel materiale.

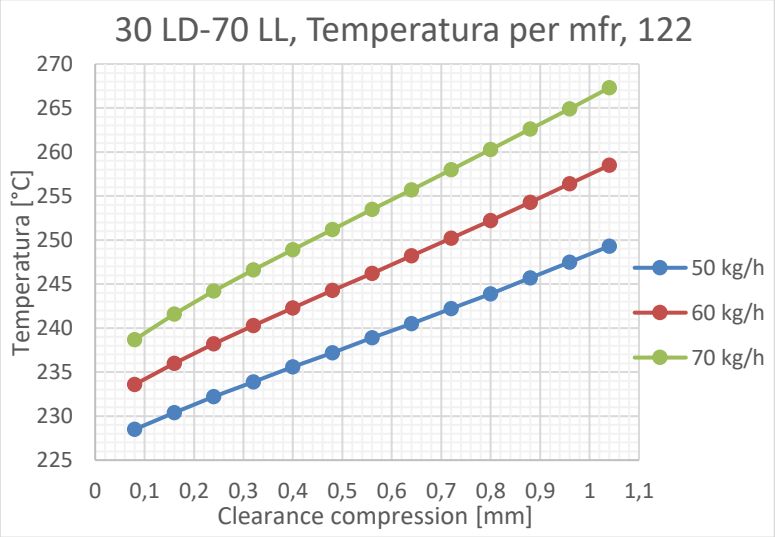

Figura 5.16: Andamento della massima temperatura media per diverse portate. Die definition, materiale miscela 30 LD150BW - 70 LL1001XV, profilo di usura 1-2-2.

Per le due miscele l'influenza della portata sulla temperatura, avendo definito il profilo di usura, porta ad andamenti delle temperature leggermente divergenti tra loro e non si assiste al semplice spostamento delle curve. Questo è mostrato in Figura 5.16.

L'ultima grandezza ad essere stata osservata è la pressione che si raggiunge al termine dell'estrusore. Questa non è altro che la pressione necessaria a far scorrere il polimero fuso attraverso tutto il canale della filiera e dipende dalla geometria dei canali e dalla viscosità del materiale. Considerando fisse la geometria della filiera e la portata di materiale che fluisce nel canale, la pressione da raggiungere al termine dell'estrusore varia solo in funzione della viscosità. Viscosità elevate e quindi attriti interni del materiale elevati causano l'esigenza di avere una pressione più elevata, e viceversa una viscosità più bassa permette di avere pressioni minori. La viscosità dipende dalla temperatura e dato che la pressione da raggiungere dipende dalla viscosità allora si può dire che la pressione dipende dalla temperatura.

Si sono tracciati dunque gli andamenti delle pressioni, per ogni profilo di usura e per le tre diverse portate. All'aumentare dell'usura le pressioni calano poiché la temperatura del melt aumenta ed è necessaria una pressione minore per far fluire tutto il polimero fuso attraverso la filiera.

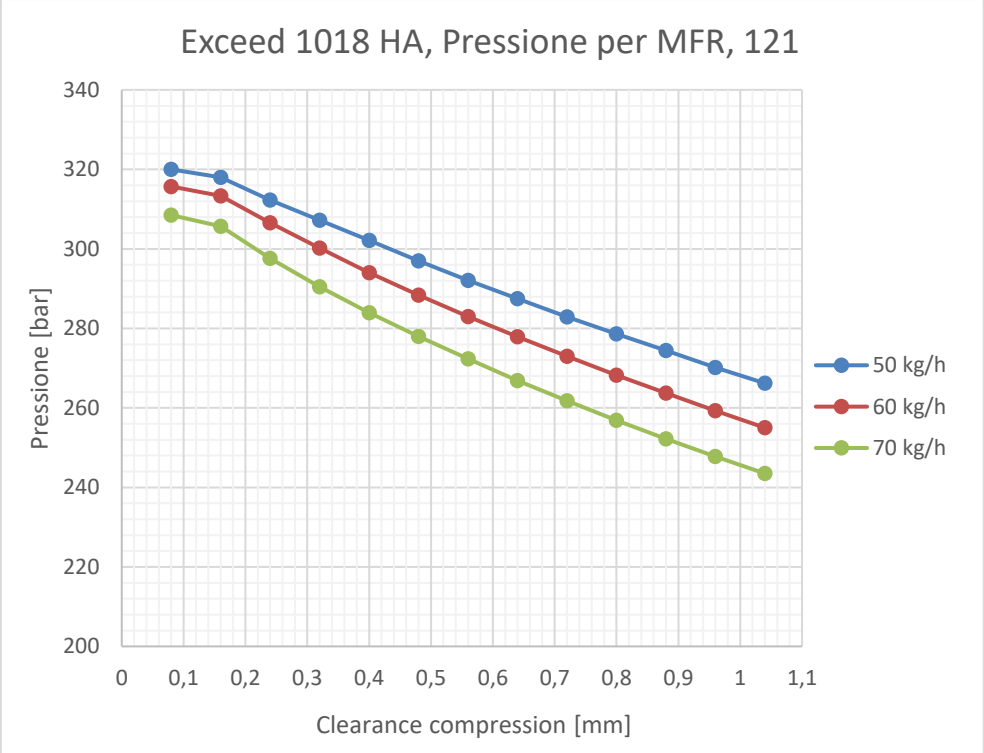

Figura 5.17: Andamento della pressione al termine dell'estrusore per diverse portate. Die definition, materiale Exceed 1018 HA, profilo di usura 1-2-1.

In Figura 5.17 è mostrata la diminuzione della pressione nel caso di profilo di usura 1-2-1. In condizioni di vite nuova, così come a parità degli altri livelli di usura, all'aumentare della portata diminuisce la pressione perché le temperature (come visto nell'analisi delle temperature) aumentano con la portata. Anche le pressioni, così come le velocità della vite e le temperature, seguono un andamento pressoché lineare, decrescente in questo caso. Aumentando il livello di usura inoltre le tre curve si discostano lievemente l'una dalle altre in maniera divergente.

Similmente alle velocità, i decrementi della pressione, a parità di livello di usura, in funzione delle varie portate sono accomunati dal fatto che la diminuzione in percentuale è la medesima. Ovvero ad esempio, per un'usura nella zona di compressione di 1,04 mm la pressione ha un valore del 20% circa inferiore rispetto alla pressione nel caso di vite nuova e questo accade per tutte e tre le portate. O ancora per un valore di usura nella zona di compressione di 0,56 mm si ha una diminuzione della pressione pari a circa il 10%.

Nel caso delle miscele invece si assiste alla convergenza degli andamenti delle pressioni in funzione della portata (Figura 5.18). La convergenza in alcuni casi, non è solo una tendenza delle curve ad avvicinarsi tra loro rimanendo comunque ben distinte, ma avviene proprio in un punto. Gli andamenti della pressione infatti si uniscono raggiungendo un unico valore di pressione in corrispondenza della massima usura.

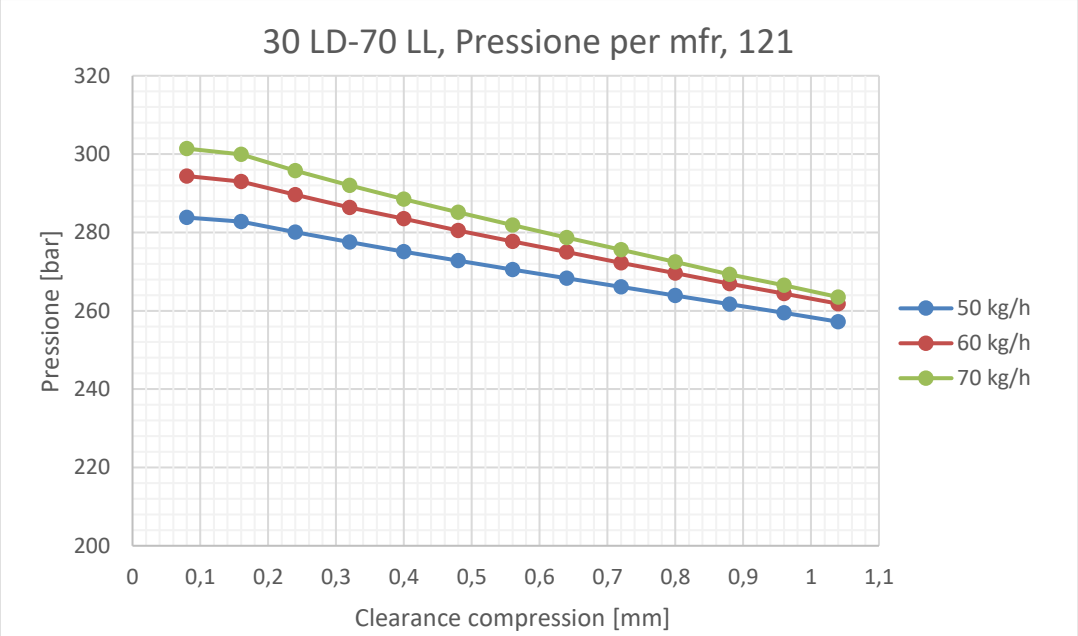

Figura 5.18: Andamento della pressione al termine dell'estrusore per diverse portate. Die definition, materiale miscela 30 LD150BW - 70 LL1001XV, profilo di usura 1-2-1.

In Figura 5.19 è mostrata l'influenza del profilo di usura sull'andamento della pressione a parità di portata che in questo caso è di 60 kg/h. Si assiste ad un decadimento della pressione più marcato per il profilo 1-2-2, segno che indica che questa è la condizione peggiore di usura. Il profilo 1-1-2 ha una diminuzione della pressione meno evidente, ma l'1-2-1 presenta una condizione ancora migliore, confermando che quest'ultimo profilo di usura è il migliore con cui si possa usurare la vite.

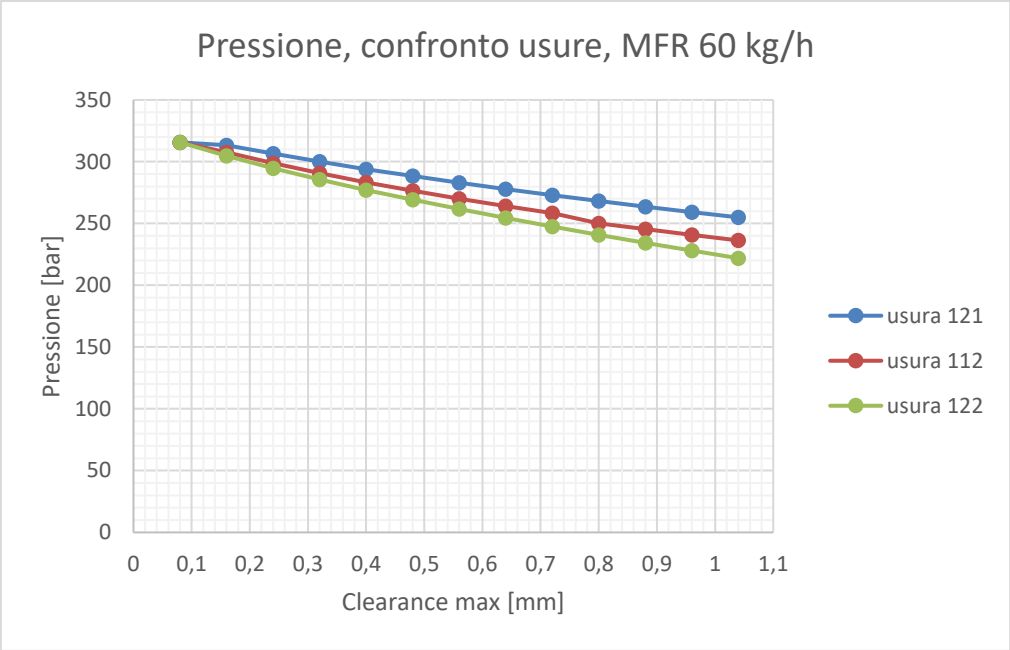

Figura 5.19: Andamento della pressione al termine dell'estrusore per diversi profili di usura. Die definition, materiale Exceed 1018 HA, portata 60 kg/h.

5.3.1 Anomalia del profilo di usura 1-1-2

In questo sottoparagrafo si analizza e approfondisce l'anomalia riscontrata nel profilo di usura 1-1-2, maggiormente visibile nell'andamento della velocità della vite e presente per tutti i materiali. Un esempio è riportato nel paragrafo precedente e in particolare nella Figura 5.12.

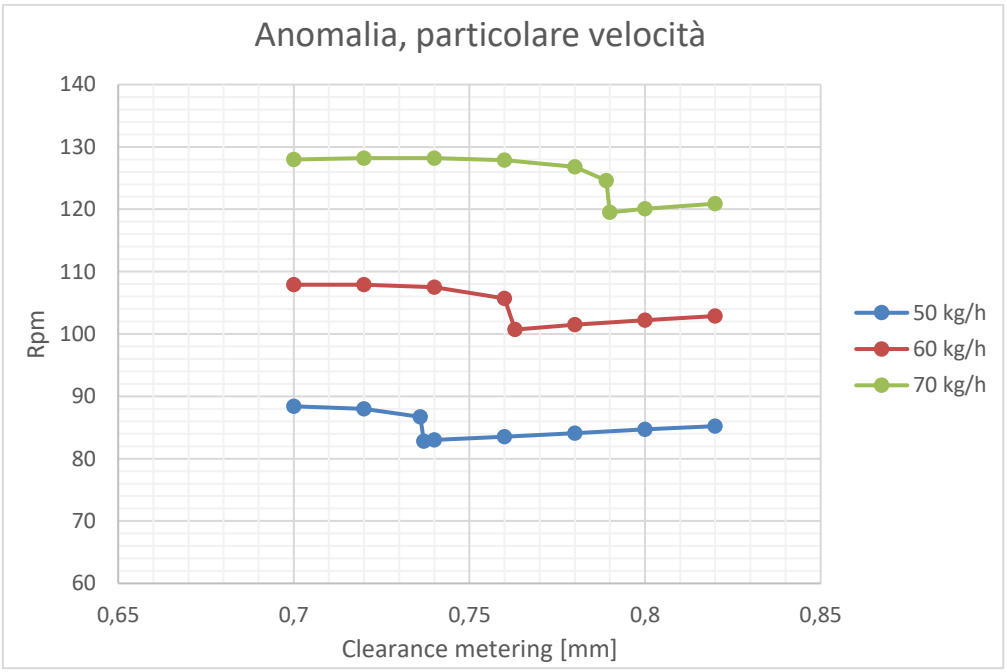

Figura 5.20: Particolare dell'andamento della velocità per diverse portate. Die definition, materiale miscela 30 LD150BW - 70 LL1001XV.

Per approfondire l'anomalia riscontrata si è realizzato un infittimento dei punti laddove la velocità è decrescente, ovvero tra circa gli 0,7 mm e gli 0,8 mm di gap tra il filetto e il cilindro nella zona di metering. Lo scopo dell'infittimento è quello di conoscere in che modo avviene il decremento. In Figura 5.20 si può vedere che la diminuzione della velocità, all'aumentare dell'usura, ha un gradino e non avviene in maniera continua. Questo accade per tutte e tre le portate di materiale e per tutti e tre i materiali. Un gradino nei risultati potrebbe portare a pensare che si tratti di qualche errore di calcolo, ma l'anomalia avviene a diversi livelli di usura in funzione della portata quindi potrebbe essere un problema della fisica del sistema e accadere davvero così nella realtà. Si indagano quindi entrambe le possibilità.

Solitamente una vite usurata non presenta un decremento della velocità allo scopo di mantenere la portata costante perché, con un ragionamento inverso, significherebbe che la portata aumenta mantenendo una velocità costante e usurando la vite. Si cerca allora di capire come possa avvenire la diminuzione di giri vite.

Sono stati tracciati anche gli andamenti di pressione al termine dell'estrusore, della pressione massima raggiunta nell'estrusore e della temperatura. Per quanto riguarda la temperatura è stato riscontrato un gradino ma di piccola entità (circa 2 °C) e quindi non è riportato. Sono riportati in Figura 5.21 gli andamenti delle pressioni che nel caso di quella massima subiscono prima una flessione e poi decrescono in modo quasi istantaneo variando di poco il livello di usura, infine si assestano intorno ad un valore.

L'andamento della pressione lungo l'estrusore, come esposto nel paragrafo 5.1, ha un massimo al termine della zona di compressione. Questo significa che la pressione, nella zona di dosaggio, spinge il materiale verso l'uscita dell'estrusore e il trafilamento sopra le creste del filetto rappresenterebbe un termine di portata positivo mentre il trafilamento nelle altre due zone rappresenta una componente negativa di portata. La componente di portata dovuta al trafilamento (10) dipende in modo direttamente proporzionale dal cubo del gap tra filetto e cilindro e quindi è maggiore nella zona di dosaggio, dipende inoltre in maniera direttamente proporzionale dal gradiente di pressione, che nella zona di dosaggio è minore rispetto alla zona di compressione e dipende in modo inversamente proporzionale anche dalla viscosità che nella zona di dosaggio è inferiore rispetto alla zona di transizione poiché le temperature sono più alte. Per piccoli gap è possibile che il trafilamento negativo della zona di compressione sia maggiore di quello positivo della zona di metering. Aumentando l'usura il trafilamento positivo potrebbe superare in modulo quello negativo e quindi potrebbe essere necessaria una velocità minore della vite. Aumentando ancora l'usura però la portata spinta dal filetto (la cui altezza è diminuita sensibilmente) potrebbe essersi ridotta a tal punto che anche sommandola a quella del trafilamento si ottiene un valore inferiore e quindi la vite deve ruotare di nuovo più velocemente.

Dalla Figura 5.21 si nota però che il gradiente di pressione (differenza tra la pressione massima e la pressione di uscita) diminuisce all'aumentare dell'usura in misura maggiore nella zona dosaggio, diminuendo l'effetto del gradiente di pressione sul trafilamento positivo, il che rende anomalo che il trafilamento positivo abbia una importanza così elevata. Inoltre, lo shear rate al di sopra della cresta del filetto non dipende sono dalla velocità della vite ma anche dalla differenza di pressione tra le due camere divise dal filetto e nella zona di transizione questa differenza di pressione è maggiore perché è maggiore il gradiente di pressione lungo tutta la zona. Questo fa sì che la viscosità nella zona di

transizione non sia più così differente da quella della zona di dosaggio, è quindi la componente positiva di portata di trafilamento assuma ancora meno importanza

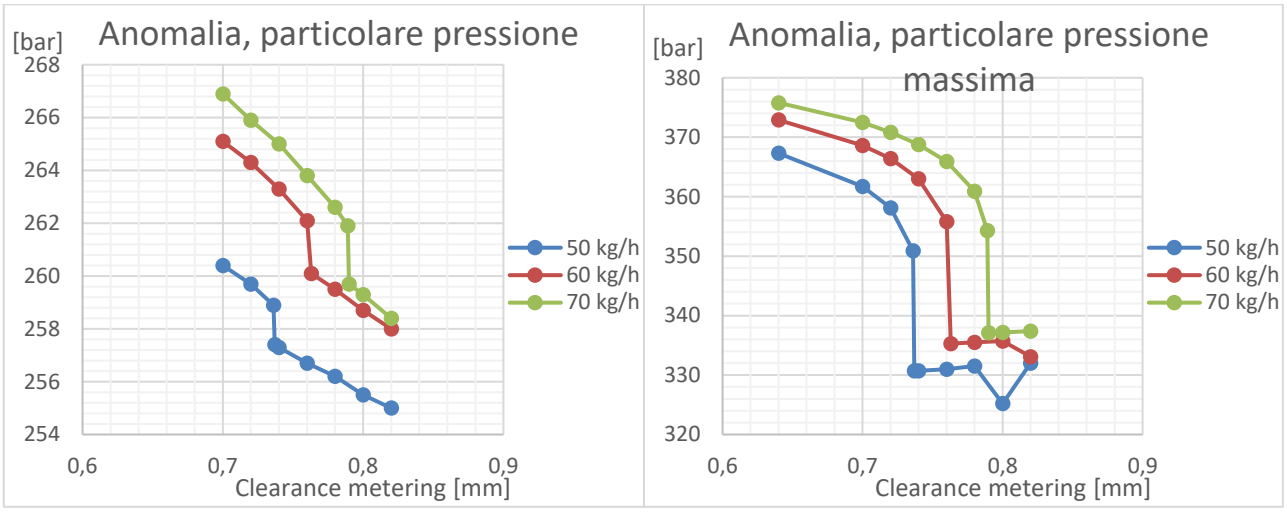

Figura 5.21: Particolare dell'andamento della pressione al termine dell'estrusore e della pressione massima raggiunta nell'estrusore. Die definition, materiale miscela 30 LD150BW - 70 LL1001XV.

Si sono svolte anche alcune simulazioni mantenendo la velocità di rotazione della vite costante e usurando la vite si è calcolata la portata di materiale ottenuta. In questo modo alcune grandezze (ad esempio lo shear rate) rimangono costanti al variare dell'usura poiché la velocità della vite è fissa. I risultati di queste simulazioni, in Figura 5.22, mostrano un'amplificazione dell'anomalia la quale avviene in corrispondenza dello stesso livello di usura. I valori di portata procedono a zig-zag passando da valori più bassi a valori più elevati. Questo andamento unitamente alle considerazioni precedenti sulla eventuale lieve influenza della portata di trafilamento e al fatto che si tratti di usure estremamente elevate portano a supporre che il problema sia di natura computazionale e quindi a livello di software.

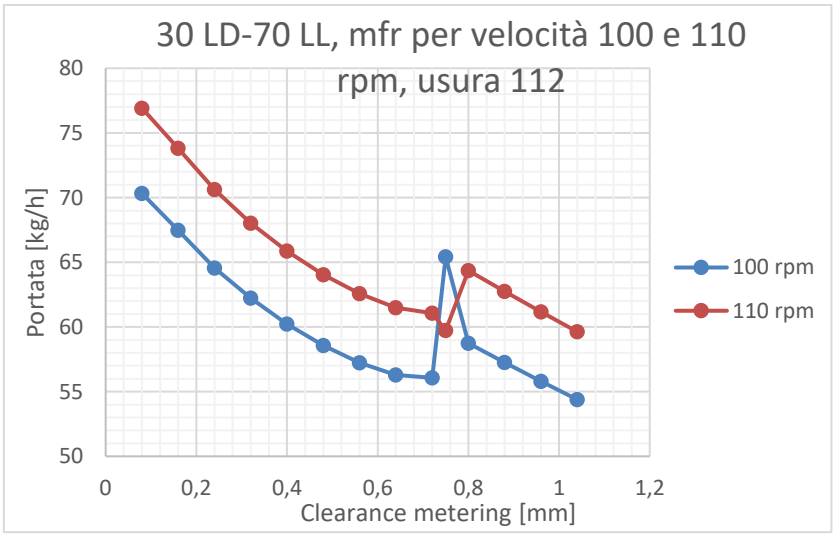

Figura 5.22: Andamento della portata in funzione della velocità della vite. Die definition, miscela 30 LD150BW - 70 LL1001XV.

La conclusione a cui si è giunti potrebbe essere smentita però nel caso prove sperimentali dimostrino il contrario. Nonostante ciò i risultati sperimentali non presenterebbero risultati così altalenanti ma eventualmente delle variazioni più uniformi e meno repentine.

5.4 L’influenza del materiale

In questo paragrafo si mettono a confronto gli andamenti di velocità della vite, della massima temperatura media del melt e della pressione raggiunta al termine della vite in funzione del materiale, avendo fissato portata e profilo di usura.

Nella Figura 5.23 sono stati tracciati gli andamenti delle velocità di rotazione della vite in funzione del materiale e a portata costante. Ogni grafico si differenzia dagli altri per la portata imposta. Sono stati omessi gli indicatori dei punti utilizzati per la creazione delle rette per poter agevolare la lettura delle linee di evoluzione della velocità. Dai grafici si può notare che le differenze di velocità tra un materiale e l’altro sono di piccola entità perché le curve reologiche sono molto simili tra loro. La velocità di rotazione dipende infatti molto dalle proprietà fluidodinamiche dei materiali e nel caso dei polimeri dalle proprietà reologiche.

Tutti gli andamenti, per la medesima portata, si discostano tra loro al massimo di circa 5 rpm. La pendenza delle due miscele è la stessa poiché i componenti di tali miscele sono identici anche se a proporzioni invertite. Il componente meno viscoso delle miscele è il polietilene a bassa densità LD150BW e dunque la miscela che possiede il 70% di questo componente presenta viscosità più basse rispetto all’altra miscela. Un estrusore che processa un materiale a viscosità più bassa produce meno portata, a parità di velocità di rotazione, di un materiale più viscoso. Di conseguenza è possibile notare che per processare la stessa portata l’estrusore con la miscela 70LD-30LL ruota più velocemente rispetto alla miscela con le proporzioni invertite. La viscosità molto simile dell’Exceed 1018 HA permette alla vite di ruotare alle stesse velocità circa delle miscele. Le differenze di viscosità dell’Exceed, rispetto alle due miscele si manifestano nella pendenza della retta. I grafici inoltre mostrano che per basse portate le velocità della vite per Exceed e 30-70 si somigliano molto, invece per portate elevate sono le velocità relative a Exceed e 70-30 a essere simili. Negli altri profili di usura gli andamenti sono pressoché uguali.

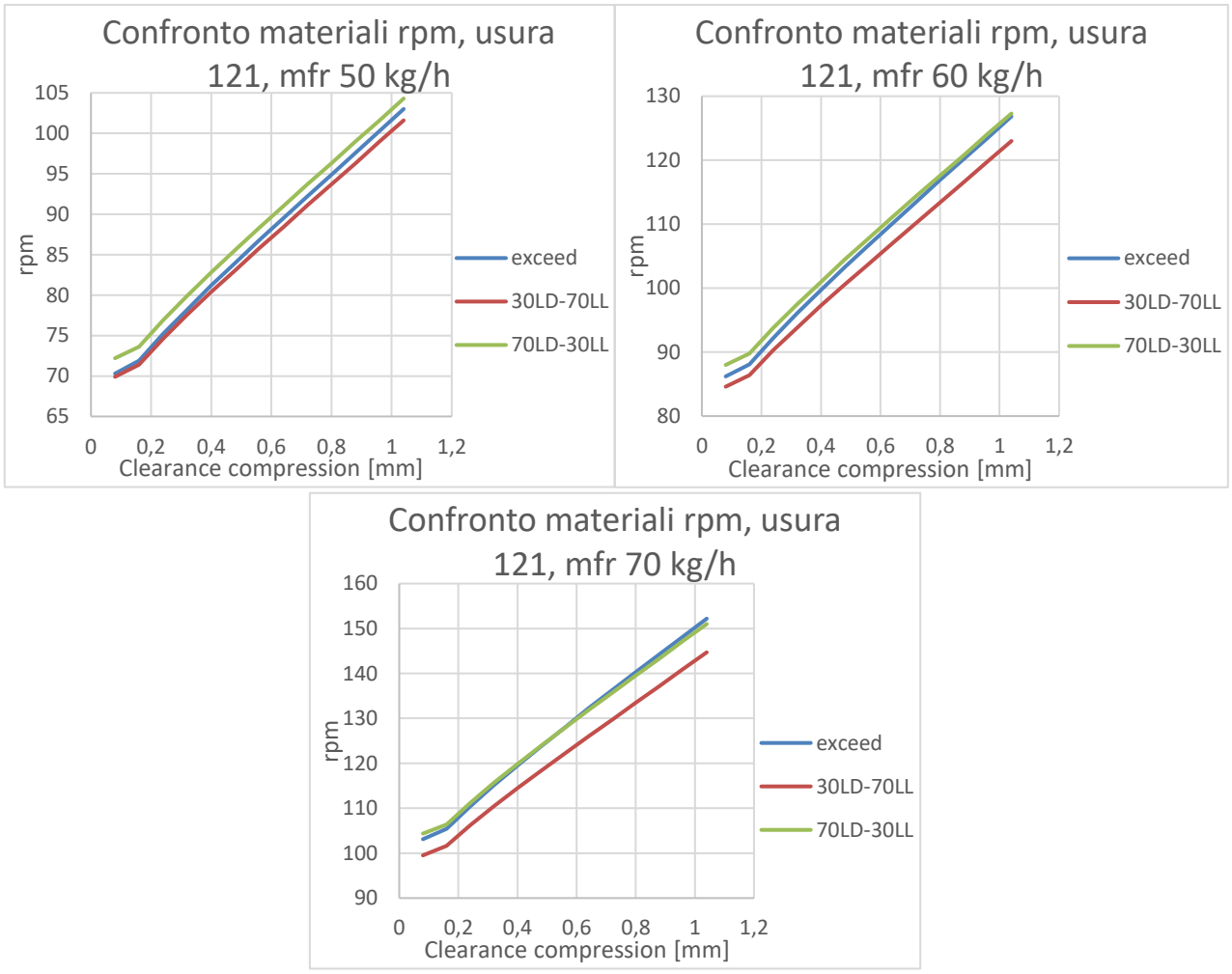

Figura 5.23: Andamenti di velocità di rotazione della vite per il profilio di usura 1-2-1 in funzione del materiale. In ogni grafico la portata è costante. I grafici si differenziano per la portata imposta.

Sono stati tracciati i grafici in funzione del materiale anche per l'evoluzione delle massime temperature medie raggiunte dal melt nell'estrusore. In Figura 5.24 sono rappresentati gli andamenti per il profilo di usura 1-2-2 e per ogni grafico la portata è costante. Le temperature della miscela 70LD-30LL sono generalmente più basse delle altre poiché, pur presentando viscosità un poco più basse dell'altra miscela e shear rate più alti (perché la velocità della vite è più elevata) e quindi maggiore generazione di calore, possiede un valore di calore specifico molto più alto. Il calore specifico interviene nella determinazione dell'aumento di temperatura e più è alto il calore specifico più è necessario calore per aumentare la temperatura del polimero. A parità di calore fornito ad esempio, un materiale con un C_p più elevato risulterà più freddo di uno con un C_p basso. L'Exceed 1018 HA invece possiede un valore di calore specifico più elevato del 30LD-70LL ma presenta una viscosità più elevata nonché una velocità della vite più alta (per produrre la stessa portata) e quindi viene generato più calore, che questa volta consente al polietilene metallocenico di avere una temperatura più elevata del 30LD-70LL. Quest'ultima differenza tende a diminuire all'aumentare della portata poiché aumentano le velocità della vite e l'effetto del calore specifico e degli shear rate è maggiore dell'effetto della viscosità sulla generazione di calore.

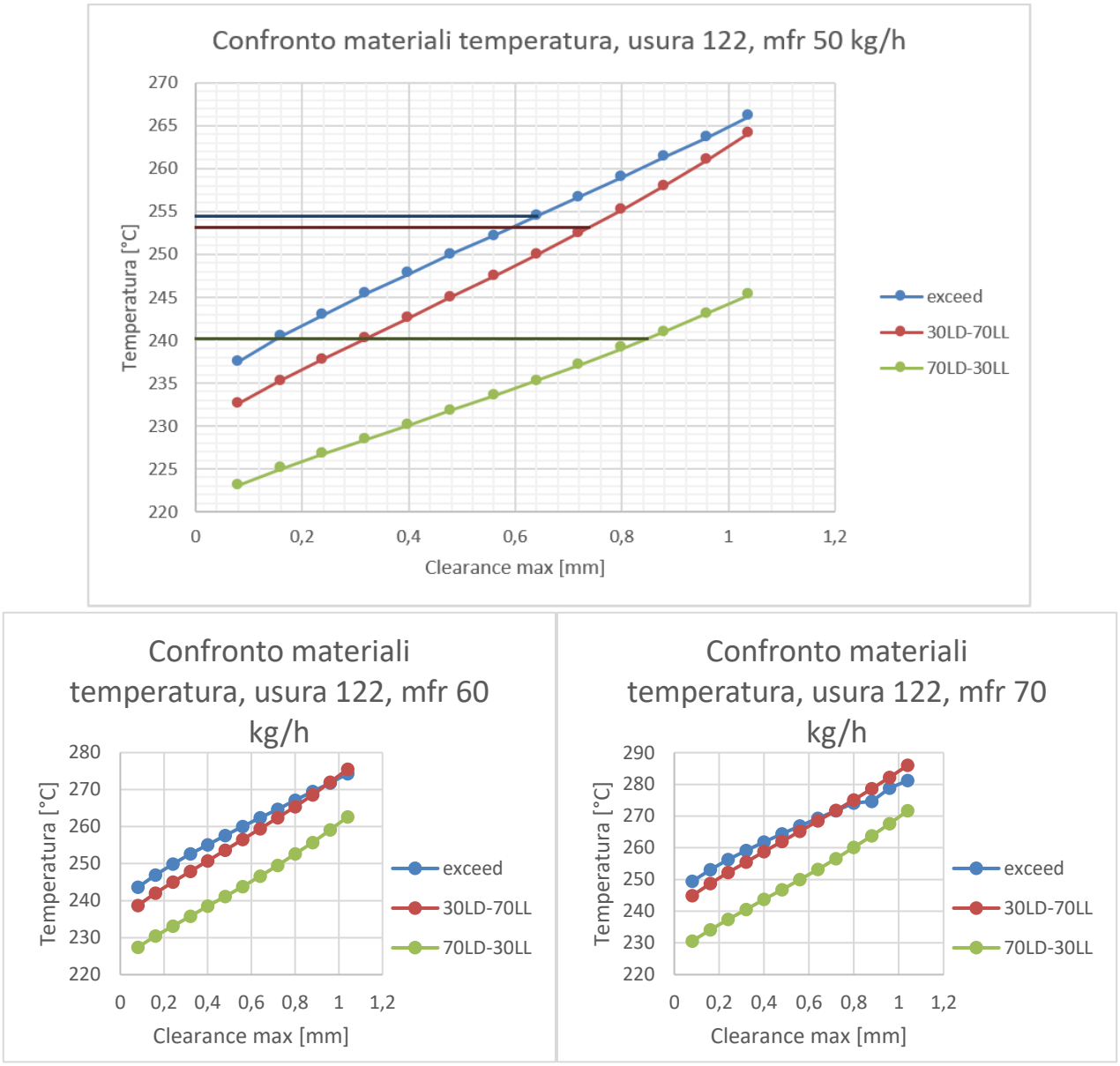

Figura 5.24: Andamenti delle massime temperature medie per il profilio di usura 1-2-2 in funzione del materiale. In ogni grafico la portata è costante. I grafici si differenziano per la portata imposta. Per la portata di 50 kg/h si sono evidenziati i limiti di temperature.

In Figura 5.24 per la portata di 50 kg/h sono stati tracciati i limiti di temperatura per ricercare il materiale che più soffre gli effetti dell'usura Si è cercato quel materiale per cui la degradazione del polimero avviene per valori minori di usura del filetto della vite. Detto in altri termini ancora, si vuole individuare il materiale per cui l'intersezione tra l'andamento della temperatura e il valore di temperatura limite avviene ad un livello di usura più basso rispetto agli altri materiali. I limiti di temperatura per ogni polimero o miscela sono tracciati in una tonalità più scura rispetto alla colorazione dei rispettivi andamenti della massima temperatura media e inoltre terminano nei rispettivi punti di intersezione. In questo modo l'Exceed 1018 HA si rivela il materiale più sensibile all'usura degradandosi (per una portata di 50 kg/h) quando l'usura delle zone di compressione e dosaggio vale 0,62 mm. Ad esso segue il 30LD-70LL che si degrada per un'usura di 0,72 mm e infine la miscela 70LD-30LL per un valore di usura di 0,84 mm. All'aumentare della portata questi limiti si spostano verso valori più bassi di usura. Al variare del profilo di usura variano anche i livelli massimi di usura consentiti. Il peggior caso si riscontra con l'Exceed 1018 HA, per un profilo di usura 1-2-2

e per una portata di 70 kg/h dove il massimo valore di usura della zona di compressione e dosaggio può valere 0,18 mm.

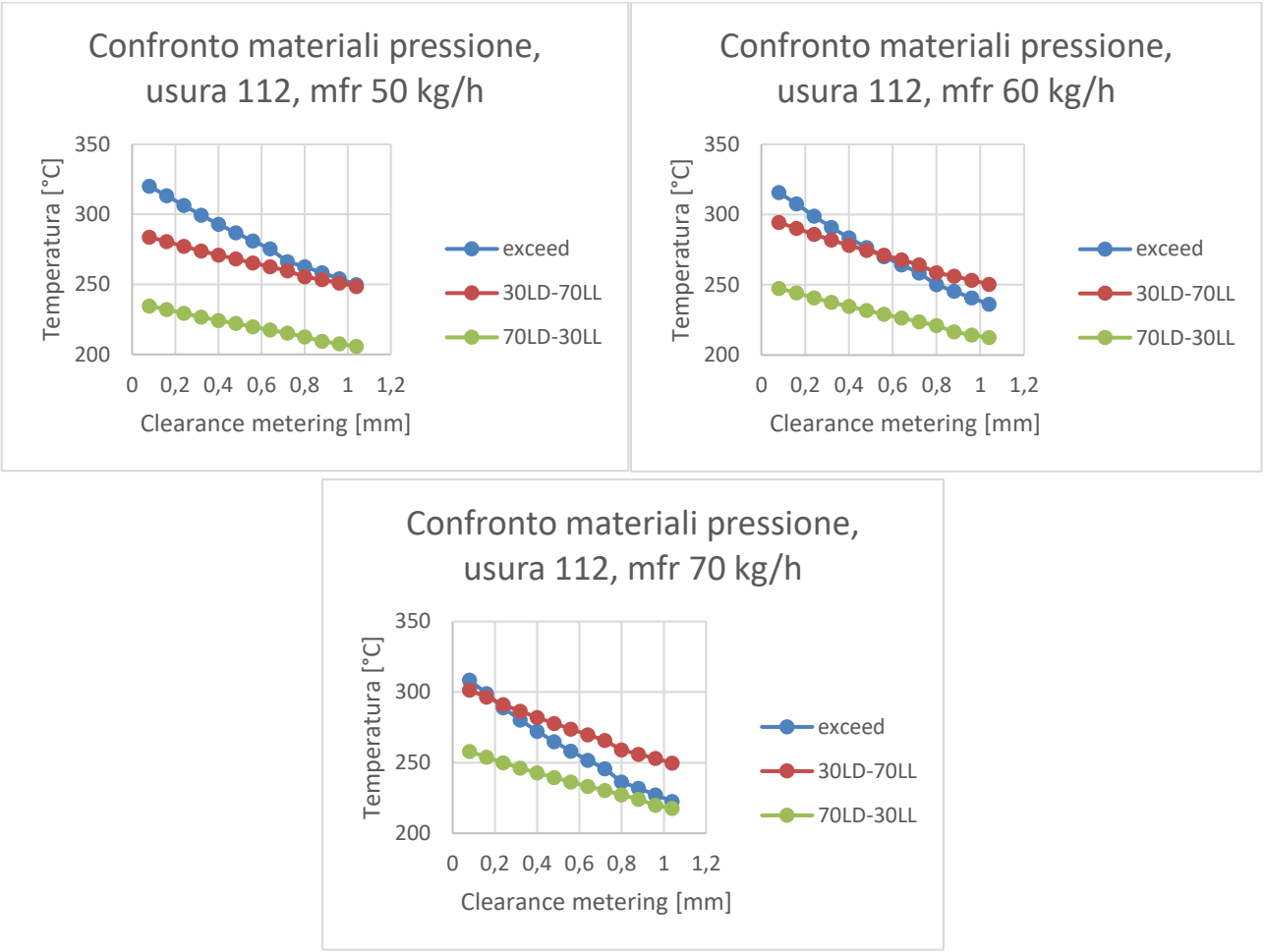

Figura 5.25: Andamenti di pressione della vite per il profilio di usura 1-1-2 in funzione del materiale. In ogni grafico la portata è costante. I grafici si differenziano per la portata imposta.

In Figura 5.25 sono tracciati gli andamenti delle pressioni raggiunte al termine dell'estrusore in funzione del materiale a portata costante e per un unico profilo di usura (1-1-2 in questo caso). Ogni grafico è stato realizzato imponendo una diversa portata. Ancora una volta gli andamenti, in questo caso della pressione, delle due miscele possiedono una pendenza simile ma si assestano su valori di pressione ben diverse. Più alte per la miscela più viscosa (30LD-70LL) e più basse per quella meno viscosa (70 LD-30LL). L'andamento della pressione del materiale Exceed 1018 HA invece, possiede una pendenza diversa, la quale è dovuta alle differenti proprietà termiche rispetto alle miscele. In questo caso i valori di pressione per basse portate sono confrontabili con quelli della miscela più viscosa, ma aumentando la portata, le pressioni che si raggiungono si assestano su valori intermedi rispetto a quelli delle due miscele.

5.5 Individuazione livello di usura

Nei paragrafi precedenti si è analizzata l'influenza della portata, del profilo di usura e del materiale su alcune delle grandezze principali che caratterizzano il funzionamento dell'estrusore. L'estrusore, in quel caso era accoppiato con una determinata filiera. In questo breve paragrafo invece si è voluto tracciare un grafico delle grandezze che prescindesse dalle caratteristiche della filiera a cui è collegato

l’estrusore. Per queste simulazioni si è utilizzata la funzione di definizione delle condizioni al termine dell’estrusore “screw tip pressure”, al posto della “die definition” usata nei paragrafi precedenti.

Un grafico di questo tipo vuole avere come obiettivo il rilevamento del livello di usura della vite avendo noti il materiale processato e alcuni parametri operativi della macchina. Possedendo anche informazioni sul probabile profilo di usura della vite, in base a rilevazioni precedenti o a dati storici, il livello di usura può essere individuato con più precisione e sicurezza. Se questa informazione dovesse mancare potrebbe essere comunque possibile risalire al profilo di usura proprio tramite questi grafici.

Le grandezze necessarie per individuare il livello di usura della vite sono la portata di materiale processata dall’estrusore e due grandezze a scelta tra la pressione raggiunta al termine dell’estrusore, la velocità a cui sta ruotando la vite e la temperatura del melt in uscita dall’estrusore. È preferibile utilizzare la pressione e la velocità della vite perché i loro valori sono noti con più precisione e sicurezza rispetto a quelli della temperatura. La temperatura mostrata dal software è il valore medio nella sezione del canale dove scorre il melt, mentre nella realtà la temperatura rilevata si riferisce più propriamente al melt vicino alle pareti del condotto. Nel condotto di uscita la temperatura è senz’altro più uniforme di quella all’interno del canale della vite, ma presenta ancora delle differenze tra centro del condotto e bordo esterno.

Note le sopracitate grandezze e il profilo di usura si entra nel grafico più adatto e tramite interpolazione delle curve tracciate è possibile individuare il livello di usura. Se il profilo di usura non è noto si assume un determinato profilo e si ricerca il punto di funzionamento nel grafico corrispondente alla scelta effettuata. Se non si dovesse trovasse il punto di funzionamento in tale grafico allora si procederebbe a ipotizzare un profilo diverso e si ripeterebbe il procedimento.

In Figura 5.26 è riportato uno dei grafici utili alla stima del livello di usura della vite. Sull’asse delle ascisse è presente la velocità della vite in rpm, sull’asse delle ordinate c’è la temperatura al termine dell’estrusore. Ogni curva colorata rappresenta l’evoluzione, dovuta all’usura, delle due grandezze sugli assi a pressione costante, pressione raggiunta al termine dell’estrusore. I tratti di curva neri rappresentano la medesima condizione di usura. Il valore a fianco esprime la massima distanza tra la cresta del filetto e la superficie interna del cilindro e dato che il profilo di usura del grafico è l’1-2-1, si riferisce al gap esistente nella zona di compressione.

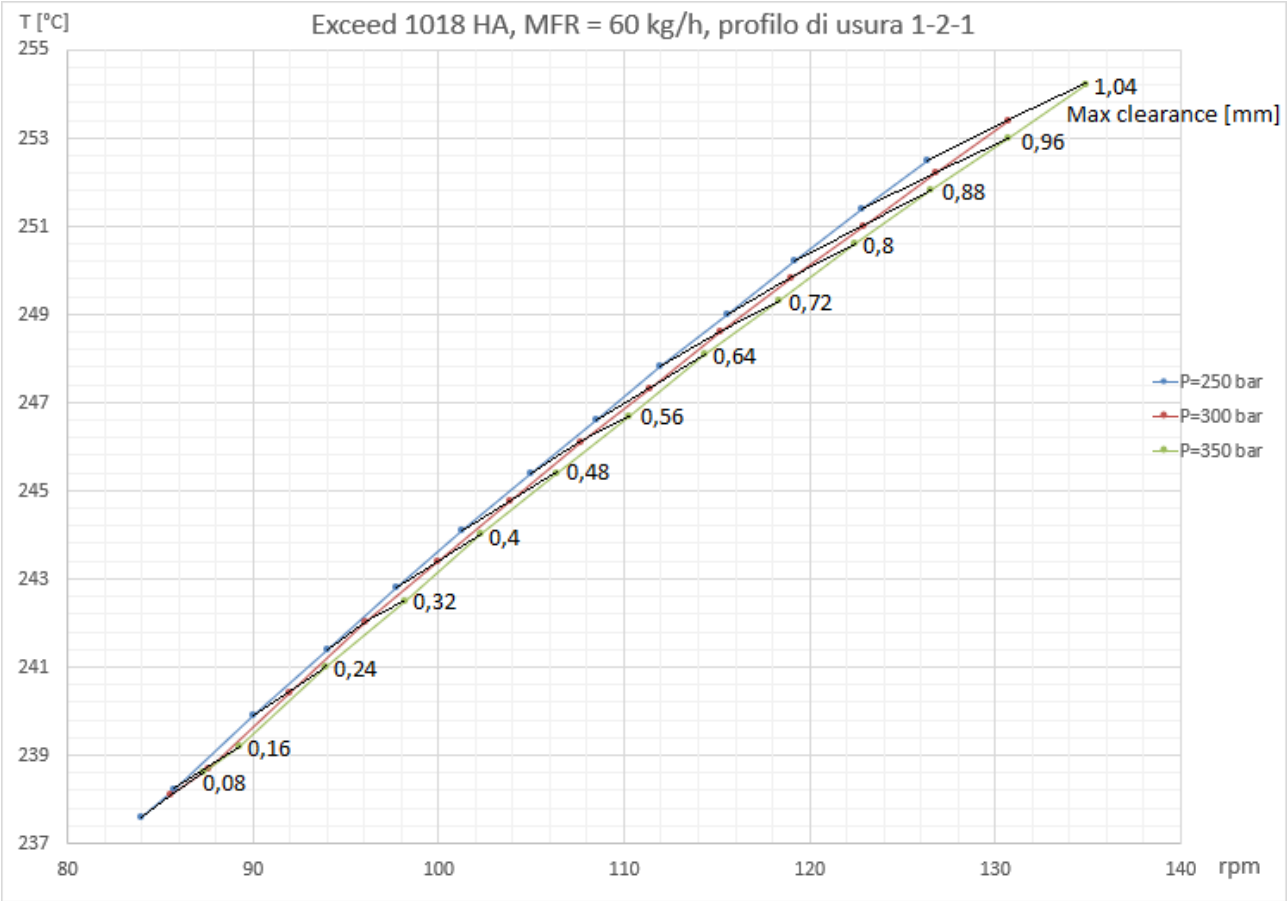

Figura 5.26: Grafico per la ricerca del livello di usura. Exceed 1018 HA, 60 kg/h, profilo di usura 1-2-1.

Nella Figura 5.27 è riportato un altro grafico utile alla stima del livello di usura della vite. In questo caso il materiale è il medesimo di prima mentre è variata sia la portata obiettivo (70 kg/h) sia il profilo di usura (1-2-2). Questo grafico vuole essere di comparazione con il precedente e mostrare nuovamente quanto la portata e il profilo di usura siano influente sulle prestazioni dell'estrusore. All'aumentare della portata così come il presentarsi di un profilo 1-2-2 di usura incrementano più rapidamente il raggiungimento di velocità limite della vite e anche il raggiungimento di temperature elevate. Le curve nel grafico raggiungono infatti la velocità limite già per un'usura massima di 0,72 mm (a 300 bar) mentre nel caso precedente questo non accade. Inoltre, le temperature sono tutte più alte, basti guardare i valori delle ordinate dei due grafici.

Le differenze tra i due grafici sono evidenziate in Figura 5.28 dove sono state affiancate due curve, ognuna proveniente dai grafici sopra descritti. L'andamento della curva che corrisponde alla portata di 70 kg/h e al profilo di usura 1-2-2 è spostato verso velocità più elevate rispetto all'altra curva (60 kg/h e usura 1-2-1) a causa della portata più elevata. L'estrusore infatti, per processare più materiale, deve girare più velocemente. Il profilo di usura agisce invece sulla pendenza della curva che nel caso del profilo di usura 1-2-2 è maggiore rispetto al profilo di usura 1-2-1.

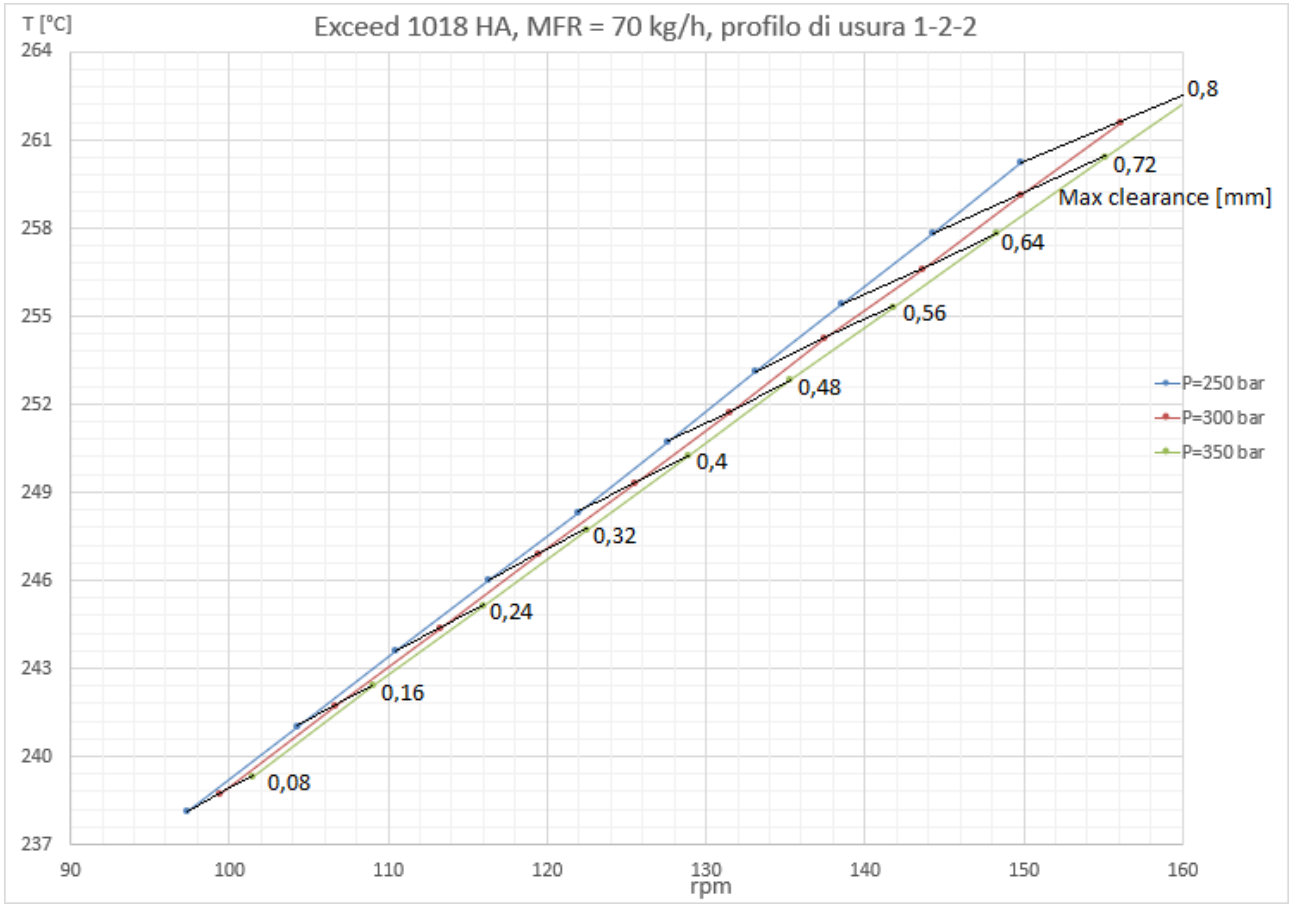

Figura 5.27: : Grafico per la ricerca del livello di usura. Exceed 1018 HA, 70 kg/h, profilo di usura 1-2-2.

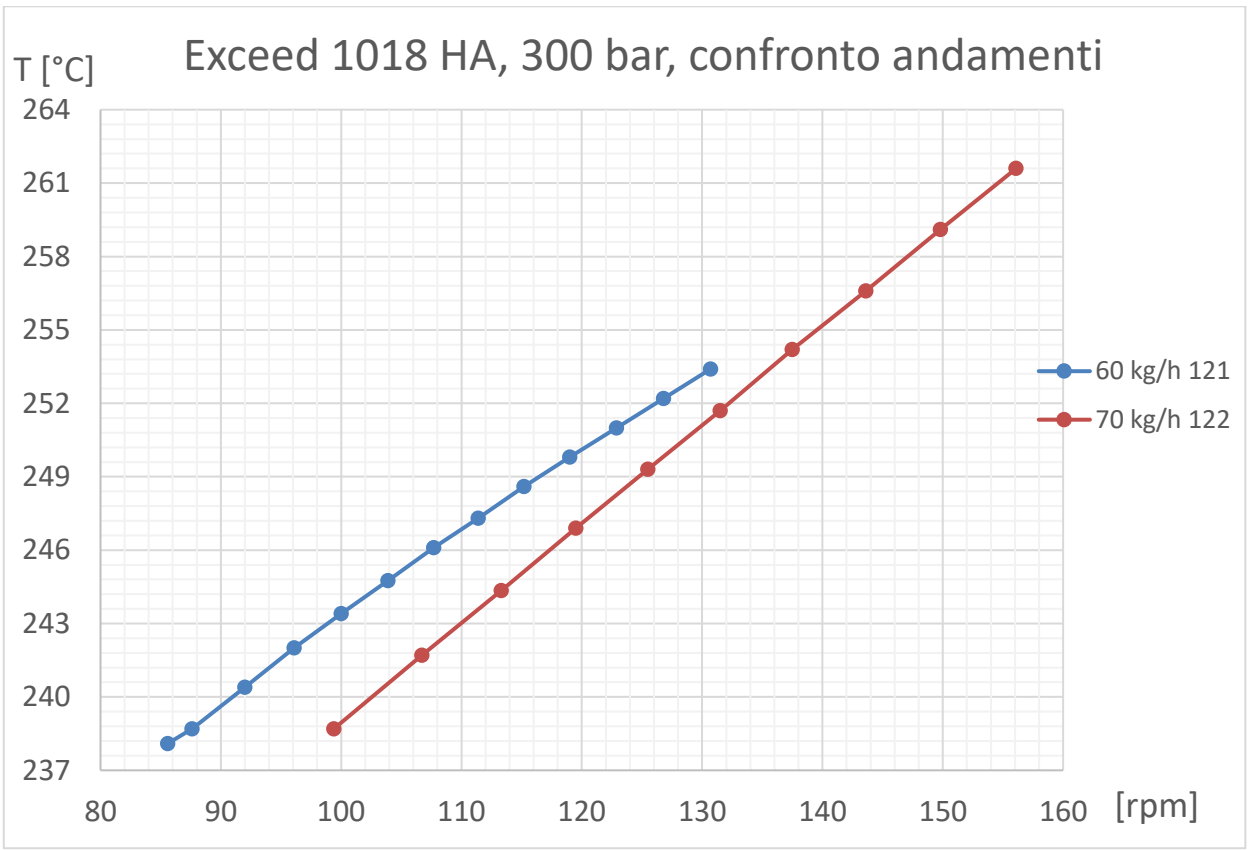

Figura 5.28: Confronto andamenti curve per individuazione livello di usura. Exceed 1018 HA, 300 bar.

6 Conclusioni

In questa tesi sono state studiate le performance di un estrusore monovite che presenta diversi gradi di usura dove il processo di estrusione è stato simulato virtualmente tramite un software commerciale apposito.

Le performance dell'estrusore sono state analizzate in termini di temperature raggiunte dal polimero durante il processo di estrusione, velocità di rotazione della vite di estrusione e di pressione raggiunta al termine dell'estrusore. Si sono tracciati e analizzati gli andamenti delle sopracitate grandezze in funzione di diversi profili di usura della vite di estrusione, di diversi gradi di usura della filettatura, della portata di materiale e del materiale stesso.

All'aumentare dell'usura, per mantenere sempre la stessa portata, si assiste all'aumento della velocità di rotazione della vite, all'aumento delle temperature medie e massime raggiunte nel canale della vite e alla diminuzione delle pressioni. A seconda di materiale, portata e profilo di usura le variazioni delle grandezze possono essere più o meno marcate e variazioni maggiori corrispondono a perdite di performance maggiori.

La massima perdita di prestazioni si ha per portate elevate (70 kg/h, massimo valore considerato), per un profilo di usura in cui il filetto nella parte centrale e finale della vite sono più usurate rispetto al primo tratto e per il materiale Exceed 1018 HA (un m-LLDPE e quello con viscosità più elevata).

Tracciati gli andamenti si è ricercato il massimo grado di usura sopportabile dalla vite affinché il polimero lavorato non subisse degradazioni durante il processo, ovvero non superasse le temperature suggerite dall'esperienza dell'azienda presso cui è stata svolta la tesi Contemporaneamente si è ricercato il massimo grado di usura ammesso dalle caratteristiche del motore, ovvero che per raggiungere la produttività (portata) richiesta non si andasse oltre la massima velocità raggiungibile dal motore. Per l'estrusore e i materiali (polietilene) presi in considerazione la condizione più limitante è risultata quella relativa alle temperature.

Avendo come obiettivo garantire sempre la portata intermedia tra quelle considerate (60 kg/h), indipendentemente dal profilo di usura e dal materiale processato il massimo gap esistente tra cresta del filetto e cilindro può essere di 0,4 mm.

Tutti i grafici e gli andamenti tracciati in questa tesi hanno come obiettivo la stima dello stato di integrità, ovvero il grado di usura, in cui si trova l'estrusore e le prestazioni che l'estrusore può ancora garantire. Teoricamente sarebbe possibile stabilire il grado di usura di un estrusore reale a partire dalle sue condizioni operative ricercando queste ultime sui grafici ottenuti dalle simulazioni numeriche. Una volta stabilito lo stato di integrità si può stimare l'usura che l'estrusore può ancora sopportare e quindi le prestazioni che può ancora garantire.

Lo studio fin qui svolto è stato sviluppato solamente tramite il software di simulazione e dunque è stato seguito solo l'approccio teorico e modellistico. Le simulazioni sono state tarate sulla base di dati reali provenienti da un estrusore identico a quello considerato ma questo lavorava materiali un poco differenti da quelli nella tesi. Inoltre, il carattere esplorativo del metodo e dello studio e la mancanza di altri lavori con cui effettuare comparazioni rende opportuno avvalorare i risultati delle simulazioni numeriche tramite prove sperimentali condotte con gli stessi dati e condizioni imposte nel software.

Gli estrusori normalmente utilizzati presentano caratteristiche più complesse di quello analizzato e garantiscono prestazioni migliori. Ulteriori analisi dunque, una volta confermata l'attendibilità dei risultati del software, potrebbero essere quelle di analizzare l'influenza dell'usura sulle performance di questi estrusori progettualmente più complessi.

Inoltre, l'usura si presenta in zone della vite più localizzate rispetto a quelle considerate e dunque uno sviluppo futuro potrebbe essere quello di svolgere le simulazioni usurando solo particolari tratti della vite individuati tramite una consultazione approfondita dei dati storici in possesso dall'azienda.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare la Costruzioni Meccaniche Luigi Bandera S.p.A. per avermi offerto la possibilità di svolgere la tesi con loro e in particolare ringrazio i responsabili che mi hanno seguito per il supporto tecnico e il tempo dedicatomi.

Ringrazio, inoltre, i Professori Stefano Marchesiello e Alberto Frache, relatori di questa tesi, per la disponibilità e l'aiuto che mi hanno offerto durante tutto il periodo di svolgimento della tesi.

Infine, un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, alla mia fidanzata, ai collegiali della Crocetta e agli amici che durante tutto il percorso universitario mi hanno sempre sostenuto con affetto continuando a credere in me.

Bibliografia

[1] S. Fakirov, Fundamentals of Polymer Science for Engineers, John Wiley & Sons, 2017.

[2] L. Bertolini e M. Carsana, Materiali da Costruzione - Vol I, Città Studi Edizioni, 2014.

[3] M. Gilbert, Brydson's Plastics Materials (8th Edition) - 10 Polyethylene, Elsevier, 2017.

[4] D. B. Malpass, Introduction to Industrial Polyethylene - Properties, Catalysts, and Processes, Wiley - Scrivener, 2010.

[5] G. A. Campbell e M. A. Spalding, Analyzing and Troubleshooting Single-Screw Extruders - 3 Introduction to Polymer Rheology for Extrusion, Hanser Publishers, 2013.

[6] Slide del corso di Tecnologia dei Materiali Polimerici A.A 2016/2017.

[7] C. Schaschke, Dictionary of Chemical Engineering, Oxford University Press, 2014.

[8] A. Naranjo, M. d. P. Noriega, T. A. Osswald, A. Roldán-Alzate e J. D. Sierra, Plastics Testing and Characterization - Industrial Applications - 5.3.3 Rotational Rheometry, Hanser Publishers, 2008.

[9] N. Cheremisinoff, Polymer Characterization - Laboratory Techniques and Analysis - Capillary Rheometry, William Andrew Publishing/Noyes, 1996.

[10] A. Shrivastava, Introduction to Plastics Engineering - 3 Plastic Properties and Testing, Elsevier, 2018.

[11] G. A. Campbell e M. A. Spalding, Analyzing and Troubleshooting Single-Screw Extruders - 1. Single-Screw Extrusion: Introduction and Troubleshooting., Hanser Publishers, 2013.

[12] N. S. Rao e N. R. Schott, Understanding Plastics Engineering Calculations - Hands-on Examples and Case Studies - 4.1 Three-Zone Screw., Hanser Publishers, 2012.

[13] J. L. Tomsic, Dictionary of Materials and Testing (2nd Edition), SAE International, 2000.

[14] G. Schenkel, Plastic extrusion technology and theory: the design and operation of screw extruders for plastics, London New York: Iliffe books American Elsevier, 1966.

[15] R. Crawford, Plastics Engineering (3rd Edition) - 4. Processing of Plastics, Elsevier, 1998.

[16] C. Rauwendaal, Polymer Extrusion (5th Edition) - 5.3.4 Viscous Heat Generation, Hanser Publishers, 2014.

[17] G. Straffelini, Attrito e usura, metodologie di progettazione e controllo, Milano: Tecniche Nuove, 2005.

[18] H. F. Giles Jr., J. R. Wagner Jr. e E. M. Mount III, Extrusion - The Definitive Processing Guide and Handbook - 5.3 Screw Wear, William Andrew Publishing/Plastics Design Library, 2005.

[19] G. A. Campbell e M. A. Spalding, Analyzing and Troubleshooting Single-Screw Extruders - 13.2 Screw Wear, Hanser Publishers, 2013.

[20] G. A. Campbell e M. A. Spalding, Analyzing and Troubleshooting Single-Screw Extruders - 10.4 Common Mechanical Problems, Hanser Publishers, 2013.

[21] L. Bertolini, Materiali da Costruzione - Vol II, Città Studi Edizioni, 2012.

[22] [Online]. Available: https://www.luigibandera.com/it/.