



SELINUS UNIVERSITY
OF SCIENCES AND LITERATURE

**CARATTERIZZAZIONE
MECCANICA DEGLI ESTRUSORI
BIVITE PER MATERIE
PLASTICHE**

BY ANDREA COMPAGNIN

SUPERVISED BY
PROF. SALVATORE FAVA PH.D.

Presented to the Department of
Mechanical Engineering & Technology
Program at Selinus University

Faculty of Engineering & Technology
in fulfillment of the requirements
for the Degree of
Master of Science in Mechanical Engineering

2022

*“CON LA PRESENTE DICHIARO DI ESSERE L’UNICO AUTORE
DI QUESTA TESI E CHE IL SUO CONTENUTO E’ SOLO IL
RISULTATO DELLE LETTURE FATTE E DELLE RICERCHE
SVOLTE.”*

Andrea Compagnin

SOMMARIO

Abstract.....	I
Indice delle figure	II
Ringraziamenti	III
Capitolo I: ESTRUSIONE DEI POLIMERI	11
Introduzione.....	11
I polimeri.....	11
Poliolfine (PE/LDPE/LLDPE/HDPE/PP/PET).....	13
Poliammidi.....	19
Acido polilattico PLA	22
Acrilonitrile-butadiene-stirene ABS	23
Polimetacrilati PMMA	24
Policarbonati PC.....	25
Polivinilcloruro PVC	26
Poliuretano PU -Poliuretano espanso XPU	27
Polistirene PS -Polistirene espanso EPS / XPS.....	28
Polietero etere chetone PEEK.....	30
Capitolo II: ESTRUSORI BIVITE	32
Introduzione.....	32
Generalità sugli estrusori bivate	33
Classificazione degli estrusori	36
Vantaggi degli estrusori bivate.....	38
Storia ed evoluzione	39
Estrusore bivate corotante.....	47
Estrusore bivate controrotante a viti parallele	48
Estrusore bivate controrotante a viti coniche	49
Estrusore multivite o planetari	50
Dati tecnici generali degli estrusori bivate	55
Estrusione reattiva	55
Capitolo III: SOTTOGRUPPI ESTRUSORE.....	58
Introduzione.....	58
Riduttore	58
Motorizzazioni	61
Bocchetta di alimentazione	63
Alimentazione forzata primaria	64
Alimentazione forzata laterale “side stuffer”	65
Cilindro di estrusione componibile	65
Cilindro di estrusione in due metà	67
Termoregolazione del cilindro e delle viti di estrusione.....	68
Dispositivo di degasaggio	70
Essiccazione del granulo.....	72
Controllo della pressione melt nel cilindro di estrusione.....	74
Controllo della temperatura nelle zone nel cilindro di estrusione.....	76
Iniezione di gas per l’estrusione di espansi	78

Capitolo IV: CAMPI D'APPLICAZIONE	82
Introduzione	82
Estrusori per masterbatch	82
Estrusori per compounding	83
Estrusori per granulazione	84
Estrusori per hot melt.....	85
Estrusori per bioplastica	87
Estrusori per lastre e foglia.....	89
Estrusori per estrusi espansi (foam).....	89
Estrusori da laboratorio	91
 Capitolo V: PROGETTAZIONE DELL'ESTRUSORE	 92
Introduzione.....	92
Energia specifica	93
Coppia percentuale.....	94
Coppia massima trasmissibile in relazione al numero di giri della vite	94
Scale-up	95
Volume specifico	96
Riempimento percentuale.....	97
Tempo di residenza	98
Portata specifica	98
Approssimazione dello sforzo di taglio	99
Incremento della temperatura in relazione alla pressione.....	99
 Capitolo VI: PROGETTAZIONE DELLE VITI.....	 100
Introduzione.....	100
Gli elementi della vite.....	100
Parametri geometrici delle viti di estrusione	103
Perdite di portata delle viti di estrusione	107
Tipologie di viti di estrusione.....	115
Le zone delle viti e la loro funzione.....	125
Approfondimento sull'uso del settore a spirale inversa	128
 Capitolo VII: CONDIZIONI DEL PROCESSO D'ESTRUSIONE	 130
Introduzione.....	130
Il comportamento del polimero nell'estrusore.....	130
Profilo di pressioni del melt	130
Tempo di permanenza del polimero nell'estrusore	133
Profili di temperatura dell'estrusore.....	135
La velocità di rotazione delle viti.....	138
Impostazione dei parametri di produzione.....	140
Avviamento	142
Funzionamento a regime	143
Spegnimento e/o cambio di produzione	144

Capitolo VIII: REOLOGIA DEI POLIMERI.....	147
Introduzione.....	147
La scienza della reologia.....	147
Reometria.....	149
Viscosità.....	149
Viscoelasticità.....	150
Il Melt Index.....	155
Il metodo gravimetrico.....	156
Il metodo volumetrico.....	156
Normative di riferimento e metodi di misura.....	156
Il comportamento reologico dei polimeri.....	157
Curve reologiche di un fluido newtoniano e non newtoniano.....	158
Le perdite di carico nei condotti.....	164
 Capitolo IX: STRUMENTAZIONI E METODI.....	 166
Introduzione.....	166
Reometro.....	166
Dinamometro.....	170
Calorimetria differenziale a scansione DSC.....	172
Analisi termogravimetrica TGA.....	176
Analisi agli infrarossi (spettroscopia FT-IR).....	181
PEPTFlowVisualisation Technology.....	184
 Capitolo X: SICUREZZA DELL'ESTRUSORE.....	 191
Introduzione.....	191
Pericoli associati all'estrusore.....	191
I fattori di rischio ergonomico.....	193
Rischio di incendio.....	196
Rischio di esposizione al rumore.....	197
Rischio chimico e biologico.....	200
Esposizione a rischi ambientali.....	201
Procedura di pulizia allo spegnimento dell'impianto.....	202
Addestramento del personale.....	206
Ispezione prima dell'accensione.....	207
 Capitolo XI: CONCLUSIONI.....	 208
Appendice A: Software di progettazione a la simulazione dei processi.....	209
Appendice B: Aziende produttrici, cenni storici.....	213
Bibliografia.....	218

ABSTRACT

L'estrusore bivate per le materie plastiche è una delle macchine più utilizzate nel processo di trasformazione dei polimeri ma è allo stesso tempo una macchina non ancora completamente analizzata dal punto di vista fisico e matematico.

Sul finire degli anni 30 del secolo scorso, si cercò di incrementare la produttività degli estrusori monovite (al vero piuttosto limitata a quel tempo) portando il numero delle viti di plastificazione da uno a due. Questa intuizione venne studiata in maniera scientifica a partire dagli anni 50 del secolo scorso. Si riscontrò oltre ad una produzione superiore, una elevata flessibilità della macchina che, con poche modifiche, era in grado di lavorare una svariata quantità di materiali diversi, mentre un corrispondente estrusore monovite richiedeva pesanti e costosi interventi, quali la sostituzione della vite di estrusione, inoltre gli estrusori bivate mostravano la capacità di lavorare il materiale con un minor tempo di permanenza e quindi una riduzione del pericolo di degradazione del polimero.

Mentre nell'estrusore monovite, la trasformazione che subisce il polimero al suo interno è stata ampiamente studiata e analizzata, nell'estrusore bivate con le sue molteplici configurazioni, ed anche per il fatto che il polimero segue dei percorsi non ancora completamente ben definiti attorno alle viti di estrusione con conseguenti diversi comportamenti e trasformazioni, è ancora una macchina da analizzare approfonditamente e che risulta per alcuni versi anche misteriosa. Non a caso una delle persone più esperte di queste macchine, il professor Tadamoto Sakai della Shizuoka University (Giappone), affermò che l'estrusione a vite doppia è più simile ad un'arte che ad una semplice tecnologia.

L'estrusore bivate è meccanicamente più complesso e costoso di un classico estrusore monovite, ma presenta molte particolarità interessanti da analizzare, quali la tipologia delle viti disponibili, il comportamento del flusso del melt nel cilindro di estrusione durante il processo di plastificazione o la configurazione modulare della macchina, adatta quasi ad ogni tipologia di polimero da estrarre.

Questa tesi riassume lo stato dell'arte di queste macchine alla luce dei nuovi polimeri che sono stati creati, evidenziando tutto quello che si conosce, sulla parte relativa alla meccanica, alla fisica ed alle formule matematiche che vengono solitamente utilizzate per calcolare e dimensionare l'estrusore; spero che questo mio lavoro potrà essere un piccolo contributo e di stimolo a chi dovrà in futuro studiare, progettare e costruire le nuove generazioni di queste macchine che dovranno lavorare i polimeri del futuro, perché della plastica ne avremo ancora bisogno.

INDICE DELLE FIGURE

<i>Descrizione</i>	<i>Pagina</i>
Catene polimeriche per polimeri lineare, ramificato, reticolato	12
Forzatore laterale (side stuffer)	34
Estrusore bivate per polimeri (Leistritz AG)	37
Jean Francisque Coignet	40
Colombo Roberto – Estratto dal brevetto per bivate	42
R. Erdmenger – mescolatore ad eccentrici	44
Primo estrusore bivate WP per miscelazione di polimeri	45
Cinematico del riduttore per viti corotanti	47
Coppia di viti corotanti	48
Coppia di viti controrotanti	48
Confronto tra coppie di viti controrotanti coniche e parallele	49
Estrusore bivate controrotante a viti coniche	49
Dettaglio estrusore multivite ad anello	50
Schema di un estrusore multivite Krauss Maffei GmbH	50
Estrusore a tre viti KMD Plastifizierungstechnik GmbH	51
Effetto di dispersione di una polvere di pigmento 48: 3 (30%) in PP (70%)	52
Dati tecnici per estrusore a tre viti KMD Plastifizierungstechnik GmbH	54
Tabella dati tecnici generici per estrusori bivate	55
Estrusore-reattore di F.lli Maris S.p.a. (Rosta – TO)	57
Riduttore per estrusore bivate (Zambello Riduttori S.r.l.)	58
Riduttore per estrusore bivate corotante a viti parallele	60
Disegno in sezione di un riduttore per estrusore bivate a viti coniche	61
Alberi di comando in uscita (Zambello Riduttori S.r.l.)	61
Motorizzazione Multidirve 4x2 per estr. bivate (Bausano S.p.A.)	62
Tabella dati tecnici per motori trifase raffr. ad acqua (Fimet S.p.A.)	63
Dettaglio finestra alimentazione bocchetta	63
Forzatore per alimentazione di un estrusore bivate	64
Estrusore bivate con 2 forzatori laterali (Coperion GmbH)	65
Dettaglio della foratura ad 8 disteso del cilindro per estrusore bivate	66
Cilindro bivate componibile con le sue viti di estrusione (Euroviti S.r.l.)	67
Cilindro per estrusore bivate in due metà aperto. (Amut S.p.A.)	67
Cilindro per estrusore bivate conico da laboratorio. (Zamak Mercator)	68
Pannello di controllo touch-screen per estrusore bivate	69
Termoregolazione viti a canali separati	69
Termoregolazione viti a camera chiusa	70
Estrusore bivate con degasaggio (Coperion GmbH)	70
Caminetto di degasaggio per estrusore bivate	71
Zone di pressione e profili vite con degasaggio per estr. bivate	72
Pompa per vuoto per il degasaggio (Edwards)	72
Essiccatore monofase per granuli plastici (MSM S.r.l.)	74
Dimensioni sensore di press. e foro di installazione (Gefran S.p.A.)	75
Trasduttore di pressione Level C (Gefran S.p.A.)	76
Termocoppia sonda di temperatura J con attacco a baionetta	77
Tabella temperature di fusione vari materiali	78
Iniettori di gas espandente sul cilindro di estrusione	79
Vista parziale di un impianto di estrusione per pannelli espansi (FAP)	79
Miscelatore statico (Promix)	80

Principio funzionamento foam extrusion (Promix Solutions SG)	80
Pompe dosaggio gas espandenti per impianto foam (Lewa)	80
Schema linea di estrusione per masterbatch (Comac S.r.l.)	83
Schema linea di estrusione per compounding (Comac S.r.l.)	84
Schema di estrusione per Hot Melt (Thermo Fisher Scientific)	85
Dispersione API in estrusione per Hot Melt (Thermo Fisher Scientific)	86
Schema linea di estrusione per bioplastica (Coperion GmbH)	88
Dettaglio testa piana e calandra per linea foglia (Krauss Maffei GmbH)	89
Configurazione linea di estrusione Tandem per prod. sup. 500 kg/h	90
Estrusore bivate da laboratorio (Labtech GmbH)	91
Panoramica dei principali settori di vite per estrusori bivate	101
Composizione tipica di una vite per compounding	102
Dettaglio dei parametri per il disegno delle viti	103
Forma a C del polimero fuso tra due creste della vite	105
Variabili caratteristiche di una vite di estrusione	105
Tabella variabili caratteristiche delle viti	106
Sovrapposizione di un estrusore bivate controrotante	106
Perdite di portata localizzate su coppia di viti controrotanti	108
Perdita per calandratura	108
Tabella dei dati di perdite di portata di un estrusore bivate	109
Tabella delle perdite per calandrate totali	110
Parametri geometrici per il calcolo delle perdite nel gap tetraedico	111
Tabella delle perdite totali per gap tetraedico	111
Schema del gap tra cresta delle spire vite e cilindro estrusore	112
Tabella delle perdite totali per il gap vite - cilindro	112
Tabella delle perdite totali per il gap laterale	113
Portata totale di massa per varie lunghezze di passo delle viti	114
Portata totale di massa per vari rapp. spessori spire/largh. canale viti	114
Portata totale di massa per viti di vari diametri	115
Coppia di viti corotanti e controrotanti	116
Tabella configurazione delle coppie di viti di estrusione per bivate	117
Distanza “spirali vite – cilindro” per la misura del volume libero	119
Settori vite di trasporto tipo 60/60 e 30/30	123
Settore di vite di trasporto composta	123
Settore di miscelazione tipo 45/5/30 destro	124
Settore di miscelazione tipo 45/5/45 destro	124
Composizione delle viti	125
Tipologie di settori vite	127
Schema delle viti con settori a spirale inversa	129
Simulazione multifase in regime transitorio	131
Simulazione in regime transitorio bifasica	131
Simulazione dell’incremento di pressione in un estrusore bivate	132
Curva delle pressioni del melt associate alla zona delle viti	132
Diagramma della Curva di distribuzione del tempo di permanenza	133
Tabella dei Tempi di permanenza del polimero in base ai giri delle viti	134
Solido a riposo - Solido deformato	147
Forze in un fluido in moto	148
Differenza tra fl. viscoso e fl. viscoelastico all’uscita da una matrice	151
Esperimento di creep recovery	152
Diagramma dello sforzo di taglio e della deformazione	153

Isteresi di un materiale viscoelastico sottoposto ad un carico ciclico	154
Schema del test per la misurazione del Melt Flow Index (MFI).....	156
Curve reologiche dei fluidi newtoniani e non newtoniani	158
Schema della teoria dell'aderenza per fluidi con viscosità differente	158
Velocità tangenziale degli strati fluidi	159
Schema di un Viscosimetro o Reometro a rotazione	159
Curve reologiche per fluidi dilatanti, newtoniani e pseudoplastici	161
Curve reologiche fluidi tixotropico e reopectico, cicli di isteresi.	162
Curve reologiche per un fluido di Bingham	162
Curva logaritmica $\tau - \gamma$ per LLDPE	164
Schemi di geometrie di taglio	167
Geometrie di rotazione di differenti tipi di taglio reometri	168
Dinamometro per prove di trazione ISO 527	171
Calorimetro DSC	172
Principio di funzionamento del Calorimetro DSC	172
Termogramma con flusso di calore a temperatura costante	173
Termogramma per fenomeno endotermico (fusione).....	173
Termogramma per fenomeno esotermico (cristallizzazione).....	174
Termogramma della zona di transizione vetrosa	174
Principio di funzionamento di una TGA	177
Macchina TGA da laboratorio.....	178
Diagramma TGA per polimero PEEK vari incrementi di temperatura. ...	181
Spettrofotometro FT-IR.....	184
Tracciamento di una particella del melt mediante raggi γ	185
Sezione del cilindro di estrusione con finestra in vetro trasparente.....	186
Estrusore PEPTFlow con applicata la camera PEPT modulare	186
Grafico 3D tracciamento posizione della particella nell'estrusore	187
Tracciamento particella sulle coordinate X-Y-Z rispetto al tempo.....	187
Tracciamento particella lungo l'asse estrusore rispetto alle coordinate X-Y...	188
Tracciamento della particella attorno alle viti rispetto alle coordinate X-Y ...	188
Grafico della velocità media della particella tracciata lungo l'asse Z.....	189
Estrusore bivate da laboratorio con cilindro apribile in due parti.....	206
Manutenzione su di un estrusore bivate.....	207
Simulazione distribuzione melt sulle viti e velocità relativa con Flow 2000....	210
Simulazione analisi termica del melt sulle viti realizzato con Polyflow®	210
Simulazione analisi fluidodinamica realizzato con SolidWorks FloXpress	211
Simulazione analisi fluidodinamica con SolidWorks Flow Simulation	212

RINGRAZIAMENTI

Desidero esprimere un sentito ringraziamento a Monica che mi ha sempre incoraggiato e sostenuto in questa impresa. Un ringraziamento va anche alle aziende costruttrici di impianti di estrusione per materie plastiche, in cui ho lavorato nel corso degli ultimi 30 anni. Mi hanno consentito di acquisire una competenza specialistica “sul campo” altrimenti impossibile da ottenere in altro modo. Un ringraziamento doveroso è per il professor Salvatore Fava per la sua disponibilità, la sua guida ed i suoi consigli puntuali e preziosi per la stesura di questa tesi di Laurea.

“La meccanica è il paradiso della matematica perché qui se ne possono cogliere i frutti. Non c'è certezza nella scienza se la matematica non può esservi applicata, o se non vi è comunque in relazione.”

Leonardo da Vinci (1452 – 1519)

ESTRUSIONE DEI POLIMERI

Introduzione

La principale, cronologicamente la prima e forse la più nota tipologia di lavorazione delle materie plastiche, è il processo di estrusione. Questa tecnologia è un processo fondamentale nell'industria della lavorazione dei polimeri e si basa sul portare il polimero o la miscela di polimeri, ad uno stato plastico o semifluido e di costringerlo a fluire in modo continuo attraverso uno stampo che è chiamato testa di estrusione o filiera, sagomata in maniera opportuna per ottenere una certa forma del prodotto finale.

L'estrusore è una macchina composta fondamentalmente da un grosso cilindro cavo di acciaio, al cui interno una o più viti, che sono delle coclee a spirale, ruotano spostando e comprimendo i granuli o la polvere del polimero e ne consente la plastificazione attraverso l'attrito ed il riscaldamento indotto dall'esterno mediante la termoregolazione del cilindro.

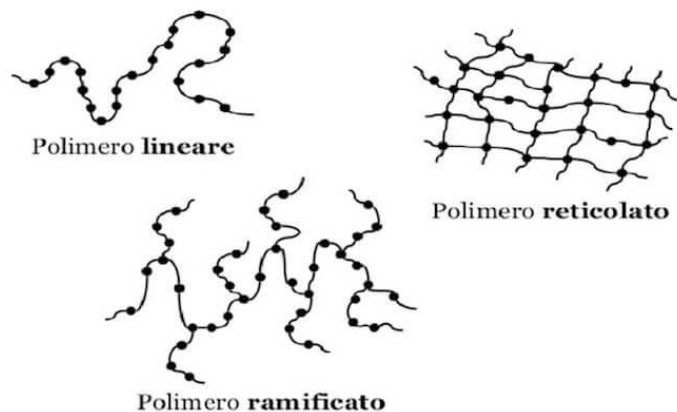
Il polimero viene introdotto nel cilindro in forma di pellet, polveri o granuli assieme ad una serie di altre sostanze quali additivi, cariche e coloranti, a seconda della formulazione che deve avere il prodotto finale; queste ultime, in un estrusore bivate, vengono spesso inserite in un secondo momento tramite un alimentatore laterale, a seconda delle "esigenze" del materiale da produrre.

Il materiale dopo che ha attraversato la filiera della testa, viene raffreddato in aria acqua o comunque mediante il contatto con una superficie fredda come, ad esempio, dei cilindri cromati raffreddati ad acqua nel caso di materiali calandrati. In questo modo il materiale semilavorato assume la geometria finale stabilizzandosi. Nei moderni impianti di grandi dimensioni, è possibile raggiungere delle produzioni di oltre 1000 kg/ora. Nella produzione di profili o di semilavorati particolarmente complessi, è possibile combinare più teste di formatura nella stessa macchina, in modo da poter realizzare dei materiali multicomponente con caratteristiche specifiche. Gli estrusori più utilizzati sono gli estrusori monovite, seguiti dagli estrusori bivate, che a loro volta si suddividono in corotanti o controrotanti in base al senso di rotazione delle viti.

I polimeri

Polimero deriva dalla parola greca "polimeres" che significa "dalle molte parti" ed il termine venne introdotto per la prima volta da Berzelius, un chimico svedese del XIX secolo. Nel 1920 il tedesco Staudinger teorizzò l'esistenza di sostanze ad altissimo peso molecolare (macromolecole) che avessero la stessa costituzione delle molecole semplici (monomeri) che le avevano originate.

I polimeri sono dei composti ad elevata massa molecolare e possono essere sia naturali che sintetici; sono costituiti da macromolecole, cioè da molecole di grandi dimensioni e derivano dalla combinazione (detta polimerizzazione) di molecole di dimensioni più piccole ed aventi un basso peso molecolare. Queste piccole molecole sono dette “monomeri” e tramite la polimerizzazione, si concatenano in lunghe sequenze che rappresentano la struttura del polimero.



Catene polimeriche per polimeri lineare, ramificato e reticolato

Un polimero costituito da un unico monomero viene detto “omopolimero”, come ad esempio il polietilene che è il risultato dell’unione di numerose molecole di etilene; mentre un polimero formato dall’unione di due o più tipi di monomeri, si definisce “copolimero”, come ad esempio il Nylon che è una poliammide risultato dall’unione in una sequenza alternata, di molecole di acido adipico e di esametildiammina. Le materie plastiche sono dei polimeri detti “sintetici” e sono di fondamentale interesse tecnologico, ma vi sono anche i polimeri di origine naturale come la cellulosa, le proteine, la gomma naturale, ma anche i polisaccaridi (zuccheri) e i polipeptidi come seta, cheratina e capelli.

I polimeri possono essere suddivisi in base al proprio grado di polimerizzazione (g. di p.) e cioè in base al numero di “unità strutturali”. Vengono distinti in **bassi polimeri** (con g. di p. compreso tra 10 e 100), medi polimeri (con g. di p. compresi tra 100 e 1000) e alti polimeri (per g. di p. superiori a 1000), questi ultimi sono quelli più interessanti dal punto di vista tecnico. La classificazione dei polimeri è dunque basata sul tipo di reazione di polimerizzazione, grazie alla quale si strutturano. Le due classi principali sono i polimeri di “addizione” ed i polimeri di “condensazione”. Nel primo caso abbiamo le molecole dei monomeri aventi un doppio legame, si uniscono le une alle altre per generare un polimero come unico prodotto finale. Nel secondo caso, abbiamo le molecole dei monomeri che si legano le une alle altre ma con l’eliminazione delle molecole secondarie di più piccole dimensioni, quali l’acqua per esempio.

Una caratteristica interessante dei polimeri in cui i gruppi sostituenti sono disposti con una regolarità molto elevata lungo l’intera catena strutturale della macromolecola è che essi assumono una struttura molto simile a quella di un cristallo e questa caratteristica costituisce un’importanza notevole per le proprietà meccaniche e chimiche del polimero.

Un esempio tipico è il **polipropilene isotattico**, che presenta i gruppi sostituenti “R” tutti disposti nella stessa parte rispetto ad un piano. Nel caso di un polimero in cui i gruppi sostituenti si alternano rispetto ad un piano, si definisce **sindiotattico**, mentre se la disposizione dei gruppi sostituenti è casuale, si definisce **atattico**.

I polimeri si suddividono in termoplastici e termoindurenti, i primi sono quelli adatti all'estrusione e quindi al nostro argomento della tesi in quanto con l'aumentare della temperatura reagiscono rammollendosi e facilitando la lavorazione plastica. I polimeri termoindurenti invece, all'aumentare della temperatura induriscono e non possono più tornare allo stato primitivo.

Poliiolefine

Il polietilene (PE) e il polipropilene (PP) sono i due principali tipi di poliiolefine. La classificazione schematica e in qualche modo semplificata può essere ulteriormente ampliata prendendo in considerazione aspetti legati a: composizione relativamente al rapporto monomero/co-monomero, sistema catalizzatore/iniziatore e tecnologia dei reattori di polimerizzazione.

Polietilene (PE)

Il polietilene è il polimero con il più alto volume di produzione nel mondo. La sua domanda ha raggiunto circa 85 milioni di tonnellate nel 2013. Questo valore rappresenta poco meno del 40% della produzione mondiale annuale di polimeri termoplastici. Le stime prevedono una crescita della domanda di polietilene fino a 100 milioni di tonnellate nel 2016. Dal punto di vista pratico, i polietileni sono classificati in base alla loro densità e ci sono tre famiglie principali di polietilene: a bassa densità (LDPE), lineare a bassa densità (LLDPE) e alta densità (HDPE).

In ordine di volume di produzione crescente, LDPE ha una quota di mercato del 9%, LLDPE raggiunge l'11% e l'HDPE raggiunge il 17%. In aggiunta a queste tre principali classi commerciali, il polietilene a bassissima densità (VLDPE) è prodotto in volumi molto inferiori e trova applicazioni che richiedono flessibilità estrema e chiarezza ottica. Il polietilene ad altissimo peso molecolare (UHMWPE) trova applicazioni nel settore medico, in articoli sportivi e nell'industria mineraria (tra gli altri). Il PE offre una combinazione unica di proprietà utili ad un prezzo molto basso.

I principali vantaggi del PE sono: elevata tenacità, duttilità, eccellente resistenza chimica, bassa permeabilità al vapore acqueo, bassissimo assorbimento d'acqua, il tutto combinato con la facilità con cui può essere elaborato. Le principali limitazioni sono rappresentate dalla bassa temperatura di fusione, dal modulo elastico e carico di snervamento ridotti. La polimerizzazione dell'etilene su scala industriale è realizzata sfruttando uno dei due diversi processi per promuovere la crescita della catena:

- 1) reazioni iniziate da radicali ad alta pressione e ad alta temperatura;
- 2) reazioni di inserzione su catalizzatori di coordinazione.

I due processi sono descritti di seguito in modo schematico. LDPE è realizzato con processi iniziati da radicali liberi e contiene sia ramificazioni a catena corta (SCB) sia ramificazioni a catena lunga (LCB). I catalizzatori di coordinazione sono in grado di controllare la microstruttura del polimero in modo molto più efficiente rispetto agli iniziatori radicalici.

Aggiungendo co-monomeri quali ad esempio 1-olefine (1-butene, 1-esene and 1-ottene sono i meno costosi e quindi sono i più ampiamente utilizzati), le SCB sono inserite in modo più controllato. LLDPE e HDPE sono prodotti esclusivamente usando catalizzatori di coordinazione.

Polietilene a bassa densità (LDPE)

Ottenuto dalla polimerizzazione dell'etilene, il polietilene è un polimero termoplastico della famiglia delle Poliolefine. Si tratta di uno dei polimeri più utilizzati e lavorati e costituisce la frazione di consumo mondiale più grande dei polimeri. Il suo peso molecolare, il tasso di cristallinità e la distribuzione dei pesi molecolari, caratterizzano fortemente le sue caratteristiche tecniche.

La polimerizzazione dell'etilene ad alta temperatura e alta pressione promossa da iniziatori di tipo radicalico è stata sviluppata per la prima volta durante gli anni '30 del XX secolo. Da allora, questa tecnologia si è evoluta ed è stata migliorata, con la realizzazione di impianti più sicuri e con costi di produzione inferiori. In merito alla reazione chimica di polimerizzazione, il miglioramento principale è stato realizzato grazie all'introduzione di perossidi organici quali iniziatori della polimerizzazione dell'etilene, invece dell'inizio attivato solo termicamente.

Negli impianti moderni, l'etilene compresso mediante iper-compressori a 2000 - 3100 bar, è preriscaldato a 150-170 ° C e quindi introdotto in un reattore tubolare. La reazione viene iniziata mediante l'iniezione di perossidi organici nel reattore, in posizioni multiple dopo ogni picco di reazione, ottimizzando il profilo di temperatura della miscela di reazione.

LDPE densità standard: *0,915-0,935 g/cm³ (ISO 1183)*

LDPE temperatura di fusione T_m: *130-135 °C*

LDPE temperatura di transizione vetrosa T_g: *-89,4 °C*

Formula chimica LDPE: (C₂H₄)_n

Polietilene lineare a bassa densità LLDPE e polietilene ad alta densità HDPE

LLDPE e HDPE hanno proprietà molto diverse. L'LLDPE è simile al LDPE e ha molte applicazioni in comune, come ad esempio il soffiaggio di film. L'HDPE è il polietilene lineare adatto ad applicazioni di stampaggio (ad iniezione e per soffiaggio). Tuttavia, questi due tipi di PE sono fatti con catalizzatori di coordinazione e i loro processi produttivi hanno molte caratteristiche comuni. I catalizzatori di coordinazione sono in grado di controllare la microstruttura del polimero in modo molto più efficiente

rispetto agli iniziatori radicalici e sono utilizzati per produrre il polietilene con una vasta gamma di proprietà.

Ci sono fondamentalmente quattro tipi principali di catalizzatori per la polimerizzazione delle olefine:

- 1) catalizzatori Ziegler-Natta;
- 2) catalizzatori Phillips;
- 3) catalizzatori metallocenici;
- 4) catalizzatori a base di metalli di transizione “late”.

I catalizzatori Ziegler-Natta e Phillips sono stati scoperti nei primi anni 1950 e hanno determinato l'avvio di una nuova era nella polimerizzazione delle olefine. Le nuove generazioni di questi catalizzatori sono tuttora le più diffuse nella produzione mondiale di poliolefine.

I catalizzatori metallocenici e quelli a base di metalli di transizione “late” sono stati sviluppati negli anni 1980 e 1990, rispettivamente. I catalizzatori metallocenici sono ora sfruttati industrialmente, la quota di mercato del PE metallocenico è ancora relativamente piccola, ma è in rapida crescita grazie ad una particolare combinazione di proprietà dei PE metallocenici rispetto ai PE prodotti con catalizzatori di Ziegler-Natta o Phillips.

Polimeri realizzati con metalli di transizione “late” fino ad oggi non hanno avuto significative applicazioni commerciali. I PE prodotti con catalizzatori di coordinazione generalmente hanno solo SCB. Alcuni metalloceni specifici o catalizzatori Phillips possono essere in grado di introdurre alcune LCB ma la topologia di queste LCB è diversa da quella dell'LDPE.

I catalizzatori Ziegler-Natta sono in grado di produrre sia HDPE e LLDPE. I catalizzatori Phillips sono molto importanti per la produzione di HDPE, ma non sono utilizzati per la produzione di LLDPE. I catalizzatori metallocenici possono essere usati nella produzione di HDPE e LLDPE, ma come detto sopra, questi prodotti sono molto diversi da quelli prodotti sia con catalizzatori Ziegler-Natta che Phillips.

Polietilene lineare a bassa densità (LLDPE)

I copolimeri etilene/ α -olefine coprono uno spettro che va da materiali trasparenti con rigidità simile all'LDPE a materiali rigidi, opachi che hanno molte delle caratteristiche dell'HDPE. Il modulo elastico determina l'idoneità di un polimero per una data applicazione. Il modulo elastico dipende dalla cristallinità che a sua volta è controllata dal livello di co-monomero e dal peso molecolare.

La maggior parte delle resine LLDPE hanno valori di densità che rientrano nel range dell'LDPE, così molte applicazioni sono le stesse. La produzione di film è il principale settore di applicazione per l'LLDPE, dove la sua tenacità superiore offre vantaggi in

termini di maggiore resistenza alla lacerazione, resistenza agli urti e resistenza alla perforazione.

A parità di densità e melt index, i film in LLDPE hanno proprietà meccaniche migliori, ad esempio maggiore resistenza alla perforazione, resistenza a trazione e allungamento a rottura.

LLDPE densità standard: $0,922-0,926 \text{ g/cm}^3$ (ISO 1183)

LLDPE temperatura di fusione T_m : $120-125 \text{ }^\circ\text{C}$

LLDPE temperatura di transizione vetrosa T_g : $-70 \text{ }^\circ\text{C}$

Formula chimica LLDPE: $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$

Polietilene ad alta densità (HDPE)

Ottenuto anch'esso dalla polimerizzazione dell'etilene, il Polietilene ad alta densità HDPE, è caratterizzato da macromolecole essenzialmente lineari, con meno di una ramificazione per 200 atomi di carbonio nella catena principale. Come conseguenza della linearità della catena, si raggiungono elevati gradi di cristallinità che determinano il modulo più elevato e la più bassa permeabilità di tutte le classi di polietilene.

Questa combinazione di proprietà rende l'HDPE adatto per applicazioni in contenitori per liquidi di medie e grandi dimensioni, come fusti, secchi a tenuta stagna e serbatoi per lo stoccaggio di prodotti chimici. Sugli articoli di dimensioni inferiori, una positiva combinazione di rigidità, bassa permeabilità ed elevata resistenza allo stress cracking, rende l'HDPE la prima scelta per le bottiglie per contenere prodotti chimici industriali, per la casa, e per il settore automotive, come ad esempio detersivi liquidi, candeggina, olio per motori e liquidi antigelo.

Le stesse proprietà sono sfruttate in contenitori per alimenti a parete sottile, come bottiglie per il latte e vaschette per la margarina. Imballaggi alimentari soggetti a basse temperature, per esempio applicazioni lungo la catena del freddo quali contenitori per gelato, sono realizzati in HDPE perché esso combina la bassa temperatura di transizione vetrosa di tutti i polietilene con la rigidità e la resistenza necessaria per i contenitori. L'elevata cristallinità determina l'opacità e conferisce una finitura superficiale opaca. Questo è un inconveniente dell'HDPE e per questi motivi bottiglie e pezzi stampati sono spesso pigmentato per renderli esteticamente più attraenti.

L'HDPE ha una buona resistenza alla trazione che lo rende idoneo per applicazioni in film a cui è applicato un carico per tempi brevi, come ad esempio sacchi per generi alimentari vari borse per merci in generale e sacchi per la raccolta di rifiuti in centri commerciali. La sua rigidità accettabile, la durabilità e la leggerezza lo rendono adatto per una varietà di applicazioni domestiche e commerciali che richiedono la resistenza a carichi contenuti. Alcuni esempi di queste applicazioni sono pallet, secchi e cassette portabottiglie. Altre applicazioni domestiche comprendono flaconi per farmaci, contenitori per cosmetici e contenitori di uso generale.

Un buon equilibrio tra durezza e rigidità rende l'HDPE il polimero scelto per molti giocattoli. Applicazioni non strutturali all'aperto comprendono la realizzazione di mobili da giardino, articoli per parchi gioco e cassonetti per rifiuti. In questi esempi l'HDPE è scelto in ragione di un equilibrio favorevole tra bassa temperatura di transizione vetrosa, una soddisfacente temperatura di deflessione sotto carico (HDT), rigidità e tenacità accettabili.

Parti di grandi dimensioni come contenitori stradali per rifiuti, coperchi per serbatoio di stoccaggio e canoe sono prodotti con polimeri ad alta densità che hanno rigidità superiore e una elevata resistenza all'abrasione. Le resine di HDPE sono estruse per la produzione di tubi per l'acqua potabile, di scarico e gas naturale. In queste applicazioni, i gradi di HDPE bimodale sono indicati specificamente in quanto offrono la migliore combinazione di rigidità, bassa permeabilità e resistenza alla corrosione.

Le proprietà termo-meccaniche dell'HDPE devono essere migliorate per alcune applicazioni in cui la temperatura di servizio supera il normale campo di applicazione per il polietilene. Nei tubi per acqua calda, temperature di servizio costanti fino a 100 ° C sotto carico rendono non idoneo l'HDPE di tipo standard. In applicazione per il rivestimento di cavi elettrici, la temperatura può aumentare occasionalmente fino a quei valori come conseguenza di un sovraccarico temporaneo.

L'HDPE può essere reticolato per migliorare alcune proprietà termo-meccaniche. Esistono diverse tecnologie per reticolare il polietilene in una fase specifica del processo di produzione. La chimica delle radiazioni è stata applicata, utilizzando fasci di elettroni on-line sulla linea di estrusione o radiazione gamma off-line. Iniziatori radicali come perossidi organici o composti azoici sono stati sfruttati. Le principali tecnologie di lavorazione per l'HDPE sono lo stampaggio, per soffiaggio oppure a iniezione. L'estrusione è utilizzata per la produzione di tubi, nel rivestimento di fili e cavi e per l'estrusione di liner per impermeabilizzare depositi di rifiuti liquidi e solidi.

HDPE densità standard: *0,942-0,965 g/cm³ (ISO 1183)*

HDPE temperatura di fusione T_m : *180-200 °C*

HDPE temperatura di transizione vetrosa T_g : *-130 °C*

Formula chimica HDPE: $(C_2H_4)_n$

Polietilene Tereftalato (PET)

Il Polietilene tereftalato, più noto come PET, è un polimero termoplastico appartenente alla famiglia dei poliesteri. Viene realizzato mediante una reazione di policondensazione dei monomeri di acido tereftalico e di glicole etilico. Il PET è caratterizzato da un'elevata resistenza chimica e di proprietà "barriera", solidità e rigidità, elevata resistenza all'usura e all'abrasione ma presenta una elevata sensibilità all'umidità ad elevate temperature.

Mediante l'aggiunta di agenti nucleanti ed acceleratori di crescita dei cristalli, ne viene favorita la cristallinità. Il PET cristallino (40-50% cristallinità) presenta delle ottime proprietà meccaniche ed una elevata temperatura di deformazione al calore (paragonabili alla PA6), modulo e brillantezza.

In ragione di queste qualità, viene utilizzato ampiamente nel settore dell'automotive e dei tecnopolimeri. È possibile ottenere anche degli stampaggi trasparenti con PET senza riempitivi, utilizzando degli stampi a temperature molto basse, è il polimero più utilizzato nel settore dell'imbottigliamento grazie alla sua trasparenza, alle sue proprietà meccaniche ed alla proprietà barriera nei confronti dei gas.

PET densità standard: $1,3 - 1,4 \text{ g/cm}^3$ (ISO 1183)

PET temperatura di fusione T_m : $245-265 \text{ }^\circ\text{C}$

PET temperatura di transizione vetrosa T_g : $70 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$

Formula chimica PET: $(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$

Polipropilene(PP)

Uno dei materiali polimerici più noti, lavorati ed utilizzati nel mondo delle materie plastiche è il Polipropilene (PP) e risulta secondo solo al Polietilene come utilizzo. Questo materiale termoplastico ha la caratteristica di avere proprietà differenti a seconda della tatticità chimica. Per tatticità si intende la configurazione stereochimica relativa tra atomi di carbonio asimmetrici che sono adiacenti lungo la catena di un polimero.

Giulio Natta ricevette il premio Nobel per la Chimica nel 1963, assieme a Karl Ziegler, per aver studiato i catalizzatori e le reazioni per poter produrre il polipropilene con diverse tatticità. Le caratteristiche fisiche di questo materiale sono un elevato carico di rottura, una elevata duttilità, bassa densità, un'ottima resistenza termica ed all'abrasione e, non meno importante, possiede un costo di produzione molto basso rispetto alle sue elevate proprietà tecniche.

Il mercato mondiale del polipropilene (PP) è il secondo in termini di volumi prodotti e da solo rappresenta circa il 25% della domanda mondiale di polimeri. La domanda globale di PP ha raggiunto 58 milioni di tonnellate nel 2013 e si prevede possa crescere fino a 68 milioni di tonnellate nel 2016.

La crescita della domanda mondiale continua a essere guidata dalle economie emergenti, in particolare dalla Cina. Sono stati realizzati importanti investimenti e altri sono previsti per nuovi impianti, al fine di aumentare la capacità produttiva per assicurare l'autosufficienza della Cina per questa importante materia plastica. Materie prime non convenzionali a basso costo stanno guidando gli investimenti per realizzare i nuovi impianti in Nord America (gas di scisto) e in Cina (carbone) e avranno effetti significativi sul futuro del commercio globale e la competitività tra le diverse aree produttive.

Le regioni meno competitive dovranno adattarsi attraverso razionalizzazioni nella distribuzione o con le nuove innovazioni di prodotto e di processo. Il polipropilene è prodotto mediante la polimerizzazione del propilene in presenza di un catalizzatore a temperatura e pressione accuratamente controllate. Il propilene è un idrocarburo insaturo e durante la polimerizzazione il doppio legame reagisce formando nuovi legami singoli carbonio-carbonio che tengono insieme le unità monomeriche.

Proprietà chimiche e fisiche:

Le configurazioni del Polipropilene sono tre: omopolimero, copolimero random e copolimero a blocchi. In tutte le configurazioni, il Polipropilene possiede un'elevata resistenza all'umidità ed una più che buona resistenza chimica agli attacchi degli acidi, degli alcali e dei solventi. Per contro, il Polipropilene non offre resistenza agli idrocarburi aromatici, come il benzene, ed agli idrocarburi clorurati, come il tetracloruro di carbonio.

Vi sono delle differenze di natura termica e meccanica tra le principali configurazioni chimiche, nella variante omopolimero, il Polipropilene presenta una densità lievemente superiore rispetto alla variante copolimero (0,905 g/cm³ rispetto ai 0,897 g/cm³) e risulta avere un modulo elastico, una durezza ed una resistenza allo sforzo più elevati. Rispetto però al Polietilene, il Polipropilene non resiste all'ossidazione ad elevate temperature, non assorbe l'umidità ma risulta permeabile alla CO₂ e per questo motivo non viene utilizzato nel campo del beverage.

PP densità standard: 0,85-0,9 g/cm³ (ISO 1183)

PP temperatura di fusione T_m: 165-175 °C

PP temperatura di transizione vetrosa T_g: -20 °C

Formula chimica PP:(C₃H₆)_n

Poliammidi (Nylon)

Le **poliammidi** sono dei polimeri contenenti gruppi funzionali di tipo ammidico (-CO-NH-) nella catena principale. Le proteine sono un esempio di poliammidi presenti in natura. Le poliammidi alifatiche sono anche conosciute con il nome di Nylon, il Trade Name con il quale sono state commercializzate nel 1939 da Dupont le prime fibre poliamidiche. Il Nylon è stato infatti sviluppato negli anni 30 dai tecnici di Dupont capitanati da Wallace Hume Carothers (1896-1937).

La versatilità dei Nylon li ha resi tra i polimeri termoplastici più utilizzati in applicazioni ingegneristiche. Le poliammidi hanno infatti eccellenti proprietà meccaniche che li rendono sia rigidi e tenaci che morbidi e flessibili. Hanno inoltre la capacità di assorbire l'umidità e hanno eccellenti proprietà antifrizione. Le applicazioni principali delle poliammidi sono nel campo dell'industria tessile e di quella delle automobili.

Le poliammidi possono avere differenti lunghezze delle catene alifatiche che collegano i gruppi funzionali, oltre che differenti sequenze e orientazioni dei gruppi ammidici. Le

proprietà delle poliammidi dipendono fortemente dalla concentrazione dei gruppi polari ammidici che è chiaramente correlata con la lunghezza delle catene alifatiche che li interconnettono. La sigla con cui vengono identificati i Nylon dipende dal numero di atomi di carbonio presenti tra due atomi di azoto nella catena polimerica.

Le poliammidi possono essere sintetizzate tramite polimerizzazione per condensazione di un acido dicarbossilico e di una diammina oppure tramite polimerizzazione per apertura d'anello di un lattame.

Si utilizza un solo un numero per dare il nome alla poliammide (ad esempio il Nylon 6 da caprolattame o il Nylon 11 da acido 11-amminoundecanoico) mentre un numero doppio è presente se il polimero è ottenuto facendo reagire una diammina con l'acido carbossilico (ottenendo ad esempio il Nylon 6.6).

Derivato da un monomero ad anello chiuso del caprolattame, il **PA6** (Poliammide 6) o più comunemente noto come Nylon 6, ha una molecola composta da 6 atomi di carbonio che durante il processo di polimerizzazione, viene "aperto" l'anello della catena molecolare.

È un materiale robusto con una elevata resistenza all'abrasione, una buona resistenza chimica ed alla fatica, possiede scorrevolezza e resilienza, solidità e rigidità molto elevate.

Proprietà chimiche e fisiche del PA6:

Il Nylon 6 possiede caratteristiche chimiche e fisiche molto simili a quelle del PA66; tuttavia, se ne differenzia per un punto di fusione inferiore rispetto al PA66 ma ha un intervallo di temperatura per la lavorazione più ampio. Il Nylon 6 ha una resilienza ed una resistenza ai solventi superiore al PA66 ma anche una maggiore capacità di assorbire l'umidità. Tale capacità di assorbimento dell'umidità incide grandemente su molte proprietà e di questo ne bisogna tenere conto quando si progettano dei componenti con questo materiale.

È possibile utilizzare delle cariche dette di rinforzo per cercare di migliorare le proprietà meccaniche del PA66, queste cariche sono chiamati anche agenti modificatori come ad esempio il vetro, che è uno dei più usati. Per migliorare la resilienza, possono venire aggiunti degli elastomeri come EPDM o SBR. Comunque, a causa della sua sensibilità nell'assorbire l'umidità, è necessario prevedere una pre-essiccazione prima del processo di estrusione.

Storia e curiosità sul Nylon 6

La nascita di questo materiale ha una storia interessante, la Seconda guerra mondiale portò ad un incremento della ricerca in molti campi scientifici ed anche nella ricerca e nella produzione dei polimeri. Un giovane trentenne appena laureatosi ad Harvard, W.H. Carothers, con il suo gruppo di ricerca inventò il Nylon.

Infatti, in quel periodo, la Cina che era il principale esportatore di seta negli Stati Uniti, ora era sotto controllo del Giappone che aveva bloccato le esportazioni. Gli Stati Uniti dovettero perciò trovare un materiale sostitutivo alla seta usata per costruire i paracadute durante le prime fasi della guerra. La poliammide venne sintetizzata per la prima volta il 28 febbraio 1935 e risultò subito una fibra molto robusta e tenace, stabile ai lavaggi e resistente alle muffe, insetti e batteri, atossica ed anche resistente a temperature superiori ai 200 °C.

La Poliammide con le sue numerose varianti (Nylon 6.6, Nylon 6, Nylon 3, Nylon 7, Nylon 11, Nylon 12) risulta essere uno dei polimeri tecnico più importanti e versatili, utilizzato soprattutto in applicazioni nel campo dell'automotive e del tessile, soprattutto dove vi sono delle esigenze di movimenti o di scorrimenti aventi un basso attrito.

PA6 densità standard: $1,06-1,16 \text{ g/cm}^3$ (ISO 1183)

PA6 temperatura di fusione T_m : 220 °C

PA6 temperatura di transizione vetrosa T_g : 55 °C

Formula chimica PA6: $C_{13}H_{22}N_4O$

Il Poliammide 12, detto anche **PA12** o Nylon 12, ha la caratteristica di essere un ottimo isolante elettrico e, rispetto alle altre Poliammidi, presenta una minore sensibilità all'umidità. Caratterizzato da una elevata resistenza all'attacco chimico e dotato di un buon livello di resilienza, viene generalmente additivato con plastificanti e cariche di rinforzo. Il PA12, rispetto al PA6 ed al PA66, presenta un punto di fusione inferiore ed una densità minore.

Proprietà chimiche e fisiche del PA12:

Un'operazione fondamentale da fare prima di procedere all'estrusione del PA12 è l'essiccazione del polimero in quanto bisogna ridurre l'umidità contenuta al di sotto dello 0,1% (< 100 ppa). Il PA12 ha proprietà molto simili al PA11 ma ha una struttura cristallina differente, è un materiale termoplastico semicristallino-cristallino lineare derivante dal butadiene ed il contenuto di acqua e la temperatura di fusione ne determinano la viscosità.

PA12 densità standard: $1,02 \text{ g/cm}^3$ (ISO 1183)

PA12 Temperatura di fusione T_m : 180 °C

PA12 Temperatura di transizione vetrosa T_g : 55 °C

Formula chimica PA12: $[(CH_2)_{11}C(O)NH]_n$

Viene ottenuto dalla polimerizzazione dell'esametildiammina e dall'acido adipico ed è un materiale termoplastico di elevato valore tecnico. Comunque, paragonato al PA6 (Nylon 6) il PA66 possiede una superiore rigidità ma una resilienza inferiore.

Proprietà chimiche e fisiche del PA66:

Materiale semicristallino-cristallino avente uno dei punti di fusione tra i più elevati tra le Poliammidi in commercio, il PA66 ha la peculiarità di mantenere la rigidità e la sua consistenza anche alle temperature più elevate.

Pur essendo un materiale igroscopico come tutte le Poliammidi, il PA66 non assorbe umidità dopo la fase di estrusione e la sua ritenzione è inferiore a quella del PA6. Oltre che dalla formulazione del materiale, l'assorbimento di umidità dipende anche dalle condizioni ambientali e dallo spessore del materiale in estrusione. La stabilità dimensionale del prodotto estruso è influenzata dalla quantità di assorbimento dell'umidità da parte del polimero e questo deve essere tenuto in debita considerazione durante la fase di progettazione del prodotto finale.

Anche questo Poliammide può migliorare le proprie caratteristiche meccanico mediante l'aggiunta di vari agenti modificatori quali il vetro che è uno dei più comunemente usati. Se vengono aggiunti degli elastomeri come EDPM o SBR, inoltre, se ne migliora la resilienza, tuttavia anche se il PA66 resiste alla maggior parte dei solventi, non lo è nei confronti di agenti ossidanti o acidi forti.

PA66 densità standard: $1,14 \text{ g/cm}^3$ (ISO 1183)

PA66 temperatura di fusione: $260-290 \text{ }^\circ\text{C}$

PA66 temperatura di transizione vetrosa T_g : $78 \text{ }^\circ\text{C}$

Formula chimica PA66: $(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{N}_2\text{O}_2)_n$

Acido polilattico (PLA)

Trattasi del più noto biopolimero, l'**acido polilattico o PLA** è considerato attualmente uno dei più versatili e promettenti grazie anche all'ampio spettro delle sue applicazioni reali e potenziali, confermato anche dalla ormai ampia letteratura che si è resa disponibile sull'argomento negli ultimi anni. La sua versatilità di processo mediante differenti tecnologie, una ormai ampia disponibilità commerciale in varie tipologie e non ultimo, l'aver dei costi tutto sommato contenuti, lo hanno reso adatto ed utilizzato in diverse applicazioni.

Questo polimero dimostra diverse proprietà ed anche le sue applicazioni sono le più varie. La biodegradabilità è particolarmente apprezzata nel campo degli imballaggi a breve termine, mentre la biocompatibilità con i tessuti viventi è adatta nell'ambito delle applicazioni biomediche, come impianti, suture e rivestimenti per il rilascio controllato di farmaci (drug delivery).

L'interesse verso uno stile di vita più sostenibile è uno dei concetti chiave che si è sviluppato negli ultimi anni, divenendo un obiettivo condiviso dall'opinione pubblica mondiale. Grazie all'aumento di attenzioni riservate all'impatto ambientale dei vari processi produttivi e dei loro "fine vita", la ricerca si sta rivolgendo verso questa direzione. L'attenzione agli aspetti ambientali è ormai un punto di forza per i

finanziamenti pubblici e privati, con indicazioni specifiche inserite anche nella mission di diverse aziende.

Questa attenzione alle implicazioni ambientali della crescita si è riflessa in molti campi, primo fra tutti quello della ricerca nei nuovi materiali. È bene sottolineare, infatti, che in molti casi i materiali esistenti possono dare prestazioni ottimali, ormai garantite da anni di ricerca ed utilizzo. I problemi nascono dall'analisi del loro ciclo di vita, in quanto sono solitamente prodotti a partire da fonti non rinnovabili (petrolio e derivati) e non sono degradabili a fine vita, rendendo il loro smaltimento un problema che, lungi dall'essere risolto, tende a moltiplicarsi esponenzialmente di anno in anno.

Sono queste esigenze ecologiche ad avere dato nuovo impulso alla ricerca di nuovi materiali, in cui i polimeri biodegradabili possono essere considerati un'alternativa interessante perché a basso impatto ambientale.

PLA densità standard: $0,85-0,9 \text{ g/cm}^3$ (ISO 1183)

PLA temperatura di fusione T_m : $165-175 \text{ }^\circ\text{C}$

PLA temperatura di transizione vetrosa T_g : $-20 \text{ }^\circ\text{C}$

Formula chimica PLA: $(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3)_x$

Acrilonitrile butadiene stirene (ABS)

L'acrilonitrile butadiene stirene detto anche ABS, che è ottenuto tramite la polimerizzazione del gruppo acrilonitrile-stirene con il butadiene, è un materiale termoplastico di tipo amorfo di uso piuttosto comune. In esso è presente sia la fase continua dell'acrilonitrile-stirene (SAN) che la fase dispersa della gomma di butadiene. Ogni monomero costituente il polimero ABS, gli conferisce le più diverse proprietà; per esempio, l'acrilonitrile gli conferisce la durezza, la resistenza chimica e la stabilità termica; lo stirene gli conferisce la facile lavorabilità, la brillantezza e la resistenza; il butadiene gli conferisce la robustezza e la resilienza.

Proprietà chimiche e fisiche:

In commercio sono disponibili diversi gradi e qualità dell'ABS che consentono di coprire una gamma elevata di caratteristiche richieste, ad esempio una resilienza media o elevata, una superficie molto brillante oppure opaca, una stabilità termica elevata o una elevata deformazione al calore. In particolare, il valore della resilienza è modificabile facilmente attraverso la modifica della quantità di polibutadiene.

L'ABS presenta una buona resistenza chimica agli alcali e agli oli lubrificanti, resiste bene chimicamente all'acido cloridrico ma non all'acido solforico, all'acido nitrico ed agli idrocarburi aromatici. Risulta infiammabile e la sua combustione rilascia dei gas tossici.

Nonostante questo, le sue ottime proprietà meccaniche unite alla facilità di lavorazione ed alla resistenza alle elevate temperature, l'ABS si è affermato come uno dei materiali più utilizzati nel settore dell'automotive.

Essendo un materiale fortemente igroscopico, l'ABS richiede un trattamento di essiccazione prima di procedere alla sua lavorazione. Essendo anche un materiale di tipo amorfo, non possiede una precisa temperatura di fusione per cui è necessario individuarla tramite una prova.

ABS densità standard: $1,07 \text{ g/cm}^3$ (ISO 1183)

ABS temperatura di fusione T_m : 200-280 °C; consigliato 230 °C

ABS temperatura di transizione vetrosa T_g : 105 °C

Formula chimica ABS: $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$

Polimetilmetacrilato (PMMA)

Il **PMMA o Polimetilmetacrilato**, è un materiale plastico costituito da polimeri di metacrilato di metile, estere metilico dell'acido metacrilico. Esso è anche noto con il suo primo nome commerciale, Plexiglas ed è il più importante polimero del gruppo degli acrilici. È un polimero che offre un'eccellente resistenza chimica ed agli agenti atmosferici. È un materiale termoplastico trasparente, simile per aspetto al Policarbonato e viene utilizzato quando non sono necessarie delle elevate resistenze all'impatto.

Proprietà chimiche e fisiche:

Le formulazioni del PMMA sono variabili in base al peso molecolare ed alle proprietà fisiche richieste nel prodotto come la portata, la robustezza e la resistenza alle alte temperature. A seconda della composizione chimica, risulta essere più o meno infrangibile; per la sua lavorazione in estrusione o stampaggio, viene preferito nelle formulazioni ad elevato scorrimento.

Possiede delle eccellenti proprietà ottiche ma anche un'ottima resistenza agli agenti atmosferici, offrendo una trasparenza alla luce bianca che raggiunge il 92%, superiore al vetro. Presenta una elevata resistenza ai raggi UV senza ingiallire, come invece avviene con il Policarbonato. Il prodotto finale, estruso o stampato che sia, ha una bi-rifrazione molto limitata per cui è un materiale naturalmente adatto alla produzione di dischi video.

La nemesis del PMMA è il polimetilacrilato PMA che si presenta invece come una gomma morbida.

Storia del PMMA:

Questo polimero è in commercio dal 1933, pertanto è uno dei primi polimeri prodotti industrialmente ed utilizzati in molti settori, durante la Seconda guerra mondiale venne utilizzato in campo aeronautico e navale per i finestrini dei velivoli ma anche in componenti dei sottomarini. Oggi viene impiegato in molte altre applicazioni, dagli acquari agli organi artificiali per i trapianti e nella chirurgia estetica ma anche nell'edilizia. Proprio grazie alla sua elevata trasparenza ha sostituito il vetro in moltissime applicazioni.

Curiosamente ancora oggi è più noto commercialmente con il nome di Plexyglas (sviluppato e prodotto per la prima volta dalla società Evonik nel 1933) piuttosto che con il nome proprio del polimero PMMA.

PMMA densità standard: $1,17 - 1,20 \text{ g/cm}^3$ (ISO 1183)

PMMA temperatura di fusione T_m : $105-160 \text{ }^\circ\text{C}$

PMMA temperatura di transizione vetrosa T_g : $80-105 \text{ }^\circ\text{C}$

Formula chimica PMMA: $(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2)_n$

Policarbonato (PC)

Il **Policarbonato (PC)** è un materiale termoplastico appartenente alla famiglia dei polimeri amorfi; possiede una elevata resilienza ed una altrettanto elevata resistenza alle alte temperature, caratterizzato da una elevata trasparenza, ha capacità di sterilizzazione, capacità di ritardare le fiamme e resiste bene allo scolorimento. È un poliesteri di acido carbonico che viene prodotto dalla reazione di condensazione del bisfenolo con l'acido carbonico.

Proprietà chimiche e fisiche:

La caratteristica di essere un materiale facilmente lavorabile tramite estrusione, stampaggio e termoformatura, lo rende adatto ad essere impiegato in molteplici applicazioni.

Viceversa, i policarbonati che hanno un elevato peso molecolare presentano migliori proprietà meccaniche ma la lavorabilità di questi polimeri risulta molto più difficoltosa. Per avere come proprietà fondamentale una elevata resistenza, è necessario utilizzare i policarbonati ad alto peso molecolare mentre se si preferisce avere una lavorabilità ottimale, bisogna orientarsi sui policarbonati a basso peso molecolare.

I difetti più noti del Policarbonato sono la bassa durezza superficiale e la scarsa resistenza agli agenti atmosferici ed ai raggi ultravioletti che ne provocano una veloce degradazione fotosensibile (ingiallimento). Per ovviare a questa problematica, si effettua un trattamento superficiale anti-UV; oltre a questa problematica il policarbonato è anche un materiale igroscopico.

PC densità standard: $1,20 - 1,22 \text{ g/cm}^3$ (ISO 1183)
PC temperatura di fusione T_m : $260-340 \text{ }^\circ\text{C}$
PC temperatura di transizione vetrosa T_g : $147 \text{ }^\circ\text{C}$

Formula chimica PC: $\text{C}_{16} \text{H}_{14} \text{O}_3$

Polivinilcloruro (PVC)

Il PVC è un derivato dell'etilene e fa parte della famiglia dei polimeri vinilici. È un polimero ottenuto per polimerizzazione radicalica del monomero cloruro di vinile (VCM), caratterizzato dalla seguente unità ripetitiva $\sim[\text{CH}_2\text{CHCl}]_n\sim$.

È uno dei polimeri di maggior consumo a livello mondiale grazie anche alle proprietà di questo materiale termoplastico amorfo che sono estremamente variabili a seconda degli additivi utilizzati nella formulazione. Può diventare un materiale estremamente rigido e tenace (RPVC) ed in questa formulazione viene utilizzato per l'estrusione di tubi e condotte idrauliche, oppure essere un materiale estremamente flessibile ed utilizzato in ambito tessile. I metodi di produzione principali del PVC sono generalmente due, tramite il processo di emulsione (E-PVC) e tramite il processo di sospensione (S-PVC).

Per un utilizzo appropriato, alla resina di PVC vanno aggiunti additivi (stabilizzanti, lubrificanti, antiurto, anti-UV, cariche, plastificanti): si ottiene quindi un compound (in forma di **dry-blend** semplicemente miscelato o di granulo estruso) altamente versatile e che facilita le lavorazioni in tutti i processi di trasformazione.

Il mercato globale del PVC è fortemente collegato con l'industria delle costruzioni; le principali applicazioni, riguardano tubi, raccordi, profilati, lastre e film rigidi. Altre applicazioni includono cavi, pavimenti, rivestimenti, ecc.

Storia del PVC

Il PVC è stato preparato per la prima volta dal chimico tedesco Eugen Baumann nel 1872, ma è stato brevettato solo nel 1913, quando Friedrich Heinrich August Klatte usò la luce naturale per iniziare la polimerizzazione del cloruro di vinile. Le applicazioni commerciali di questa plastica inizialmente furono limitate a causa della sua estrema rigidità, ma nel 1926, Waldo Lonsbury Semon, impiegato per la compagnia B.F. Goodrich negli Stati Uniti, ottenne quello che attualmente è chiamato PVC plastificato.

La scoperta di questa plastica flessibile e inerte fu responsabile del rapido successo commerciale del PVC. Nel 1930 la Union Carbide Corporation ottenne un prodotto flessibile anche attraverso copolimerizzazione e lo commercializzò con il nome di Vinylite, un copolimero del cloruro di vinile e del vinile acetato. La Vinylite fu largamente impiegata per la produzione di dischi fonografici.

Proprietà chimiche e fisiche:

Questo materiale viene considerato estremamente sicuro e stabile nelle possibili applicazioni a temperatura ambiente ma risulta essere estremamente sensibile alla luce ed al calore; questi hanno sul PVC un effetto di degradazione del materiale e si manifesta

prima con l'ingiallimento e a temperature superiori ai 180 °C, con la decomposizione che comporta il rilascio di acido cloridrico nell'aria.

Il PVC viene generalmente caricato con additivi che comprendono stabilizzanti, lubrificanti, pigmenti, modificanti all'urto, facilitatori di processo e cariche riempitive. Tra le caratteristiche più apprezzate del PVC troviamo la buona autoestinguenza, la robustezza, una buona resistenza agli agenti atmosferici con il mantenimento del colore e della rigidità ed una elevata stabilità dimensionale.

PVC densità standard: $1,37 - 1,43 \text{ g/cm}^3$

PVC temperatura di fusione T_m : $185-195 \text{ }^\circ\text{C}$

PVC temperatura di transizione vetrosa T_g : $81-87 \text{ }^\circ\text{C}$

Formula chimica PVC: $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$

Poliuretano (PU)

Con il termine generico di **poliuretano (PU)** si indica in realtà una famiglia molto vasta di polimeri in cui la catena polimerica è caratterizzata da legami uretanici -NH-(CO)-O-. I poliuretano sono largamente impiegati nella produzione di una grande varietà di componenti grazie alla diversificazione della famiglia poliuretano.

I poliuretano sono ottenuti per reazione tra un di-isocianato (aromatico o alifatico) e un poliolo (tipicamente un glicole poli-propilenico o un poliestere-diolo), per conferire delle determinate caratteristiche al materiale che si vuole ottenere, si utilizzano dei catalizzatori che, oltretutto, aumentano la velocità di reazione chimica. Per abbassare la tensione superficiale e favorire la formazione di schiuma oppure degli agenti espandenti (per i PU espansi e schiume poliuretano), si usano dei tensioattivi, oppure dei ritardanti di fiamma in quei settori che richiedono questa caratteristica.

Poliuretano espanso (XPU)

Il poliuretano espanso XPU è una schiuma molto flessibile che viene utilizzata soprattutto nella produzione di imbottiture per materassi, per l'arredamento e nella produzione di automobili. Si trova in commercio in forma liquida in apposite bombolette spray e solidifica dopo due o tre ore dall'applicazione, triplicando il volume e sigillando eventuali fessure. Alcune schiume poliuretano sono ignifughe e vengono utilizzate nella fumisteria per la sigillatura di canne fumarie e nelle porte antincendio.

Il "materassino" di poliuretano espanso, viene prodotto mediante due possibile tecnologie differenti; per colata o per stampaggio. Nella prima, i vari componenti necessari alla reazione chimica sono colati in continuo su di un nastro trasportatore della larghezza di circa due metri. Si ottiene un blocco continuo dello spessore di circa un metro e a fine reazione (circa tre minuti), può venir tagliato in spezzoni di lunghezza voluta. Il prodotto viene fatto riposare per stabilizzarlo (dalle 24 alle 48 ore) e successivamente può essere tagliato in lastre o fogli e posto in commercio.

Nella seconda, la tecnologia dello stampaggio, si esegue una colatura a bassa pressione od una iniezione ad alta pressione in uno stampo. Si possono ottenere così delle imbottiture già preformate, pronte all'uso senza necessità di taglio o sagomatura. Con questa tecnologia si ottengono le imbottiture delle sedute e degli schienali dei sedili automobilistici ma anche nel settore dell'arredamento (in minima parte) che impiega le schiume tagliate dal blocco prodotto in continuo. Curiosamente, questo materiale è anche utilizzato nella produzione della pasta lavamani.

Il materiale nella forma di schiuma rigida e leggera viene prodotto in lastre ed usato come isolante in pannelli per l'edilizia ma anche come termoisolante per gli scambiatori di calore, boiler o nei frigoriferi e spesso vi è iniettato direttamente. Le schiume poliuretatiche ad alta densità, invece, vengono adoperate, ad esempio, nella produzione di parti strutturali di grandi dimensioni.

Storia del Poliuretano

Nel 1849, Wurtz riuscì per la prima volta a sintetizzare l'uretano, scoprì che facendo reagire un solfato organico con un cianato, si formava l'isocianato alifatico. La reazione chimica per la sintesi del poliuretano avvenne tra le due guerre mondiali in Germania grazie al professor Otto Bayer ed i suoi collaboratori della IG Farben a Leverkusen che nel 1937 svilupparono una nuova tecnica per la polimerizzazione facendo reagire dei diisocianati nel tentativo di ottenere una fibra in grado di competere con le fibre di Nylon.

Nel 1938, Heinrich Rinke, un collaboratore del professor Bayer, produsse un liquido di poliuretano a bassa viscosità per la produzione di fibre. Nel 1942 William Hanford e Donald Holmes della società Du Pont de Nemours & Company, riuscirono a brevettare il primo processo industriale per la produzione del poliuretano come materiale multiuso. Tra gli anni 40 e 50 del XX secolo, la Du Pont e la ICI svilupparono un'intera gamma di poliuretani e nel 1956 la Du Pont mette in commercio il primo poliuretano prodotto industrialmente.

PU(XPU) bassa densità standard: $0,033 - 0,060 \text{ g/cm}^3$

PU alta densità standard: $0,080 - 0,60 \text{ g/cm}^3$

PU temperatura di fusione T_m : $175-180 \text{ }^\circ\text{C}$

PU temperatura di transizione vetrosa T_g : $162-212 \text{ }^\circ\text{C}$

Formula chimica PU: R-N=C=O

Polistirene (PS)

Il polistirene, noto anche come GPPS, è un polimero sintetico aromatico a base di monomero di stirene ($\text{CH}_2\text{-CHC}_6\text{H}_5$)_n. La struttura chimica del polistirolo comprende solo atomi di carbonio e idrogeno ed è classificata come idrocarburo. Gli atomi di carbonio sono legati da legami covalenti e ogni atomo alternativo nella catena ha un gruppo fenile unito di cui forma un idrocarburo a catena lunga. Il polistirolo è prodotto dalla polimerizzazione del monomero dello stirene.

C'è una distinzione tra polistirolo tattico e polistirolo sintattico, il polistirolo tattico è amorfo e trasparente anche chiamato polistirolo di cristallo, mentre il polistirene sindiotattico ha un polistirolo semi-cristallino. La struttura è un polimero relativamente rigido, il polistirolo tattico ha una densità di 1050 kg/m³. È un polimero molto economico per unità di peso. Ha una bassa barriera all'ossigeno e al vapore acqueo e ha un punto di fusione relativamente basso.

Proprietà chimiche e fisiche:

Di solito buone anche se dipende dal grado della resina, la concentrazione chimica, temperatura e dagli sforzi sui pezzi. È resistente ad oli, grassi, formaldeide, benzina e acido cloridrico, non è attaccato chimicamente dall'acqua.

L'unità strutturale della catena molecolare del polistirolo, $[\text{'CH}_2, \text{'CH}_2, \text{'CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]_n$, è costituita da due gruppi di vinili e da un gruppo fenile laterale. La posizione specifica dell'anello di benzene è, tuttavia, abbastanza casuale da inibire la cristallizzazione. Il gruppo laterale di grande peso molecolare, rende difficile ordinare le catene e quindi il materiale è essenzialmente amorfo. Il polistirene si ammorbidisce quando viene riscaldato al di sopra della sua temperatura di transizione del vetro. La forma cristallina di polistirolo ha una bassa resistenza all'impatto. Il polistirene si degrada a causa dell'esposizione alla luce solare a causa della foto-ossidazione, che ne riduce le proprietà meccaniche. Con l'aggiunta di polibutadiene, si ottiene polistirolo HIPS resistente agli urti.

A causa della rigidità della catena molecolare della resina di PS, dovuta dall'anello di benzene, le temperature di transizione del vetro (T_g) dei materiali commerciali hanno una T_g tra i 90-100°C. Di conseguenza a temperatura ambiente è un materiale duro, rigido e trasparente.

Storia del polistirene

Eduard Simon, uno speziale berlinese, nel 1839 scoprì per la prima volta il polistirene; dalla resina chiamata "liquidambar orientalis", riuscì a distillare una sostanza oleosa. Questa sostanza era composta dal monomero che chiamò Stirol, dal nome tedesco della resina Stirax. Dopo alcuni giorni, passati dall'esperimento, osservò che il monomero si era trasformato in una gelatina che denominò Styroloxyd, cioè ossido di stirene, ritenendo che fosse un prodotto dell'ossidazione.

I chimici John Blyth e August Wilhelm von Hofmann nel 1845, riuscirono a dimostrare che la medesima trasformazione dello stirene, poteva avvenire anche in assenza di ossigeno e chiamarono la loro sostanza Metastirene. Successivamente fu dimostrato che era la medesima sostanza dello Styroloxyd del 1839. Il processo chimico fu identificato correttamente nel 1866 da Marcellin Berthelot che lo identificò come una reazione di polimerizzazione.

Polistirene espanso (EPS-XPS)

Una volta espanso, il polistirene (che è facilmente espandibile) prende il nome di EPS (polistirene espanso sinterizzato) o di XPS (polistirene espanso estruso), comunemente noto come polistirolo espanso è composto da carbonio, idrogeno e 98% aria. Il polistirolo espanso si ottiene polimerizzando in formato di piccole perle trasparenti.

Queste piccole perle si espandono da 20 a 50 volte il proprio volume iniziale mettendole a contatto con il pentano che è un idrocarburo gassoso ed il vapore acqueo a 90 °C. Il materiale incorpora il gas in una struttura a celle chiuse, intrappolando l'aria e diventando l'EPS un eccellente isolante termico. Oltretutto, essendo praticamente anigroscopico, è un ottimo isolante elettrico e viene usato nei condensatori elettronici. Può essere colorato facilmente sia con colori vivaci che opachi.

PS densità standard: $1,01 - 1,05 \text{ g/cm}^3$

EPS - XPS densità standard: $0,015 - 0,10 \text{ g/cm}^3$

PS temperatura di fusione T_m : 70-100 °C

PS temperatura di transizione vetrosa T_g : 90-100 °C

Formula chimica PS: $(C_8H_8)_n$

A quanto indicato per i materiali espansi, aggiungiamo solo che essi necessitano di attrezzature complementari all'estrusore, esso deve essere collegato ed equipaggiato con dispositivi dedicati al processo di "espansione" del polimero estruso e che esulano da questa trattazione. Diremo solo che richiedono dei gruppi pompa ad alta pressione per comprimere i gas espandenti, degli iniettori appositamente dedicati posizionati del cilindro di estrusione in zone ben definite.

Polietere etere chetone (PEEK)

Il PEEK, polietere etere chetone, è un polimero termoplastico organico di colore neutro ed appartenente alla famiglia dei poliarileterchetoni (PAEK), le sue caratteristiche particolari ne consentono l'uso in applicazioni ingegneristiche come tecnopolimero.

La famiglia dei polimeri PEEK, vengono ottenuti tramite una polimerizzazione a stadi per di alchilazione di sali bisfenolati. La reazione chimica maggiormente utilizzata è quella del 4,4'-difluorobenzofenone che reagisce con il sale disodico dell'idrochinone, generato sul posto mediante deprotonazione con il carbonato di sodio. La reazione viene condotta ad una temperatura di 300 °C in solventi polari aprotici come il dimetilsolfossido (DMSO) o dimetilformamide (DMF).

Grazie alla sua intrinseca robustezza, il PEEK è un tecnopolimero utilizzato per fabbricare oggetti vari utilizzati in applicazioni che richiedono una certa resistenza meccanica ed all'usura, infatti viene usato per fabbricare cuscinetti a strisciamento e cuscinetti a sfera, parti di cilindri pneumatici, di pompe e valvole, di piastre e nell'isolamento dei cavi elettrici.

Grazie alle sue caratteristiche meccaniche, è una delle poche plastiche adatte nell'utilizzo in applicazioni ad elevato vuoto spinto, è anche un biomateriale compatibile con la realizzazione di protesi mediche. Viene ampiamente utilizzato nel settore aerospaziale, automobilistico e di processo chimico, grazie alla capacità di mantenere le proprietà meccaniche di robustezza alle alte temperature e di non essere attaccato da aggressivi chimici.

Proprietà chimiche e fisiche:

Polimero termoplastico semicristallino, il PEEK come abbiamo visto, presenta delle elevate proprietà meccaniche e di resistenza chimica che vengono mantenute anche ad alte temperature. Le condizioni utilizzate per lavorare il PEEK influenzano la sua cristallinità ed anche le proprietà meccaniche. Caratterizzato da un modulo di Young di 3,6 GPa ed un carico di rottura che non varia molto in base al peso molecolare e compreso tra i 90 ed i 100 MPa. Alcune tipologie di PEEK possono raggiungere una temperatura utile di funzionamento anche di 250 °C e la sua conduttività termica in funzione della temperatura di esercizio, aumenta linearmente tra la temperatura ambiente e quella di fusione. Il PEEK è molto resistente alla degradazione termica e resiste all'attacco di agenti organici e acquosi. Può essere attaccato da acidi forti di Brønsted e di Lewis da alogeni, composti alogenati ed idrocarburi alifatici alle alte temperature. A temperatura ambiente, è attaccabile e solubile dall'acido solforico concentrato anche se può richiedere molto tempo soprattutto se è maggiore il suo volume rispetto alla sua superficie, inoltre presenta un'elevata resistenza alla biodegradazione.

PEEK densità standard: $1,32 \text{ g/cm}^3$

PEEK temperatura di fusione T_m : $340-343 \text{ }^\circ\text{C}$

PEEK temperatura di transizione vetrosa T_g : $143 \text{ }^\circ\text{C}$

Formula chimica PEEK: O-O-C=O

I componenti realizzati in PEEK possono arrivare ad una temperatura di utilizzo di 250-260 °C e può essere impiegato in applicazioni a contatto con l'acqua bollente e con il vapore mantenendo inalterate le sue proprietà fisiche. Tuttavia è considerato un materiale plastico per ingegneria avente ancora un costo molto elevato, ma il suo valore aggiunto deriva dalla possibilità di costruire componenti più leggeri e resistenti, con una lunga durata ed in grado di essere applicato negli ambienti di lavoro tra i più difficili. La difficoltà risiede nel processo di estrusione ad alta temperatura e nella attrezzatura che deve essere espressamente progettata e costruita per operare in un campo di temperature di estrusione superiore rispetto agli altri polimeri.

Questi polimeri, che ho elencato, sono solo un piccolo esempio non esaustivo, di una vasta gamma di polimeri estrudibili che si sono, nel corso del tempo, aggiunti all'elenco e che continuano ad aggiungersi grazie alle continue ricerche nel campo dei polimeri e da nuove scoperte nel campo della chimica e dell'ingegneria; pertanto, non è possibile darne un elenco definitivo in quanto l'evoluzione è continua.

ESTRUSORI BIVITE

Introduzione

Gli **estrusori bivate** (TSE) vengono utilizzati per elaborare praticamente ogni tipo di plastica utilizzata oggi. Alcune semplici formule sono intervallate dal testo per fornire informazioni su come sono progettate le TSE e sui vantaggi dell'utilizzo delle TSE per la sintesi, l'elaborazione e la composizione di uretani termoplastici. Gli estrusori bivate corotanti e controrotanti ad alta velocità, con input di energia (HSEI) sono dispositivi di trasferimento di massa che sono la metodologia di produzione preferita del settore per il compounding, la devolatilizzazione, l'estrusione reattiva e il blending.

I materiali che sono in genere composti includono riempitivi, colori, fibre, nanoparticelle, lubrificanti e stabilizzanti, nonché un numero infinito di ausili di processo e additivi speciali. Gli estrusori bivate eseguono miscele dispersive e distributive. Nella miscelazione dispersiva, gli agglomerati solidi o le gocce di liquido tenuti insieme dalla tensione interfacciale sono sottoposti a stress meccanico per la riduzione delle dimensioni. Le caratteristiche di flusso più importanti per l'efficienza di miscelazione dispersiva sono le sollecitazioni di taglio associate ai campi di flusso estensionale e planare generati dagli elementi di miscelazione delle viti degli estrusori bivate. Nella miscelazione distributiva, il rimescolamento ripetuto dei componenti minori senza dimensioni distruttive migliora l'omogeneità del prodotto.

La natura modulare degli estrusori bivate offre flessibilità di processo per quanto riguarda il design delle viti, la configurazione della canna e l'intensità di taglio. La modalità di interconnessione corotante domina il mercato, avendo catturato circa il 90% delle installazioni attuali. Gli estrusori bivate che si contrappongono a maglie intermedie e non miste, vengono utilizzate principalmente per applicazioni speciali, inclusi alcuni processi speciali di lega e reattivi.

Generalità sugli estrusori bivate

Nel settore delle materie plastiche, i diametri delle viti degli estrusori bivate vanno da 12 mm a oltre 400 mm con una capacità produttiva che va dai 0,250 kg/h ad oltre 50.000 kg/h. Le viti segmentate trasportano e tranciano i materiali che vengono elaborati in canali delimitati da rampe di viti e pareti del barilotto, con brevi distanze di trasferimento di massa. Questo è il motivo per cui le TSE sono designate come miscelatori continui di "piccola massa", rispetto ai miscelatori di lotti di "grande massa". Il trasporto e la fusione dei solidi si verificano nelle prime fasi della sezione di processo seguita da miscelazione e devolatilizzazione.

Gli elementi di scarico costruiscono e stabilizzano la pressione prima dello scarico. Le caratteristiche controllate di pompaggio e pulizia delle viti dei bivate in combinazione

con un design segmentato consentono di abbinare geometrie specifiche degli elementi delle viti alle operazioni dell'unità eseguite nella sezione del processo bivate.

I parametri di controllo del processo per una bivate includono la velocità della vite (giri al minuto), la velocità di avanzamento, le temperature di processo e il livello di vuoto (per favorire la devolatilizzazione).

La pressione di fusione, la temperatura di fusione, l'amperaggio del motore e vari sensori in linea monitorano anche il processo per garantire un prodotto coerente e di qualità. Le bivate all'avanguardia utilizzano controller logici programmabili (PLC) per controllo, monitoraggio e funzionalità logiche che integrano touch screen grafici, acquisizione dati, trend e gestione delle ricette come funzionalità standard. Per installazioni complesse, "Flex I/O" è ora comune, dove i cavi di segnale sono cablati a una scatola di giunzione montata sulla macchina che combina I/O della morsettiera con comunicazione Ethernet al PLC per semplificare l'installazione e la risoluzione dei problemi.

Ora è anche di routine integrare i PLC del sottosistema con un PLC di supervisione, indicato come elaborazione distribuita, per l'integrazione di sistemi di apparecchiature complesse da più fornitori. L'alimentazione per fame si riferisce a quando l'estrusore viene alimentato a una velocità inferiore all'efficienza di avanzamento delle viti. Gli estrusori bivate sono quasi sempre alimentati a bocca affamata con la velocità di uscita determinata dall'alimentatore.

Il numero di giri della vite nei bivate è indipendente e utilizzato di concerto con la velocità di avanzamento per ottimizzare l'efficienza di compounding. La velocità di avanzamento rispetto al numero di giri della vite e il design della vite determinano anche il tempo di permanenza (RT) e la distribuzione del tempo di permanenza (RTD) per i materiali in lavorazione. A seconda di questi fattori, l'RT può essere inferiore a 10 secondi o fino a 10 minuti. I RT tipici sono tra 15 se 2 min per il compounding e 1 se 10 min per le applicazioni di estrusione reattiva.

Oltre al suo ruolo nel regolare le proprietà di trasferimento di massa del processo, gli alimentatori mantengono anche la coerenza della formulazione e sono situati per introdurre gli ingredienti nell'ordine corretto. Vengono utilizzati vari meccanismi di erogazione, inclusi vassoi vibranti e pompe solide alla rinfusa (per pellet), vite singola (per pellet e alcune polveri) e vite doppia (per polveri e granuli). I flussi di alimentazione del liquido utilizzano pistone, membrana o pompe ad ingranaggi a seconda della viscosità del liquido e possono essere ambiente o riscaldati. Gli alimentatori volumetrici possono essere accettabili per premiscele che non si separano.

Quando più flussi di alimentazione vengono misurati nella sezione del processo bivate, vengono generalmente utilizzati alimentatori a perdita di peso (LIW) su celle di carico che modulano il meccanismo di erogazione di alimentazione per mantenere un flusso di massa costante verso l'estrusore. Per applicazioni di compounding di qualità, vale a dire per un dispositivo medico, il pellet TPU viene essiccato in un essiccatore essiccante prima di dosare nella bivate e uno spurgo di azoto è integrato nel design della tramoggia

dell'alimentatore. I sistemi di compounding in TPU possono utilizzare una combinazione di alimentatori solidi/liquidi. I sistemi di estrusione reattiva a volte utilizzano solo sistemi di alimentazione liquidi.

Che si tratti di solidi o liquidi, può essere preferita la premiscelazione di alcuni materiali, a seconda del numero e delle caratteristiche degli ingredienti. Il gradiente di pressione nell'estrusore bivite è determinato dalla selezione delle viti. Gli elementi pilotati sono posizionati strategicamente in modo che i canali delle viti non siano completamente riempiti, il che si traduce in una pressione zero sotto le sezioni di sfiato/alimentazione a valle, che facilita l'alimentazione a valle di riempitivi e fibre e impedisce anche l'allagamento dello sfiato.

Un "side stuffer" o forzatore laterale, è un dispositivo che è comunemente integrato con una bivite per introdurre riempitivi, fibre e altri materiali nel flusso di fusione del processo dopo la plastificazione. Come una bivite, un'imbottitura laterale utilizza viti corotanti, a maglie incrociate e autopulenti per "spingere" i materiali in una sezione non riempita delle viti bivite. Le viti e i componenti della canna sono fabbricati con metallurgie resistenti all'abrasione ed il cilindro è rivestito per il raffreddamento/riscaldamento a liquido. Anche i dispositivi di riempimento laterali sono alimentati a digiuno e richiedono un alimentatore dosatore a monte per impostare la velocità. Il riempimento laterale è desiderabile per la lavorazione di composti riempiti per facilitare una fusione ed una miscelazione più efficiente con un'usura significativamente inferiore nella regione di fusione della sezione di processo. L'imbottitura laterale è preferita per ridurre al minimo l'attrito della fibra e per elaborare riempitivi sensibili al taglio, come un ritardante di fiamma.



Forzatore laterale (side stuffer)

Ad esempio, questa è la configurazione ideale per elaborare un composto TPU/fibra di vetro per ridurre al minimo l'attrito e l'usura delle fibre. Il riduttore di un estrusore bivite trasmette energia dal motore alle viti e riduce la velocità del motore al numero di giri desiderato della vite moltiplicando la coppia. Per evitare danni al riduttore, la maggior

parte degli estrusori bivate ha un giunto meccanico esterno che collega l'albero del motore all'albero di ingresso del riduttore e disinnesta automaticamente il motore in una situazione di eccesso di coppia. Il motore di una bivate immette energia nel processo tramite viti rotanti che conferiscono taglio ed energia ai materiali in lavorazione.

I motori e gli azionamenti a corrente alternata sono standard (fino a 1000 kW) che utilizzano la comunicazione digitale e possono caricare/scaricare le impostazioni del convertitore.

La bivate non deve essere orientata sostanzialmente più in alto del numero di giri della vite richiesto. La seguente formula può essere utilizzata come linea guida su come configurare il motore/cambio: Coppia dell'albero in relazione al numero di giri della vite: L'area della sezione trasversale degli alberi delle viti, il design e la metallurgia dell'albero e il metodo di fabbricazione determinano la coppia che può essere impartita in un processo e dettare il miglior rapporto motore/cambio per l'applicazione. Questa formula aiuta a determinare la corretta configurazione del motore e del riduttore per un estrusore bivate

Il cuore del funzionamento della bivate sono le viti ed il cilindro, denominate sezione del processo. In un estrusore bivate corotante a viti intersecanti, le viti sono definite "autopulenti". La velocità superficiale delle viti nella regione intersecante è in direzioni opposte, questo costringe i materiali a seguire un percorso a forma di 8 disteso lungo la lunghezza delle viti. Esistono infinite varianti di design delle viti e il design delle viti può essere reso intensivo o passivo. Vi sono, tuttavia, solo tre tipi base di elementi a vite: elementi a rotaia, elementi di miscelazione ed elementi di zonizzazione. Gli elementi volati inoltrano il materiale oltre le aperture del cilindro, i miscelatori e dall'estrusore verso la matrice. Gli elementi di suddivisione in zone isolano due operazioni all'interno dell'estrusore, mediante il polimero fuso che funge da sigillatura prima dello sfiato del vuoto.

Gli utensili in acciaio temprato o gli acciai inossidabili sono generalmente indicati per prodotti TPU non riempiti, mentre le metallurgie in polvere (PM) sono spesso specificate durante la lavorazione di composti riempiti. Gli elementi di miscelazione possono essere dispersivi o distributivi. L'elemento di miscelazione più comune è un "impastatore". Più un elemento di miscelazione è largo, più diventa dispersivo man mano che si estendono effetti di taglio estensivi e planari man mano che i materiali vengono spinti lungo il cilindro. Gli elementi di miscelazione più stretti sono i più distributivi, facilitando un'elevata velocità di divisione del fuso mescolandosi con un piccolo taglio estensivo e planare. Gli elementi di miscelazione distributivi consentono di miscelare materiali sensibili al calore e al taglio, come fibre di vetro o ritardanti di fiamma, senza degradazione/atrito.

Gli elementi di miscelazione possono essere disposti con un passo in avanti (meno aggressivo), neutro o con passo inverso (il più aggressivo). La miscelazione ad alta fase liquida generalmente beneficia di elementi distributivi speciali che impediscono il "raggruppamento" dei liquidi nella settore del processo bivate. Il cilindro a settori

modulari dell'estrusore bivate, utilizzano elementi riscaldanti a cartuccia elettrici e gruppi di fori interni per il raffreddamento a liquido. Proprio come le viti, gli utensili temprati o gli acciai inossidabili sono adeguati alla maggior parte dei processi di estrusione, mentre i rivestimenti sono specifici per una maggiore resistenza all'usura.

Le operazioni tipiche dell'unità eseguite nella sezione del processo bivate includono alimentazione, fusione, trasporto, sfiato e pompaggio. Il rapporto lunghezza/diametro (L/D) (la lunghezza complessiva della sezione del processo divisa per il diametro della vite) della sezione del processo bivate è abbinato al numero di operazioni dell'unità che devono essere eseguite.

I rapporti lunghezza/diametro (L/D) per i processi di estrusione vanno da 28/1 per un'alimentazione premiscelata a 60/1 per alcuni processi reattivi. Il rapporto OD/ID di una bivate viene definito dividendo il diametro esterno (OD) per il diametro interno (ID) di ciascuna vite. Ad esempio, una bivate con un OD di 50 mm e un ID di 32 mm avrebbe un rapporto OD / ID di 1,56 (50/32).

Il fattore di limitazione della coppia per una bivate è il diametro e il disegno dell'albero della vite. Viti con spirali più profonde producono un maggiore volume libero, ma con una coppia inferiore, poiché è obbligatorio utilizzare un albero vite di diametro inferiore. Basato sull'uso di un albero scanalato simmetrico, è stato ritenuto che un rapporto OD/ID 1,55 offra il miglior equilibrio tra coppia e volume.

L'uso degli alberi scanalati asimmetrici migliora l'efficienza della trasmissione di potenza dell'albero in modo che un albero di diametro inferiore possa trasmettere una coppia maggiore in quanto poiché il vettore della forza tangenziale dal dente dell'albero è isolato nella trasmissione della potenza dal motore sugli alberi / viti / materiali elaborato e facilita un rapporto OD/ID aumentato di 1,66/1.

Classificazione degli estrusori

Gli estrusori per la lavorazione dei polimeri possono essere divisi in diversi tipi in base alle funzioni della vite e comunemente sono divisi in estrusori bivate ed estrusori monovite. Di seguito, esaminiamo la differenza tra i due estrusori.

La differenza tra un estrusore bivate ed un monovite è, appunto, nel numero delle viti; nel monovite è una, nel bivate sono due. Sono tutti azionati da un motore elettrico la cui potenza varia in funzione della vite (diametro e lunghezza). Facciamo degli esempi, un estrusore bivate di diametro 50 mm con installato un motore da circa 20 kW, un estrusore bivate di diametro 65 mm ha installato un motore di circa 37 kW, la produttività del bivate di diametro 50 mm è di circa 100-150 kg/h, la produttività del bivate di diametro 65 è di circa 200-280 kg/h.

Un paragone con un estrusore monovite di pari diametro, rivela che esso ha una produzione di circa la metà rispetto ad un estrusore bivate. Questo è uno dei molti motivi che ha portato allo sviluppo degli estrusori bivate.

Allo stato attuale, l'estrusore del tipo monovite è certamente il più conosciuto ed utilizzato, in quanto è presente sul mercato da molto più tempo, ed è adatto per la lavorazione di estrusione di molti materiali.



Estrusore bivate per polimeri (LEISTRIZ AG)

L'estrusore bivate però, anche se meno diffuso, ha i suoi vantaggi riconosciuti, per esempio produce meno calore generato dall'attrito, il “taglio” del materiale è sempre uniforme, con una capacità di trasporto delle viti superiore, la quantità e la qualità di estrusione è relativamente stabile, il materiale rimane nell'estrusore per meno tempo e la miscelazione è uniforme.

L'estrusore bivate, per le sue caratteristiche di estrusione forzata, alta qualità, ampia adattabilità, lunga durata, bassa velocità di taglio, scarso deterioramento del materiale, elevate capacità di miscelazione e plastificazione, estrusione diretta di polimero in polvere, controllo della temperatura molto precisa, estrazione dei gas, ecc. è indicato nella produzione di tubi, piastre, profili e altri prodotti oltre che nel compounding.

Nonostante le qualità riconosciute dell'estrusore bivate, gli estrusori monovite svolgono ancora un ruolo fondamentale nella granulazione dei plastificanti ma anche come macchine per la formatura e negli ultimi anni si sono ulteriormente sviluppati ed ingranditi. È stato costruito un estrusore monovite di diametro 700 mm per la granulazione con una resa di 36 ton/ora.

La componente chiave dell'estrusore monovite è la vite su cui sono stati eseguiti numerosi studi teorici e sperimentali negli ultimi anni. Siamo arrivati ad avere fino a cento tipi di viti diverse, ognuna con una sua precisa caratterizzazione per il tipo di polimero da processare e per il tipo di prodotto da ottenere.

La ricerca nel campo della chimica e dei polimeri porta sempre a nuove scoperte e nuovi materiali e lo sviluppo delle viti deve seguire di conseguenza, quindi ci saranno ancora nuove viti e nuovi estrusori. Possiamo affermare che gli estrusori monovite sono ormai indirizzati verso uno sviluppo di alta specializzazione, con alta velocità e alta efficienza.

Rispetto all'estrusore monovite, l'estrusore bivate ha delle buone caratteristiche di alimentazione, è più adatto alla lavorazione di polimeri in polvere ed ha ottime capacità di miscelazione, reazione, estrazione delle sostanze volatili ed autopulizia, è

caratterizzato da una elevata stabilità termica nella lavorazione di materie plastiche e di miscele.

Negli ultimi anni, gli estrusori bivate si sono notevolmente evoluti. Una possibile classificazione degli estrusori bivate può essere la seguente:

- 1) In base alla posizione relativa dei due assi vite, ci sono viti ad assi paralleli e viti coniche ad assi convergenti.
- 2) Secondo il disegno di innesto delle viti, con o senza interferenza (intermeshing).
- 3) Secondo il senso di rotazione delle due viti, cioè corotanti o controrotanti.
- 4) In base alla velocità di rotazione della vite, cioè ad alta o a bassa velocità di rotazione.
- 5) Secondo la struttura della vite e del cilindro, con costruzione modulare o integrale.

Sulla base dell'estrusore bivate, al fine di semplificare il trattamento di miscele con scarsa stabilità termica, alcuni produttori hanno sviluppato gli estrusori multivite che sono una ulteriore evoluzione dell'estrusore.

Vantaggi dell'estrusore bivate

Il confronto tra estrusione bivate ed estrusione monovite è un esercizio fondamentale per che deve decidere sull'investimento nella tecnologia di estrusione. Nell'elenco che segue, sono elencati i vantaggi riconosciuti da tempo della tecnologia di estrusione con un estrusore bivate e sono confrontati con la consolidata tecnologia di estrusione monovite.

Gli estrusori bivate corotanti rispetto agli estrusori monovite presentano:

- Elevata capacità di miscelazione, conseguenza della compenetrazione tra le due viti e alla grande varietà di design di viti specializzate (come elementi di viti inverse, blocchi di "impastamento", settori di miscelazione, ingranaggi, ecc.) Che consentono di regolare con precisione l'estensione del taglio/miscelazione; portando quindi a controllare il grado di miscelazione per quanto riguarda l'intensità di miscelazione e la qualità di miscelazione (dispersiva contro distributiva). Al contrario, la capacità di miscelazione degli estrusori a vite singola è molto limitata e qualsiasi limitazione del flusso per migliorare la miscelazione attraverso speciali design delle viti porta a ridurre la produttività dell'estrusore.
- Elevato livello di flessibilità del processo, grazie alla capacità produttiva e all'indipendenza della velocità della vite, capacità di gestire più funzioni di elaborazione in serie (come fusione, miscelazione, cottura, sfiato, raffreddamento, ecc.) in un unico estrusore. Al contrario, negli estrusori monovite, la velocità della vite e la produzione

sono direttamente dipendenti, mentre i design di viti con più funzioni di elaborazione in serie sono limitati.

- Migliore controllo dei parametri di processo, ovvero: distribuzione del tempo di permanenza più stretta, minore dispersione delle velocità di taglio e deformazione, maggiore trasferimento di calore convettivo, controllo accurato del profilo di temperatura; portando quindi a un controllo molto migliore nel processo di taglio-tempo-temperatura nell'estrusore, a una gamma molto più ampia di input di energia meccanica e quindi a una maggiore coerenza per quanto riguarda la conversione del materiale e la qualità del prodotto.
- Maggiore produttività del processo, grazie all'azione di pompaggio positiva delle viti, capacità di gestire più ampie varietà di materie prime e formulazioni di miscele tra cui ricette complesse, compensazione della velocità della vite grazie all'usura delle viti (con prestazioni degli estrusori a vite singola diminuiscono invariabilmente quando aumenta l'usura delle viti), tempi di fermo inferiori.
- Maggiori opportunità economiche e potenziale commerciale rispetto agli estrusori a vite singola, grazie alla maggiore flessibilità e produttività del processo, per produrre una gamma più ampia di prodotti finali, convertire materiali e gestire la qualità del prodotto in modo più coerente, per compensare l'effetto dell'usura della vite attraverso la regolazione della velocità della vite.

Storia ed evoluzione

Sin dalla metà del XIX secolo, la gamma delle applicazioni è andata ampliandosi e gli estrusori erano ampiamente usati nella produzione industriale. A quel tempo però erano tutti estrusori monovite e venivano utilizzati principalmente nei settori della produzione della porcellana, della gomma e dell'industria alimentare.

Analizzando il processo di estrusione di quelle macchine primitive, si è scoperto che l'efficienza del materiale trasportato dall'estrusore monovite è fortemente influenzata dalle proprietà reologiche del mezzo stesso e che la ritenzione del materiale alla base della spirale della vite è notevole, per questo, gli ingegneri hanno cercato una soluzione a queste problematiche.

Presso la società Gutta-Percha Company di Londra, venne sviluppato nel 1847, il primo estrusore monovite per materie plastiche. Il materiale che veniva estruso venne chiamato guttaperca. Infatti, il termine "gutta-percha" è il nome di una macromolecola di origine vegetale, chimicamente imparentata con il caucciù (gomma naturale) e dalla quale si differenzia per la sua totale assenza di comportamento elastico.

Il materiale guttaperca venne così impiegato principalmente come isolante per i cavi rivestiti. Successivamente dal 1848 al 1850, Charles Hancock anch'esso dipendente della società Gutta-Percha Company, impiegò le tecniche di estrusione concepite da Bewley e Broomman per sviluppare il rivestimento di un cavo, esso venne utilizzato come

materiale isolante elettrico. Tale soluzione permise la realizzazione dei primi cavi sottomarini per il telegrafo per le trasmissioni intercontinentali.

Nel 1860 un ingegnere minerario francese, Jean Francisque Coignet, propose un dispositivo di sua progettazione per il trasporto e la lavorazione dell'argilla e nel 1869 ottenne un brevetto negli Stati Uniti. Inizialmente, definì questo dispositivo “maxalator”.

Egli è stata la prima persona al mondo a proporre un vero estrusore bivate. L'invenzione dell'estrusore bivate ha notevolmente aumentato l'applicazione dell'estrusore nella produzione industriale. Era un dispositivo rudimentale ma efficace per lo scopo per cui era stato creato.



Jean Francisque Coignet
(1835–1902)

Negli Stati Uniti nel 1870 vi è il primo esempio documentato di estrusione, fu estruso del nitrato di cellulosa mediante un pistone idraulico che spingeva il materiale verso la filiera. Il processo però era lento, limitato a lunghezze discrete ed ovviamente discontinuo. Il processo di estrusione rimase pressoché invariato fino ai primi anni 30 del XX secolo, poi vi furono dei progressi significativi sia a livello di macchinari che di materiali.

Per consentire una continuità al processo di estrusione, vennero sviluppate delle nuove soluzioni, la più importante fu quella di sostituire il cilindro idraulico con una vite a coclea come mezzo di trasporto del materiale verso la filiera. L'uso di una vite di Archimede con diametri diversi di nocciolo per generare pressioni diverse, permise anche una capacità di miscelazione del materiale all'interno dell'estrusore.

In Italia nel 1937, fu realizzato il primo estrusore bivate corotante per la produzione di tubi di PVC rigido. Esso fu realizzato nel 1938 dalla LMP di Torino, su progetto dell'ingegner Roberto Colombo, e fu il primo estrusore bivate destinato alla commercializzazione.

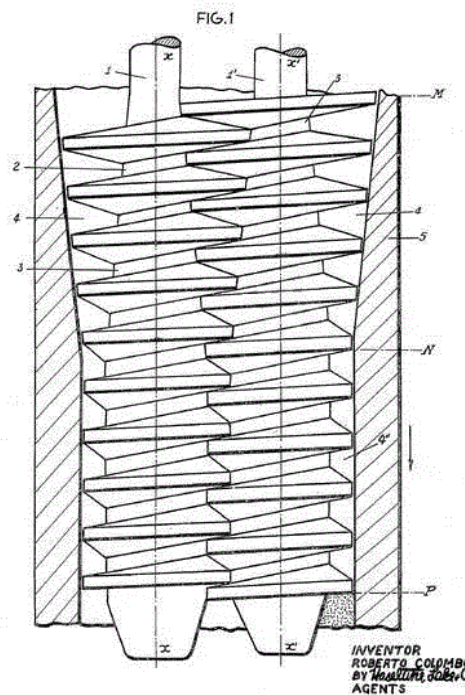
La LMP dell'ingegner Roberto Colombo iniziò l'attività nel 1937, questa azienda si occupava della trasformazione delle resine termoindurenti per la crescente industria automobilistica.

Prima di questa innovazione tecnica, i tubi in PVC venivano prodotti mediante presse idrauliche ma, ovviamente, era un processo discontinuo. Da quel momento, la pressa idraulica fu per sempre sostituita da un estrusore bivate che permetteva la continuità della produzione. L'estrusore bivate di Colombo è stato il primo tentativo di impiego della macchina nella lavorazione dei polimeri.

Come si può vedere dall'immagine estratta dal brevetto, le viti di Colombo sono tutte composte da elementi di trasporto, perché la sua intenzione originale era quella di estrudere; quindi, non ha considerato il problema dell'efficienza della miscelazione.

Nel 1939, l'ing. Colombo migliorò l'estrusore bivate fino a un diametro massimo di 109 mm. Nel medesimo anno vendette il primo lotto di estrusori bivate corotanti alla società tedesca IG Farben e questo permise lo sviluppo della tecnologia di estrusione e l'accettazione da parte del mercato delle nuove macchine.

Nel dopoguerra la LMP proseguì l'attività a Torino e nel 1946 era sia un costruttore di estrusori bivate ma anche un produttore di profilati estrusi di diverse tipologie. L'azienda dell'ing. Colombo ha potuto sviluppare estrusori di elevata potenza, a due o più viti compenetranti e corotanti, con passi e diametri crescenti ed una elevata capacità di miscelazione. La richiesta era così elevata che la LMP nel 1948, concesse la licenza di fabbricazione a diverse società estere, tra le quali ricordiamo: Herbosch-Polva, Windsor, Creusot-Loire (oggi Cletral), Ikegai Iron Works e Chemica.



Colombo Roberto – brevetto bivate per miscelazione ed estrusione di materie plastiche (1951)

Tuttavia, in quel periodo storico (tra gli anni 30 e gli anni 40), la produzione e l'applicazione dell'estrusore bivate non è ancora accompagnato da una seria analisi scientifica e matematica e si può dire che l'applicazione pratica è molto più avanzata rispetto alla teoria, il periodo cupo della Seconda Guerra mondiale era iniziato e l'attenzione fu inizialmente rivolta ad altri problemi.

Durante i primi anni 40 del secolo scorso, in pieno periodo bellico, un gruppo di matematici, fisici, ingegneri e un gruppo di esperti meccanici iniziarono a studiare scientificamente l'estrusione a doppia vite co-rotante nello stabilimento IG in Sassonia-Anhalt, Germania. Tra questi ci furono W. Meskat, A. Geberg e Rudolf Erdmenger; il loro compito fu quello di sviluppare un impianto chimico che doveva poter essere utilizzato per superare i problemi di miscelazione dei fluidi con un'alta viscosità.

Durante la guerra la ricerca fu più volte sospesa e solo dopo la fine della Seconda guerra mondiale questo lavoro di sperimentazione poté riprendere alla Bayer di Leverkusen, in Germania. Nel 1948, R. Erdmenger guidò un gruppo di 15 persone il cui compito principale era quello di sviluppare nuovi processi chimici per la Bayer.

Dalla loro ricerca, emerse che il più grande svantaggio dell'estrusore a vite singola è che la sua capacità di trasporto è strettamente correlata alle proprietà reologiche del materiale da trasportare e al fine di superare questo problema, si sono concentrati ancora una volta sull'estrusore bivate.

Contemporaneamente, negli Stati Uniti, molte grandi aziende contribuirono alla ricerca ed allo sviluppo di nuovi materiali plastici, tra queste aziende ricordiamo: Du Pont, General Electric, Goodrich, Imperial Chemical Industries.

La Seconda Guerra Mondiale portò una ulteriore accelerazione nelle attività di ricerca nei polimeri, portando alla produzione di film in polietilene, di isolanti per cavi elettrici e furono altresì poste le basi per dei nuovi materiali sintetici che si sarebbero sviluppati ed utilizzati nei prodotti del dopoguerra. In un breve lasso di tempo, l'industria degli Stati Uniti si convertì dalla produzione di beni di consumo a quelli bellici e viceversa, mantenendo come elemento comune, lo sviluppo dell'impiego del polietilene.

Sono seguiti lo sviluppo dei polimeri, dei macchinari dedicati, dei sistemi di controllo e regolazione, la costruzione delle teste e delle filiere di estrusione, delle viti e dei processi di formatura seguenti all'estrusione. Questo ha permesso che l'estrusione diventasse un processo produttivo commercialmente di alta capacità.

Le maggiori difficoltà sono connesse al controllo del processo, che è un requisito inevitabile per ottenere una continuità nella produzione. Il profilo estruso, viene formato nelle sue dimensioni finali dopo il passaggio attraverso la filiera ed il successivo raffreddamento. Contrariamente al processo di stampaggio ad iniezione o soffiatura, dove il pezzo assume le dimensioni finali all'interno dello stampo fino alla sua polimerizzazione e raffreddamento.

Nel corso degli anni 50, dopo anni di sperimentazione e di ricerca, W. Meskat e R. Erdmenger, definirono alcuni parametri chiave dell'estrusore bivate, facendo avanzare la ricerca teorica dell'estrusore verso una generale standardizzazione.

Questa innovazione tecnologica porta alla prima produzione in serie di estrusori per la miscelazione dei polimeri.

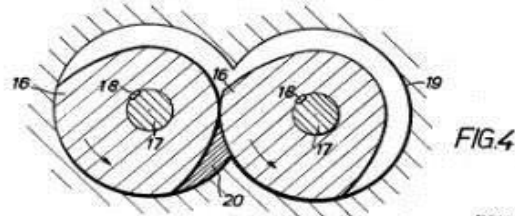
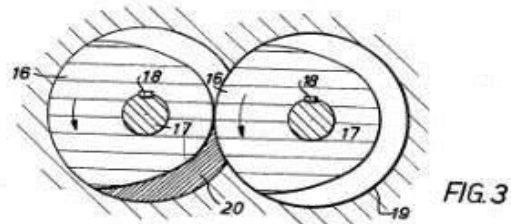
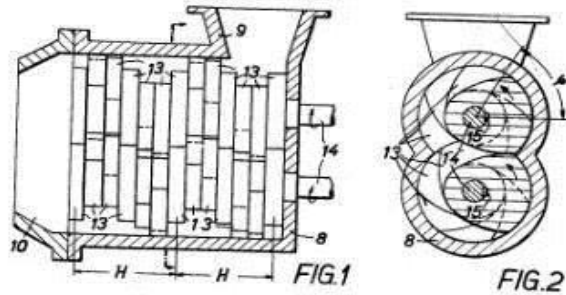
Feb. 23, 1954

R. ERDMENGER
MIXING AND KNEADING MACHINE

2,670,188

Filed Sept. 20, 1950

3 Sheets-Sheet 1



INVENTOR.
RUDOLF ERDMENGER
BY *Ruggess-Dubly*
ATTORNEYS

R. Erdmenger – mescolatore ad eccentrici (1954)

Quello che vediamo illustrato qui sopra, è estratto da uno dei numerosi brevetti: si può vedere che all'epoca, l'estrusore era con testa singola e le viti erano composte esclusivamente da settori di miscelazione accoppiati.

Nel 1957, la società WP, ottenne la licenza di produzione in serie e mise in commercio il primo estrusore bivate della serie ZSK per la miscelazione dei polimeri.

La sigla ZSK è un'abbreviazione dal tedesco “ZweiwelligeKnetscheiben-Schneckenpresse”, che significa "estrusore a disco a due viti conintermeshing". Questo estrusore aveva una combinazione dei settori delle viti libera e modulare.



Primo estrusore bivate WP per miscelazione di polimeri (anni '50)

Oltre a superare le limitazioni dell'estrusore a vite singola del medesimo periodo e ad aumentarne la produzione, il modello di estrusore bivate ZSK introdotto da WP non presentava altri vantaggi in termini di produzione, principalmente a causa della progettazione del riduttore, infatti, il cuscinetto assiale reggispinta era purtroppo largamente sottodimensionato.

Nella progettazione di un estrusore bivate, determinata la distanza dall'asse centrale della vite gemellata, il cuscinetto assiale deve fornire una spinta sufficiente per resistere alla contropressione, pur rimanendo di dimensioni contenute. Allo stesso tempo, la coppia erogata dal motore deve essere equamente distribuita alle due viti. Nella produzione di un riduttore, le principali difficoltà sono nella progettazione strutturale, nella selezione dei materiali adeguati, nei trattamenti termici dei componenti.

Un altro fattore limitante nella costruzione dei riduttori per estrusori bivate è la coppia specifica erogata sui due alberi in uscita. La coppia specifica indica il limite di coppia che l'estrusore può fornire su un volume di spazio unitario. Il valore di questo parametro determina spesso le prestazioni erogate dell'estrusore; maggiore è la coppia specifica, maggiore è la produzione in uscita con lo stesso diametro della vite.

Infatti, poiché il processo di estrusione è un sistema complesso, una coppia specifica elevata indica una capacità di produzione superiore, essa rappresenta una unità di energia meccanica che più è bassa e più l'attrezzatura può essere ridimensionata, ciò comporta anche alcuni svantaggi per la qualità della miscelazione e l'efficienza della devolatilizzazione; pertanto, nella progettazione dell'estrusore, bisogna riuscire a bilanciare questi parametri.

Dagli anni 60 del XX secolo, grazie alla maggiore divulgazione scientifica nel campo della lavorazione dei polimeri ed insieme alla domanda crescente del mercato, sono stati continuamente migliorati i vari parametri dell'estrusore. I costruttori si resero conto che se avessero voluto realizzare un prodotto migliore, avrebbero dovuto diminuire i tempi di permanenza del polimero nell'estrusore, ridurre la temperatura di fusione, migliorare

la miscelazione e aumentare la resa in base ai requisiti delle miscele di polimeri da estrudere.

L'evoluzione dell'estrusore bivate è continuata nel corso degli anni; se prendiamo come esempio un'estrusore bivate da 65mm dei primi anni 80 e lo confrontiamo con il medesimo modello dell'anno 2000, vedremo che in 20 anni la capacità produttiva è aumentata di quasi 10 volte.

La coppia specifica è passata da 4 Nm/dm³ del primo ad oltre 18 Nm/dm³, il rapporto lunghezza-diametro è aumentato da 1,22 a 1,80 e il tempo medio di permanenza del materiale è stato ridotto da decine di minuti a solo decine di secondi.

Attualmente, l'estrusore bivate è diventata l'apparecchiatura da elaborazione più rappresentativa nel settore della produzione della miscela polimerica ma anche dei mangimi per animali, dei detergenti e delle vernici. Sempre più campi utilizzano gli estrusori bivate come attrezzatura di produzione e le esigenze diverse che vengono richieste all'estrusore sono in continua evoluzione.

I requisiti dei compratori di un estrusore bivate non si fermano ad un'alta produttività e un basso consumo energetico. Poiché l'impatto dei parametri di processo sulle prestazioni del prodotto non può essere sottovalutato, alcuni requisiti speciali di personalizzazione sono proposti anche per le apparecchiature di estrusione.

In effetti, anche oggi, molte applicazioni con gli estrusori bivate non sono ancora supportati da una teoria matematica e si può ancora dire che la pratica è molto più avanzata rispetto alla teoria.

Attraverso la storia dello sviluppo dell'estrusore bivate, possiamo vedere che in termini di applicazione e di teoria, l'estrusore bivate ha ancora molta strada da fare. Tuttavia, lo sviluppo di estrusori bivate non si fermerà finché l'industria continuerà a chiedere nuove caratteristiche e soluzioni. Tuttavia, solo quando la conoscenza dell'utente dell'estrusore è sufficientemente profonda, può proporre una chiara direzione di miglioramento per servire allo sviluppo e alla produzione di prodotti di qualità superiore.

Dopo molti anni di sperimentazione continua, analisi e formulazioni, il processo di estrusione, che un tempo era chiamato "scatola nera" per il mistero che lo circondava, divenne gradualmente più comprensibile.

Sono comunque noti, alcuni svantaggi dell'estrusore bivate convenzionale, come la dispersione che è ancora principalmente dovuta al flusso di taglio, questo non va bene per la dispersione generata in alcuni fluidi con un alto rapporto di viscosità.

Altri problemi sono, per esempio, i settori di miscelazione nelle viti che presentano il problema dell'uniformità nella generazione degli sforzi di taglio e non tutti i materiali possono subire sforzi di taglio non uniformi. Il cilindro di estrusione non riesce ancora ad ottenere un controllo della temperatura più efficiente, uniforme e preciso; bisogna ancora migliorare ulteriormente l'efficienza del trasferimento del fuso; come anche

ridurre la temperatura di fusione e l'inerzia termica dei materiali polimerici che sono la premessa per garantire la qualità della dispersione e della distribuzione.

Estrusore bivate corotante

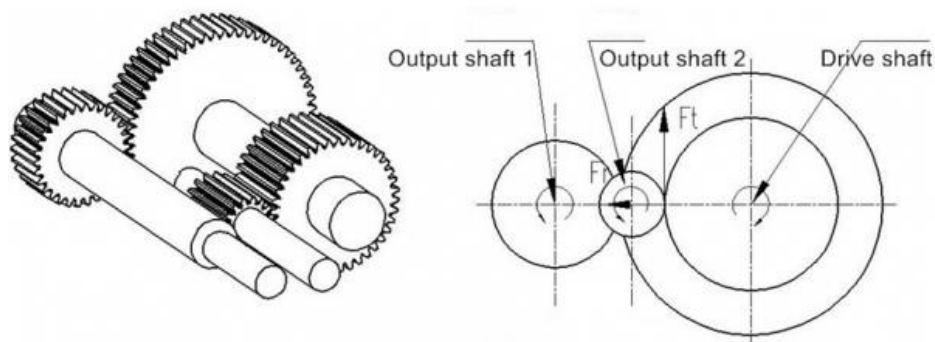
Gli estrusori bivate corotanti, come abbiamo già detto, occupano circa il 90% del mercato degli estrusori bivate. Sono infatti i più usati per la produzione di compound plastici, dai tecnopolimeri ai masterbatch, ma anche per il riciclo delle materie plastiche.

Il rapporto lunghezza/diametro (L/D) varia a seconda dell'applicazione, i valori tipici sono 15:1; 24:1; 30:1; 32:1; 36:1; 40:1. Il valore più utilizzato per un estrusore da produzione è il 30:1. Gli altri rapporti indicati sono per applicazioni speciali (24:1 per il PVC ad esempio) ed alcuni anche desueti (15:1 usato negli estrusori degli anni 50 del secolo scorso). Per la granulazione ed il riciclaggio si va sul rapporto L/D 36:1. Gli estrusori da laboratorio vanno da un rapporto L/D 30:1 a 40:1.

I diametri delle viti variano in base alla produzione richiesta in kg/ora, si va dai 10/20mm di diametro per un estrusore da laboratorio, ai seguenti più utilizzati nella produzione: 42/58/71/92/112/128/135/160mm ed anche oltre per produzioni più elevate.

Le velocità di rotazione delle viti vanno dai 150 giri/min ai 300 giri/min. Le velocità di rotazione da 600 giri/min ai 900 giri/min sono usati negli estrusori con le viti di diametro più piccolo.

I motori installati hanno una potenza che va dai 0,55/1,1 kw nei piccoli estrusori bivate da laboratorio ai 37/50/75/125/150/200 kw degli estrusori standard.



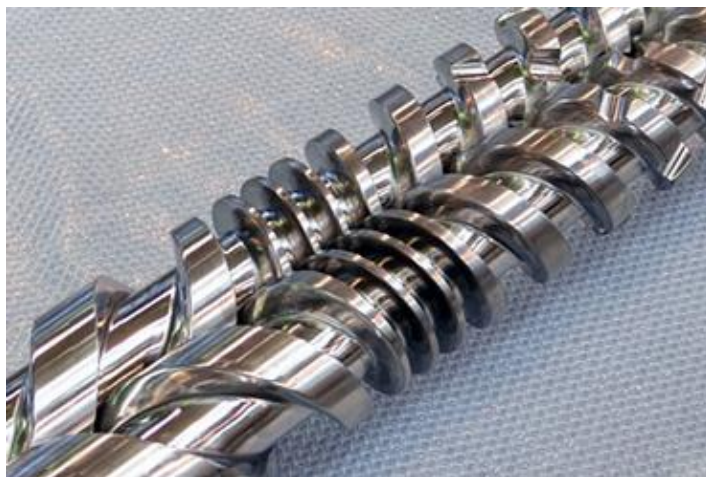
Cinematico del riduttore per viti corotanti



Coppia di viti corotanti estratte del cilindro

Estrusore bivate controrotante a viti parallele

Gli estrusori bivate controrotanti a viti parallele sono utilizzati soprattutto per la lavorazione del PVC sia come granulazione che, come produzione di tubi, lastre e film. Oltre a questi materiali, sono molto usati per l'estrusione di polimeri caricati con legno ed altre fibre vegetali.

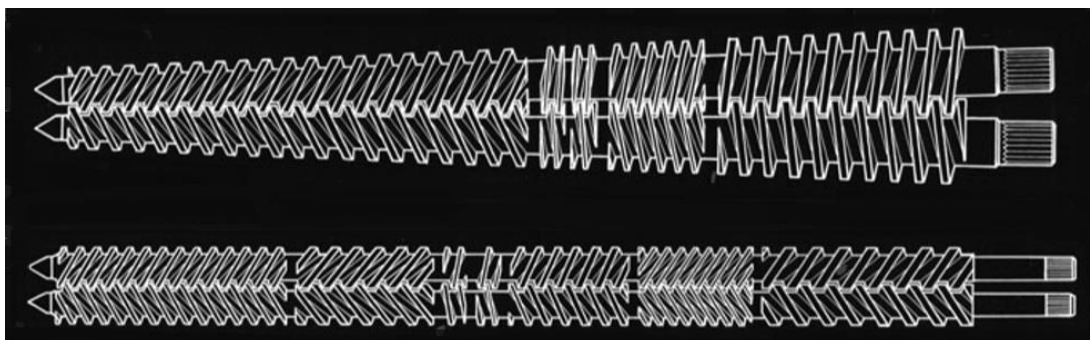


Coppia di viti controrotanti

Il rapporto lunghezza/diametro (L/D) anche in questo caso, varia a seconda dell'applicazione, i valori tipici sono 24:1; 28:1; 32:1; 36:1; 40:1. Il diametro più frequente per un estrusore da produzione di PVC è il 28:1. Gli altri diametri indicati sono per applicazioni speciali.

Estrusore bivate controrotante a viti coniche

Gli estrusori bivate controrotanti a viti coniche sono una variante del modello precedente, sono stati creati con lo scopo di risolvere il problema delle elevate forze radiali ed assiali in gioco in un estrusore bivate controrotante a viti parallele. Questo ha permesso di diminuire la dimensione necessaria del cuscinetto reggispira e conseguentemente, tutta la cassa ingranaggi, facilitando le operazioni di manutenzione.



Confronto tra coppie di viti controrotanti coniche e parallele.

Il primo estrusore bivate conico venne realizzato nel 1964 dalla società Anger AGM, seguita dalla Cincinnati nel 1969 e dalla Krauss-Maffei nel 1973. Nel 1974 la Krauss-Maffei brevettò il nome di bivate a viti coniche (double conical screw).

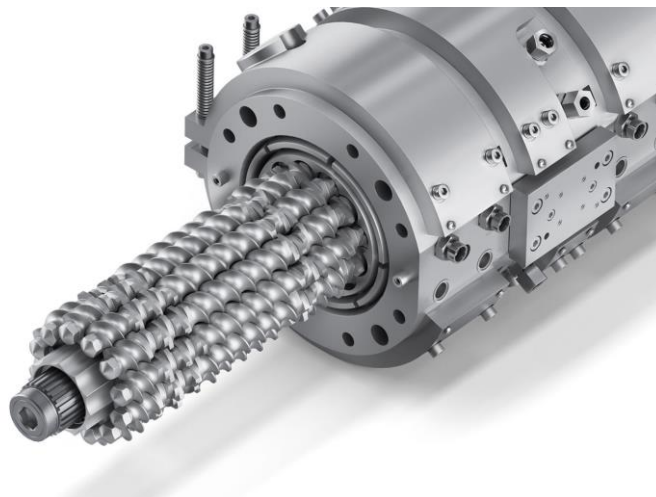
La sua costruzione è dedicata prevalentemente all'estrusione di Profili e Tubi in PVC e W-PVC, hanno un rapporto lunghezza/diametro (L/D), variabile a seconda dell'applicazione, i valori tipici sono 24:1; 28:1. I diametri di vite possono variare da un $d=35\text{mm}$ minimo ad un $d=202\text{ mm}$ di massimo (ma vi sono applicazioni speciali con valori anche superiori). Le portate variano da un minimo di 11 kg/ora per un diametro 35, ad un massimo di 1136 kg/ora per il diametro 202 mm, valori indicativi per il PVC.



Estrusore bivate controrotante a viti coniche. (Milacron)

Estrusore multivite o planetari

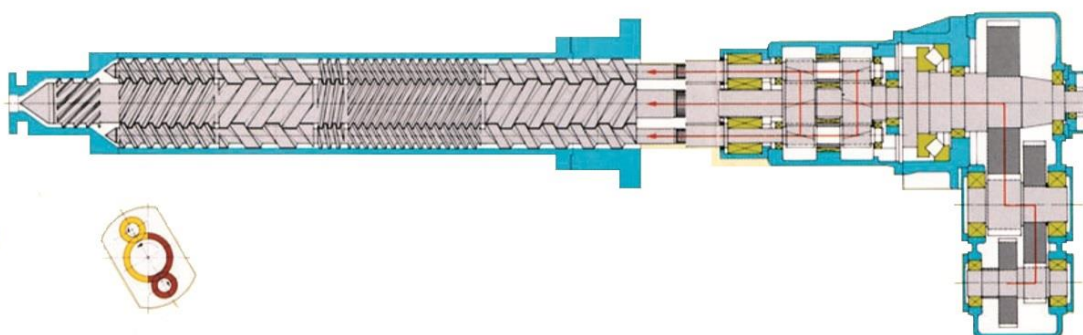
Ulteriore evoluzione degli estrusori bivate sono gli estrusori di tipo multivite detti planetari, cioè con più di due viti e sono stati sviluppati per applicazioni che richiedono una estrazione delle sostanze volatili (solventi) molto più intensa ed un'elaborazione reattiva ma anche per aumentare la capacità di miscelazione dell'estrusore.



Dettaglio estrusore multivite ad anello (Ring Extruder - Krauss Maffei GmbH)

Questo accade perché in un estrusore planetario, il polimero viene a contatto con una superficie maggiore rispetto ad un estrusore bivate, inoltre lo scambio termico è migliore e questo permette un miglior controllo della temperatura.

Inoltre, poiché le zone di compenetrazione delle viti in un estrusore planetario costituiscono una frazione più grande dell'estrusore rispetto alle zone simili in un estrusore bivate, si ottiene che un estrusore multivite abbia caratteristiche di miscelazione migliori rispetto a un estrusore bivate. Questi estrusori sono impiegati soprattutto nel compounding ma anche per l'estrusione di materiali espansi o per la ricopertura di cavi.



Schema di un estrusore multivite Krauss Maffei GmbH

Lo schema precedente, mostra un estrusore a tripla vite di tipo controrotante con le viti complanari, con questo schema di progetto, ogni singola vite ha un'altra sola vite

adiacente, ma vi sono anche altre tipologie. Un esempio molto interessante risulta il progetto della KMD Plastifizierungstechnik GmbH con sede a Lubeca (Germania), di un nuovo tipo di estrusore a tripla vite con le spirali viti a tre principi presentato alla fiera internazionale K-2019 di Düsseldorf (DE) del 2019.

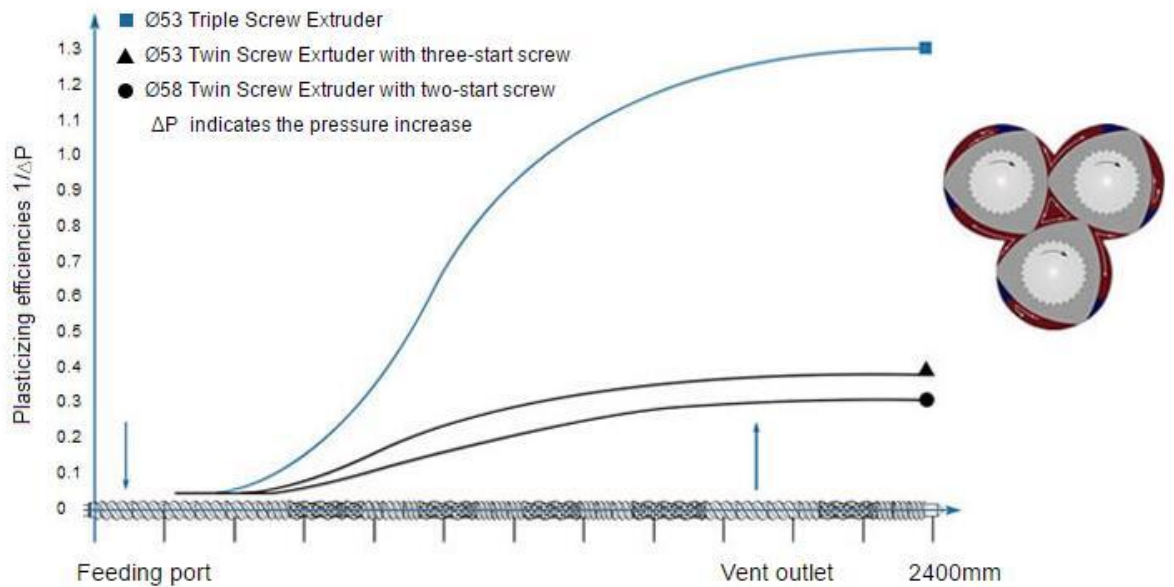
In questo estrusore a tripla vite, i materiali lavorati subiscono l'effetto di taglio per tre volte ad ogni giro della vite. Inoltre, la disposizione delle viti sovrapposte a "trifoglio" forniscono tre punti di taglio tra queste ed il cilindro di estrusione, rispetto a un solo punto di taglio di un estrusore bivate convenzionale.

Il costruttore che ha eseguito i test afferma che grazie agli effetti combinati della vite a tre principi e dall'uso del design a tre viti, il rapporto L/D dell'estrusore può essere ridotto a solo un terzo di quello richiesto per un estrusore bivate convenzionale per ottenere lo stesso effetto plastificante. Quindi, anche il tempo di ritenzione del materiale all'interno del cilindro di estrusione è solo un terzo.

Questo estrusore risulta pertanto adatto per la miscelazione e l'innesto di polimeri, la mescola e la dispersione di polveri e additivi polimerici, nonché per la masticazione in continuo della gomma e l'estrusione di colle, vernici e pigmenti in genere. Come si può ben comprendere dall'immagine seguente, questo tipo di un estrusore a tre viti sovrapposte disposte a "trifoglio", è esclusivamente di tipo corotante, in quanto la geometria stessa della macchina non consente di avere le tre viti tutte controrotanti.



Estrusore a tre viti KMDPlastifizierungstechnik GmbH per compounding



Effetto di dispersione di una polvere di pigmento 48: 3 (30%) in PP (70%)

Questo estrusore a tripla vite possiede delle caratteristiche che risaltano rispetto ad un estrusore bivate convenzionale, tra cui:

1. Trasmissione costante della potenza: variazioni di temperatura dell'ambiente e dell'attrezzatura, irregolarità di installazione, vibrazioni e altri fattori esterni non pregiudicano il funzionamento del riduttore nell'erogazione della coppia.
2. Dimensione estremamente compatta, simile a un estrusore bivate con il medesimo diametro delle viti.
3. Efficienza operativa elevata con un alto rendimento ed un basso consumo energetico.
4. Efficienza plastificante superiore rispetto ad un estrusore bivate.
5. Praticità identica rispetto ad un estrusore bivate; quando si tratta di cambiare i materiali per una nuova formula di produzione, rimuovere e rimontare l'albero della vite e i componenti è agevole come con un estrusore bivate tradizionale.
6. Possibilità di avere le viti termoregolate o raffreddate ad acqua.
7. Possibilità di installare dispositivi di degasaggio e alimentazioni laterali multipli.
8. Consumo energetico estremamente basso a parità di resa di plastificazione rispetto ad un bivate.

9. Dalla bocchetta di alimentazione, i materiali vengono trasportati tramite una scanalatura a 9 spire, formata dalle tre unità di elementi a vite: questo equivale ad un incremento di 1,5 volte nell'efficacia di miscelazione del materiale rispetto all'estrusore bivate con viti a tre principi, questo fornisce una migliore azione di miscelazione.
10. All'interno del cilindro, la quantità di “taglio” prodotta dalla rotazione della vite è triplicata rispetto all'estrusore bivate ed allo stesso tempo, la forza di taglio introdotta nel materiale di lavorazione è 1,5 volte maggiore e l'effetto di miscelazione attraverso la stessa area della sezione trasversale è tre volte quella di un estrusore bivate.
11. Efficienza nel degasaggio: la superficie del materiale esposto sulla superficie della vite (area di scambio del gas) è 1,5 volte superiore a quella di un estrusore bivate a tre principi. L'effetto di “agitazione” è tre volte maggiore nella sezione trasversale.
12. Capacità di dispersione superiore: azione di taglio più potente e più uniforme rispetto a un estrusore bivate fornisce una migliore miscelazione e dispersione del polimero. I pigmenti vengono dispersi in modo più completo e più uniforme per un migliore effetto colorante. Nella miscelazione dei polimeri, si ottiene una capacità di miscelazione notevolmente superiore rispetto ad un estrusore bivate.
13. Applicazioni diversificate: teoricamente in grado di ricoprire molte delle aree di applicazione di un estrusore bivate convenzionale.

Model No.	KD-53	KD-67	KD-96
Screw Diameter (mm)	52.9	66.5	95.5
Screw L/D Ratio	20-60	20-60	20-60
Screw Rotational Speed(rpm)	1000	1000	1000
Main Motor Power(kW)	132-450	220-670	315-1250
Electric Heating Power(kW)	28-50	30-52	60-110
Max. Output(kg/h)	720	1100	2500
Barrel Cooling			
Barrel Cooling Type	Softened Water		
Softened water Pump Motor Power(W)	370	750	1500
Exterior Cooling Water Demand (m³/h)	1.0	1.5	3
Vacuum venting system(Optional)			
Vacuum pump type	Water Loop Vacuum Pump		
Max. Air flow (m³/min)	0.5	0.8	1.5
Ultimate Vacuum Pressure(MPa)	0.095	0.095	0.095
Motor Power (kw)	1.5	2.2	4.0
Water Consumption(m³/h)	0.6	0.75	1.0
Melt Filter System(Optional)			
Screen Change Mode	Continuous, Hydraulic Double-Piston		
Hydraulic Unit Motor Power (kW)	3	3	3
Feeding System(Optional)			
Feeding Principle	Twin Screw		
Drive Motor Power (kW)	1.5	2.2	4
Drive Motor Speed Control Mode	Frequency Conversion		
Max. Feeding Capacity [PP] (kg/h)	800	1200	2800
L x W x H [L/D 48] (mm)	5920 x 860 x 1400	6780 x 950 x 1550	9000 x 1040 x 1700

Dati tecnici per estrusore a tre viti KMD Plastifizierungstechnik GmbH

Gli estrusori multivite, di cui abbiamo dato solo dei cenni, richiederebbero una complessa trattazione a parte. L'analisi fluidodinamica e reologica di questi estrusori è ben più complessa rispetto ad un estrusore bivate convenzionale, inoltre la loro complessità meccanica e quindi il loro costo superiore rispetto ad un estrusore bivate convenzionale, li relegano nella realtà alla lavorazione di specifici materiali.

Queste macchine sono particolarmente utilizzate nella mescola della gomma, nella miscelazione di gomma e plastica e in altri processi quali la lavorazione di Compounds Termoplastici Vulcanizzati (TPV) e l'estrusione reattiva di cui daremo dei cenni in seguito.

Dati tecnici generali degli estrusori bivate

Ogni costruttore, con le sue peculiarità, ha definito le dimensioni, le potenze installate e le portate ottenibili con il migliore rendimento possibile.

La tabella allegata è esclusivamente indicativa, vengono riportati i valori ottenibili con i rapporti L/D più comunemente usati. In tabella è indicato un range L/D = 24 / 52 ma possiamo anche dire che gli estrusori bivate corotanti e controrotanti più commercializzati sono quelli che hanno un L/D = 24 / 28 / 30.

ESTRUSORI BIVITE - STANDARD/HIGH VOLUME									
MODELLO	D 40	D 50	D 60	D 70	D 90	D 108	D 120	D 135	
Diametro Nominale (mm) / High Volume (mm)	42/43	53/55	62/64	70/72	92/94	108/112	120/123	132/135	
Numero di principi delle viti	2	2	2	2	2	2	2	2	
Distanza tra i centri delle viti	35	44,6	52	58	76	90	100	110	
Velocità delle viti (rpm), altri valori a richiesta	600 - 1200	600 - 1200	600 - 1200	300 - 1200	150 - 900	150 - 900	150 - 600	150 - 600	
Coppia massima su ciascuna vite (Nm)	HT (High Torque)	472	976	1547	2146	4829	8020	11000	14600
	XT (Extra Torque)	643	1331	2109	2927	6585	11000	15000	19900
Rapporto L/D	24 - 52	24 - 52	24 - 52	24 - 52	24 - 52	24 - 52	24 - 52	24 - 52	
Indicative output (kg/h)	100 - 250	200 - 500	300 - 750	500 - 1400	1000 - 2200	1100 - 3000	1200 - 4000	1700 - 6000	

Tabella dati tecnici generici per estrusori bivate

La tabella sopra allegata è comunque suscettibile anche di notevoli variazioni da costruttore a costruttore, dal tipo di materiale da estrudere e quindi dello specifico disegno delle viti utilizzate a dalla potenza del motore installato. Vi è comunque una chiara indicazione della potenzialità della macchina “estrusore bivate” nei confronti della macchina “estrusore monovite”; il bivate ha una capacità produttiva praticamente doppia rispetto al monovite ed una flessibilità operativa notevolmente superiore.

Estrusione reattiva

Il processo di estrusione reattiva utilizza un reattore-estrusore continuo (principalmente un estrusore bivate corotante ma eventualmente anche degli estrusori multivite), con eccezionali capacità di miscelazione a livello molecolare.

Il design dell'estrusore-reattore è idealmente adattato alle reazioni chimiche dei mezzi viscosi (viscosità apparente > 100 Pa.s), con un buon controllo della temperatura nel tempo. L'estrusione reattiva è molto spesso utilizzata come sostituto dei metodi tradizionali che implementano i reattori di tipo batch. L'estrusione reattiva è generalmente più efficiente.

Il processo è utilizzato per la produzione di Compounds Termoplastici Vulcanizzati (TPV) ad esempio, mediante l'estrusione reattiva di Polipropilene e EPDM Reticolato.

I processi di estrusione reattiva offrono molti indiscutibili vantaggi, quali:

- Più produttivo; il processo continuo ha tempi di reazione rapidi e tempi di permanenza molto brevi
- Più semplice; il reattore deriva da macchine convenzionali per estrusione di plastica
- Più sicuro; la reazione è limitata e realizzata in un volume di reazione basso
- Più economico ed ecologico; l'estrusione reattiva richiede meno investimenti di capitale e offre buone prestazioni ambientali con un consumo di energia inferiore rispetto ai processi dotati di reattori batch. I sistemi reattivi sono anche più compatti e quindi richiedono meno spazio.

In un reattore estrusore bivate, le reazioni si verificano in fasi omogenee o eterogenee:

Reazioni di fase omogenee

Polimerizzazione alla rinfusa

Modifiche chimiche dei polimeri: innesto, reticolazione, funzionalità, depolimerizzazione, ecc.

Reazioni in fase liquida nella chimica organica classica

Reazioni di fase eterogenee

Sistemi liquido-liquido bifase, compresa la lavorazione da caseina a caseinato, saponificazione (aumento della viscosità in base al tasso di conversione)

Sistemi a liquido solido a due fasi, compresa la digestione alcalina di lignocellulosici, sbiancamento della cellulosa e separazione solido-liquido, ecc.

Reazioni enzimatiche

Le reazioni enzimatiche si ottengono mediante idrolisi da biopolimeri quali l'amido e le proteine.

La tecnologia dell'estrusione reattiva, che consente di intensificare i processi con dei benefici economici e ambientali estremamente positivi, permette di ottenere:

- Elaborazione intensificata, che consente di ridurre i tempi di permanenza e il risparmio energetico grazie a uno scambio termico ottimizzato.
- Controllo delle reazioni, compresa la regolazione della pressione e della temperatura.
- Design compatto, che richiede meno ingombro.
- Basso volume di lavorazione (e quindi una reazione limitata) con ridotta quantità di prodotto nell'estrusore-reattore, migliorando quindi la sicurezza per gli operatori e riducendo i rischi ambientali.
- Elaborazione reattiva coerente, grazie all'elaborazione continua e ripetibile (registrazione e archiviazione dei parametri).

Il processo continuo garantisce una qualità del prodotto costante ed eccezionale; può essere riprodotto in qualsiasi momento e sottopone le materie prime ad uno stress

termico molto basso. La gamma di viscosità che è capace di elaborare è molto ampia ed anche i prodotti altamente viscosi, alcuni dei quali possono causare problemi nel processo batch, possono essere elaborati senza difficoltà utilizzando gli estrusori bivate.

Alla fine degli Anni 80, la società Maris di Rosta (TO) ricevette la richiesta di testare l'efficienza del suo estrusore bivate corotante come "reattore" per effettuare la polimerizzazione continua della resina acetalica POM. Questa idea sperimentale nacque in un gruppo di chimici del North Eastern European Research Institute: questo "estrusore- reattore" doveva eseguire un processo che consisteva nell'essere alimentato da un certo numero di monomeri allo stato liquido per ottenere, alla fine, un polimero.



Estrusore-reattore di F.lli Maris S.p.a. (Rosta – TO)

Il test venne effettuato presso il Maris Technological Center vicino a Torino con un estrusore-reattore bivate da laboratorio, i risultati ottenuti furono promettenti. L'azienda Maris aveva già accumulato una consistente esperienza passata che le permise, nel tempo, di impiegare molti estrusori-reattori anche per altre tipologie di processo, sempre partendo da monomeri liquidi per ottenere, mediante una reazione controllata, un polimero dalle caratteristiche ottimali.

Dopo una lunga serie di ulteriori test, fu avviata con ottimi risultati, la prima linea di produzione. Ad oggi, la società Maris S.p.A. produce le linee di "estrusione-reazione" composte da due estrusori, installati in cascata (uno a monte e uno a valle) dove il primo estrusore funge da reattore chimico, svolgendo il compito di trasformare il monomero liquido in un polimero cristallino. Al termine della polimerizzazione, si ottiene una polvere che viene poi macinata ed essiccata e ne viene disattivato il catalizzatore.

La parte finale del processo è costituita da ulteriori processi di termostabilizzazione e di granulazione, che avvengono nel secondo estrusore bivate, dove dal POM vengono estratte le sostanze volatili tramite il degasaggio; operazione necessaria per rimuovere la frazione instabile del polimero (grazie a una speciale pompa per il vuoto). Queste linee vengono installate solitamente negli impianti chimici, in modo da avere costante accesso alle materie prime.

SOTTOGRUPPI ESTRUSORE

Introduzione

L'estrusore è una macchina complessa che viene costruita assemblando diversi dispositivi e diversi materiali per poter eseguire il processo di estrusione del polimero nel migliore dei modi. Non bisogna pensare che un estrusore qualsiasi, e nello specifico un estrusore bivite, sia adatto a "lavorare" qualunque tipo di polimero o miscela di polimeri e additivi.

Ogni materiale o miscela di materiali, richiede un estrusore "dedicato" e cioè costruito con lo scopo di lavorare quello specifico materiale. Spesso si ritiene che sia sufficiente sostituire viti di estrusione con un modello adatto al materiale per ottenere il risultato desiderato. Questo non è assolutamente vero, infatti la sola sostituzione delle viti di estrusione permette (forse) di estrarre quel materiale ma non potrà mai permettere di sfruttare la completa potenzialità della macchina, cioè la produzione sarà limitata ad un campo di prestazioni e produzione molto ristretto e non sarà possibile raggiungere la massima produzione di cui l'estrusore invece ne è capace.

Premesso questo, andiamo ad analizzare i dispositivi fondamentali di cui si compone un estrusore bivite.

Riduttore

Il riduttore in un estrusore bivite è il dispositivo che trasforma la velocità di rotazione del motore elettrico nel momento torcente applicato alla coppia di viti di estrusione. Il compito del riduttore è quello di moltiplicare e suddividere la coppia che riceve dal motore elettrico in due parti eguali.



Riduttore per estrusore bivite (Zambello Riduttori S.r.l.)

Caratteristiche costruttive

Le caratteristiche principali dei riduttori di comando per gli estrusori bivate sono:

- Cassa ingranaggi fusa in ghisa
- Ingranaggi in acciaio legato, cementati temprati e rettificati di alta qualità
- Cuscinetti a rotolamento di alta qualità
- Cuscinetto assiale reggispinta di tipo multistadio
- Supporto dei carichi assiali delle viti mediante piastre di acciaio e tiranti
- Lubrificazione forzata con pompa a ingranaggi e scambiatore per il raffreddamento dell'olio, posizionati su una piastra da fissare sulla cassa esterna del riduttore
- Controllo del carico assiale della vite esterna, con cella di carico
- Sporgenze alberi lenti e attacco cilindro estrusore a disegno
- Sporgenza albero veloce di entrata dal lato estrusore o dal lato opposto

Capacità di carico e condizioni dinamiche degli elementi

Il **Fattore di servizio** (F_s) degli ingranaggi viene calcolato secondo le normative AGMA.218.01 (American Gear Manufacturers Association) e le relative bibliografie in cui sono descritti i calcoli di verifica della sollecitazione a flessione per fatica sulla base dei denti e della pressione specifica superficiale. Oltre a questo metodo di calcolo, spesso viene integrato da algoritmi specifici per determinare matematicamente i fattori geometrici per eseguire le dentature corrette. Per ogni taglia di riduttore ed ogni modello, vengono calcolati i valori di rendimento degli ingranaggi, capacità e scambio termico, linea elastica degli alberi di trasmissione e valore della freccia massima, momento flettente, sforzo di taglio, sollecitazione a flessione, sollecitazione composta flesso-torsione, sollecitazione al taglio, durata teorica di tutti i cuscinetti, velocità periferica degli ingranaggi, velocità critica flessionale dell'albero veloce, sollecitazione a trazione dei tiranti reggispinta (se presenti), sollecitazione del cuscinetto reggispinta, carichi dinamici sui bulloni di fissaggio del basamento.

Stante le differenze tra gli esistenti estrusori bivate, i riduttori si suddividono in:

- riduttori per estrusori bivate corotanti
- riduttori per estrusori bivate controrotanti a viti parallele
- riduttori per estrusori bivate controrotanti a viti coniche

Riduttori per estrusori bivate corotanti

Sono riduttori suddivisi in tre sottocategorie in base alla densità di coppia erogabile su ogni singola vite di estrusione:

- Con densità di coppia trasmissibile fino a 14 Nm/cm³ per albero ed una velocità di esercizio da 25 a 200 giri/min max. e tra i 300 e i 900 giri/min max. Sono solitamente disponibili con interassi da 24mm fino a 200 mm ma disponibili a richiesta anche grandezze superiori.

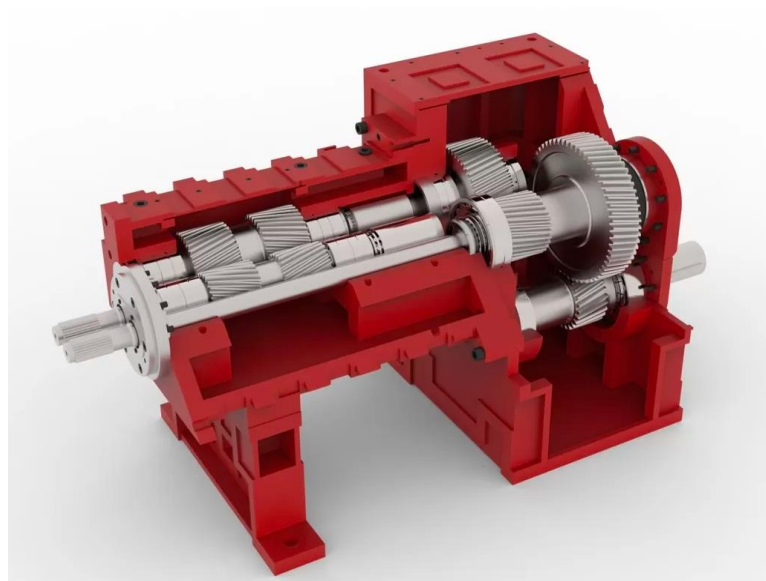
- Con densità di coppia trasmissibile fino a 16 Nm/cm³ per albero ed una velocità di esercizio delle viti fino a 18900 giri/min. Sono solitamente disponibili con interassi da 20mm fino a 120 mm ma disponibili a richiesta anche grandezze superiori.
- Con densità di coppia trasmissibile fino a 18 Nm/cm³ per albero, sono riduttori dedicati all'estrusione dell'Alta Densità HD (High Density).

Riduttori per estrusori bivate controrotanti a viti parallele

Anche qui, sono riduttori suddivisi in tre sottocategorie in base alla densità di coppia erogabile su ogni singola vite di estrusione:

- Con densità di coppia trasmissibile fino a 17 Nm/cm³ per albero
- Con densità di coppia trasmissibile fino a 20 Nm/cm³ per albero
- Con densità di coppia trasmissibile fino a 22,5 Nm/cm³ per albero

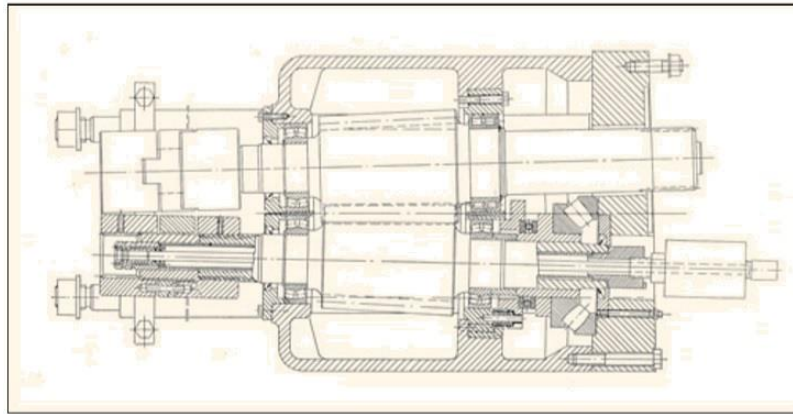
Hanno una gamma di rapporti di riduzione che va da 1:14 a 1:80 e vengono generalmente accoppiati al motore elettrico tramite un giunto elastico.



Riduttore per estrusore bivate corotante a viti parallele

Riduttori per estrusori bivate controrotanti a viti coniche

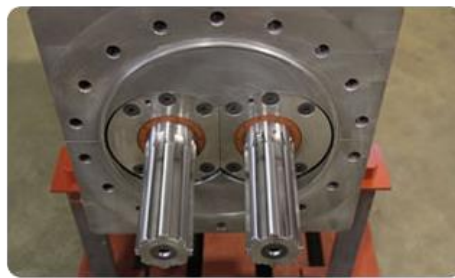
Questi particolari estrusori esigono un riduttore apposito dove, gli alberi di comando, fuoriescono dalla cassa ingranaggi già con la corretta angolatura tra loro, mentre i diametri vite più utilizzati sono il 55 mm, il 65 mm e 80 mm.



Disegno in sezione di un riduttore per estrusore bivate a viti coniche

Dal disegno si vede chiaramente gli alberi in uscita sul lato sinistro, completi di giunti elastici per l'accoppiamento con le viti di estrusione e, sul lato destro, l'albero in basso equipaggiato con il cuscinetto reggispinta.

I rapporti di riduzione disponibili sono simili ai precedenti così come le densità di coppia erogabile. La principale caratteristica di questi riduttori è di avere anche gli ingranaggi conici rettificati in classe AGMA 2015 – DIN 4.



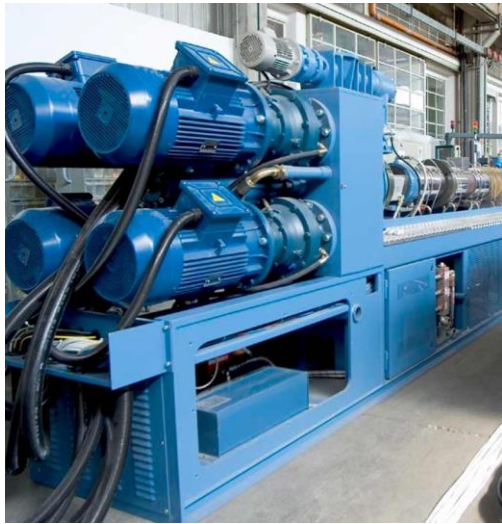
Alberi di comando in uscita (Zambello Riduttori S.r.l.)

Motorizzazioni

La motorizzazione in un estrusore bivate è solitamente a comando diretto cioè il motore elettrico è accoppiato direttamente all'albero del riduttore mediante un giunto elastico di sicurezza. Questa è la tipica applicazione mentre per gli estrusori monovite viene usata in egual modo la motorizzazione mediante pulegge e cinghie e quella diretta.

Vi è un costruttore che si distingue per i suoi estrusori bivate, è la Bausano S.p.A. di Rivarolo (TO) che ha studiato una motorizzazione specifica a 4 motori elettrici per i propri estrusori bivate multi drive MD.

I motori elettrici agiscono a coppie su ogni singola vite e questo, secondo il costruttore, ottimizza la suddivisione e l'erogazione della coppia nelle viti di estrusione.



Motorizzazione MULTIDRIVE 4x2 per estrusori bivate (Bausano S.p.A.)

Questa soluzione risulta comunque più costosa e tecnicamente più complessa rispetto ad un classico estrusore bivate equipaggiato con un singolo motore.

Le potenze installate sugli estrusori bivate variano dagli 0,55 kW degli estrusori da laboratorio più piccoli, ai 200kW ed oltre degli estrusori più grandi.

La richiesta del mercato di estrusori sempre più grandi con produzioni più elevate, ha innalzato progressivamente la potenza dei motori elettrici, i quali sono diventati progressivamente sempre più grandi.

Questo aumento di potenza e di dimensioni ha di conseguenza creato l'esigenza di raffreddare i motori con più efficienza in quanto anche il calore generato dal motore è notevolmente aumentato. I motori servo ventilati hanno incrementato anche le dimensioni della ventola di raffreddamento e, a loro volta, una ventola di raffreddamento più grande produce anche un rumore più elevato nell'ambiente.

Per cercare di limitare l'impatto acustico nell'ambiente mantenendo una elevata efficienza di raffreddamento, si è assistito in questi ultimi anni all'uso sempre più frequente di motori elettrici raffreddati ad acqua anziché con la ventilazione forzata ad aria. I vantaggi ottenuti sono una maggiore capacità di dissipazione termica ed una assai minore rumorosità di funzionamento.

Il motore raffreddato ad acqua richiede comunque l'accortezza che il circuito di raffreddamento sia sempre funzionante e che l'acqua in uscita sia o recuperata in circuito chiuso e raffreddata da una unità frigorifera (chiller) prima di essere immessa nuovamente nel motore oppure, se si opta con lo scarico dell'acqua usata in fognatura, un consumo continuo di acqua dalla rete idrica con un conseguente incremento dei costi di esercizio dell'impianto.

DATI TECNICI: (400 Volt - 50 Hz)						
DONNEES TECHNIQUES: (400 Volt - 50 Hz)						
TECHNICAL SPECIFICATIONS: (400 Volts - 50 Hz)						
Tipo, Type	Potenza (kW)	rpm	η %	$\cos \varphi$	In (A)	Mn (Nm)
4 POLES						
WM 180L4	30	1460	91,5	0.83	58	196
WM 200L4	37	1470	92,9	0.84	68	240
WM 225M4	55	1465	93	0.85	100	359
WM 250M4	75	1470	90	0.80	158	487
WM 280S4	90	1475	93	0.87	134	583
WM 315S4	132	1480	94	0.86	234	852
WM 315M4	160	1480	94	0.86	286	1032
WM 315LR4	200	1480	95	0,91	335	1290
WM 315L4	250	1480	95	0,91	420	1590
6 POLES						
WM 180L6	20	960	89.3	0.88	37	199
WM 200L6	26	955	89.5	0.90	47	260
WM 225M6	37	970	91.3	0.86	68	364
WM 250M6	45	975	90.5	0.84	85	441
WM 280S6	55	980	90	0.87	101	536
WM 280M6	75	980	90	0.84	143	716
WM 315S6	90	985	92	0.85	166	873
WM 315M6	110	985	92	0.86	201	1066

Tabella dati tecnici per motori elettrici trifase raffreddati ad acqua (FIMET S.p.A.)

Bocchetta di alimentazione

L'alimentazione di un estrusore è la parte fondamentale per il buon inizio del processo di estrusione. Diversamente da un estrusore monovite dove la "finestra" sul cilindro estrusore può essere di tipologie diverse, nell'estrusore bivate è sostanzialmente "in asse" con il cilindro di estrusione.



Dettaglio finestra alimentazione bocchetta

A causa della elevata produzione che è in grado di dare l'estrusore bivate, è necessario equipaggiare la bocchetta di alimentazione con una alimentazione forzata, detto anche **forzatore**. Questa necessità è ulteriormente sentita in quanto le viti di estrusione devono girare sempre "piene" del polimero perché altrimenti girando "a secco" si usurano molto rapidamente ed il ripristino della coppia di viti è molto onerosa.

La bocchetta di alimentazione ha anche un'altra fondamentale funzione nel processo, essa infatti raffredda il polimero ad una temperatura bassa e uniforme in modo da rendere altrettanto uniforme il successivo aumento di temperatura prodotto dal riscaldamento del cilindro.

Per questo la bocchetta è provvista di un circuito dell'acqua che può essere alimentata direttamente dalla rete di acquedotto nei paesi freddi e negli altri, da un circuito chiuso collegato ad una unità frigorifera (chiller) di raffreddamento.

Alimentazione forzata primaria

L'alimentazione forzata (principale) è una coclea motorizzata che preleva i granuli (o la polvere) di polimero dalla tramoggia di carico e li spinge obbligandoli ad entrare nella bocchetta di alimentazione.

Il metodo corretto di alimentazione del polimero per un estrusore bivite dipende dal design dell'estrusore bivite, dal materiale alimentato e dalla posizione di alimentazione. Negli estrusori bivite controrotanti e corotanti paralleli, polimero e additivi di alimentazione vengono alimentati “a bocca affamata” nella sezione di alimentazione dell'estrusore.



Forzatore per l'alimentazione di un estrusore bivite

L'alimentazione forzata deposita la formulazione direttamente sulla vite dell'estrusore con la velocità della vite impostata per elaborare la formulazione ad una velocità superiore rispetto a quella che si deposita sulla vite. Non vi è accumulo di materiale nella sezione di alimentazione dell'estrusore e la velocità di produzione è determinata dai flussi di alimentazione totali e non dalla velocità della vite dell'estrusore. Additivi, altre resine, rinforzi, ecc. possono essere aggiunti dopo la fusione del polimero nell'estrusore in diverse posizioni a valle della bocchetta mediante alimentazione per gravità o con un estrusore per alimentazione laterale (forzatore laterale detto “side stuffer”).

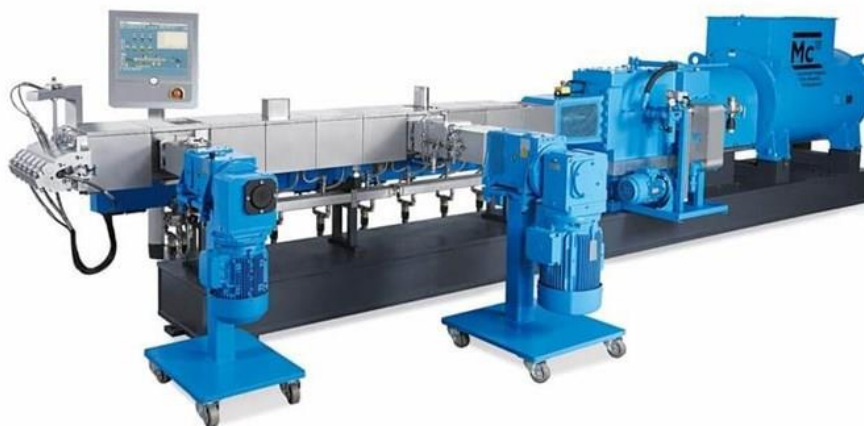
Gli additivi liquidi vengono introdotti a valle della bocchetta di alimentazione mediante una pompa di alimentazione ed un sistema di iniezione del liquido. Ogni componente viene misurato nel rapporto corretto rispetto alla velocità di estrusione totale. Il vantaggio dell'alimentazione “a bocca affamata” è che tutti gli ingredienti della formulazione vengono alimentati nel giusto rapporto direttamente sull'estrusore. I problemi di alimentazione dovuti a “ponti” od a “scivolamenti” nella tramoggia di alimentazione dell'estrusore vengono generalmente eliminati.

Il forzatore di alimentazione viene normalmente installato direttamente sopra l'apertura di alimentazione o su un telaio sopra l'apertura di alimentazione per depositare materiali direttamente sulla vite.

Anche gli estrusori bivate controrotanti conici sono normalmente alimentati “a bocca affamata”, analogamente agli estrusori bivate a viti parallele.

Alimentazione forzata laterale (Side stuffer)

Gli additivi, i rinforzi, i riempitivi, ecc. possono essere alimentati a valle nel fuso polimerico usando un riempimento o un estrusore ad alimentazione laterale. La velocità dell'estrusore di alimentazione laterale viene normalmente regolata in modalità di alimentazione “a bocca affamata” per il controllo della velocità additiva. Gli alimentatori laterali sono estrusori a vite singola o doppia con viti senza rapporto di compressione, che convogliano gli ingredienti nel flusso di fusione.



Estrusore bivate con 2 forzatori laterali (Coperion GmbH)

Il materiale trasportato dagli estrusori di alimentazione laterale fornisce una velocità addizionale a valle più elevata rispetto, per esempio, all'alimentazione per gravità di una tramoggia posta a valle. Pertanto, quando si aggiungono delle velocità di avanzamento secondarie elevate a valle dell'alimentazione principale, è necessario che il design delle viti di estrusione sia adeguato a gestire le velocità elevate e raggiungere gli obiettivi di estrusione della fusione e della miscelazione.

Cilindro di estrusione componibile

La sede per la coppia di viti ha una forma caratteristica ad “8 disteso”, pertanto, non è possibile eseguire una accurata foratura profonda del cilindro così come avviene per gli estrusori monovite. È necessario realizzare il cilindro in parti modulari e componibili per poter lavorare ogni singola parte più agevolmente mediante centri di lavoro.



Dettaglio della foratura ad 8 disteso del cilindro per estrusore bivite

Il cilindro di estrusione componibile viene costruito in vari acciai speciali, quali:

- acciaio LK3
- acciai bimetallici
- acciaio 17NiCrMoS6-4

• **LK3** (41CrAlMo7-10) è un acciaio comunemente usato per la realizzazione di cilindri di estrusione monovite e bivite e cilindri di presse a iniezione, viene eseguito un trattamento di nitrurazione profonda di 0,5 – 0,7 mm dopo le lavorazioni meccaniche.

La composizione dell'acciaio è: carbonio 0,4 – cromo 1,8 – alluminio 1 – molibdeno 0,25. Dopo il trattamento di nitrurazione della superficie interna (quella a contatto con le viti di estrusione) raggiunge una durezza superficiale di circa 1100 HV (Vikers).

• Gli **acciai bimetallici** costituiscono la seconda grande possibilità di scelta nella realizzazione dei cilindri di estrusione. Sono costruiti da un acciaio di base per la parte esterna del cilindro e da una lega speciale resistente all'usura nella parte interna a contatto con le viti di plastificazione. Sono ottenuti tramite dei forni di centrifugazione, dove le leghe bimetalliche in polveri vengono distribuite con efficacia ed in modo omogeneo e quindi prive di distorsioni e porosità, raggiungendo una rugosità tra gli 0,15 μm (min) e gli 0,8 μm (max) e con uno spessore di 5/6 mm.

Si predilige per la parte esterna un acciaio da bonifica con un limite di snervamento (calcolato a 300 °C) compreso tra i 250 N/mm² ed i 370 N/mm², mentre per la parte interna si usano acciai con base Fe-Cr e una lega dei componenti al Ni, Mo, Cu, C, B, con una durezza HRC tra i 64 e i 69.

• L'acciaio 17NiCrMoS6-4 (UNI EN10084) è la nuova designazione dell'acciaio 18NiCrMo5 (UNI 7846). È un acciaio da cementazione comunemente utilizzato per le eccellenti caratteristiche che lo rendono idoneo per molte lavorazioni meccaniche e per la capacità di raggiungere una temprabilità media e alta dopo le lavorazioni.

Dopo la cementazione e tempra, lo strato superficiale raggiunge una durezza elevata. Viene utilizzato per le parti meccaniche sottoposte ad una elevata usura.



Cilindro bivate componibile con le sue viti di estrusione. (Euroviti S.r.l.)

Cilindro di estrusione in due metà

Negli estrusori di piccola taglia quali quelli per linee pilota o da laboratorio, si preferisce utilizzare cilindri di estrusione in due metà, apribile mediante delle cerniere laterali. Questo semplifica le lavorazioni meccaniche necessarie e riduce i tempi di montaggio e di pulizia della macchina.

Dall'immagine seguente si vedono chiaramente le tubazioni per la termoregolazione.



Cilindro per estrusore bivate in due metà aperto. (AMUT S.p.A.)

Gli acciai utilizzati per la costruzione sono solitamente i tipi precedentemente indicati, molto meno utilizzati sono i tipi in acciaio bimetallico in quanto si prediligono gli acciai da nitrurazione, vi è la difficoltà di realizzazione dell'apporto della lega bimetallica nella parte a contatto con le viti in quanto i forni di centrifugazione necessari al trattamento devono avere delle dimensioni idonee per inserire la barra di acciaio.



Cilindro per estrusore bivate conico da laboratorio. (Zamak Mercator Sp. z o.o.)

Questa tipologia di cilindro di estrusione permette una facile estrazione delle viti per la pulizia o la sostituzione, in quanto la metà superiore è incernierata e ne permette un'agevole apertura.

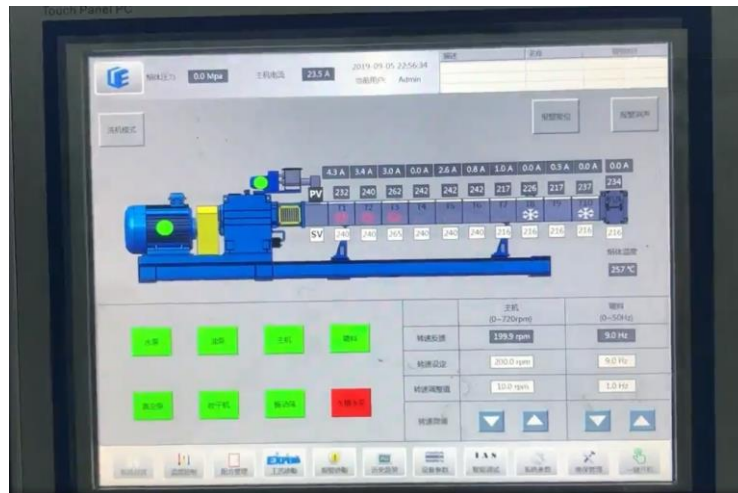
Termoregolazione del cilindro e delle viti di estrusione

Ogni cilindro di estrusione viene suddiviso in varie zone di termoregolazione in numero dipendente dalla lunghezza del cilindro, eccetto che nella zona uno (1) che è la bocchetta di alimentazione, ha almeno un riscaldatore se non due, controllati da una sonda a termocoppia.

Il segnale della termocoppia comunica al controller la temperatura, il quale accende o spegne le resistenze. Il sistema di termoregolazione viene realizzato sul cilindro di estrusione tenendo conto delle seguenti esigenze:

- riscaldamento del cilindro realizzato con un sistema a bassa inerzia termica per un accurato controllo della temperatura ed una rapidità di intervento;
- sistema di raffreddamento del cilindro realizzato con ventilatori ad alta portata ed integrato da dissipatori termici ad elevata efficienza di scambio termico, negli estrusori più grandi, viene realizzato mediante un circuito di olio diatermico integrato nel cilindro;
- fasce riscaldanti disposte in posizione angolare per permettere di uniformare la temperatura ed evitare deformazioni termiche del cilindro;
- algoritmi P.I.D. per il controllo della temperatura impostata.

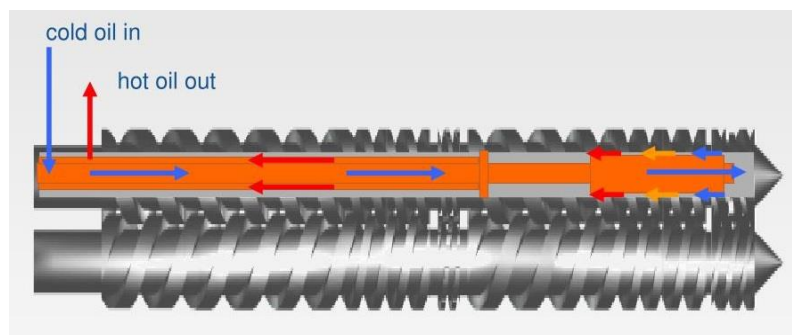
Il pannello di controllo dell'estrusore ha, nei modelli recenti, un'interfaccia con indicate le temperature delle zone e dei set point modificabili tramite touch-screen.



Pannello di controllo touch-screen per estrusore bivite.

Alcuni polimeri richiedono, per il miglior controllo del processo di estrusione, di avere anche le viti termoregolate. Diversamente dagli estrusori monovite dove la termoregolazione della vite è molto frequente e semplice da applicare tramite una vite di estrusione cava, una lancia ed un giunto rotante a due vie montato posteriormente al riduttore, negli estrusori bivate la termoregolazione è una questione molto più complessa in quanto le viti di estrusione non “entrano” con il codolo nell’albero cavo del riduttore come in un estrusore monovite, ma sono collegate agli alberi lenti sporgenti del riduttore tramite dei giunti rigidi.

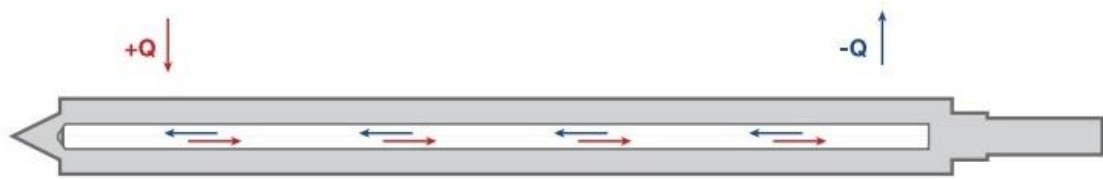
L’applicazione richiede delle viti monoblocco, in quanto le viti composte a settori su alberi brocciati non consentono questa particolare lavorazione. Per ottenere la termoregolazione delle viti, si opta per dei canali di entrata e uscita separati in canali posti sui codoli e che vengono intercettati dai giunti di collegamento che hanno camere separate per l’ingresso e per l’uscita del fluido di termoregolazione (olio diatermico).



Termoregolazione viti a canali separati

Alcuni costruttori hanno ideato una particolare termoregolazione della vite, detta a camere chiuse; dove all’interno delle viti viene inserito un fluido di termoregolazione con una elevata capacità di scambio termico, grazie alla quale è possibile veicolare l’energia termica.

Il sistema a camere chiuse, è una tecnologia per la termoregolazione delle viti di estrusione a circuito chiuso. Durante il funzionamento dell'estrusore, il sistema a camere chiuse permette di trasferire il calore dalle zone più calde (quelle più vicine alla testa di estrusione) a quelle più fredde (quelle prossime alla zona di alimentazione).



Termoregolazione viti a camera chiusa

Il sistema a camere chiuse consente il riequilibrio termico ed evita l'aumento di temperatura in quelle zone dove c'è un maggiore sviluppo di calore per poi trasferirlo nelle zone in cui ce n'è di meno, perché raffreddate dal materiale in transito. Il sistema a camere chiuse è un sistema di termoregolazione della vite esente da manutenzione e consente un considerevole risparmio energetico. Il costo di realizzazione delle viti però viene aumentato considerevolmente.

Dispositivo di degasaggio

Il processo di estrusione di un polimero può generare, a causa dell'umidità presente nei granuli, del vapore d'acqua. Alcuni polimeri, durante la fase di fusione dei granuli, rilasciano anche dei gas (es. il cloro nel caso del PVC) o dei monomeri che sono altamente tossici.

Questi vapori e gas, se lasciati all'interno del polimero fuso, avanzerebbero fino all'uscita sulla testa di estrusione, producendo delle deformazioni e dei difetti del prodotto finale non rendendolo accettabile in termini di qualità e di funzionalità; pertanto, devono essere eliminati, migliorando sensibilmente le proprietà fisiche e strutturali del prodotto.



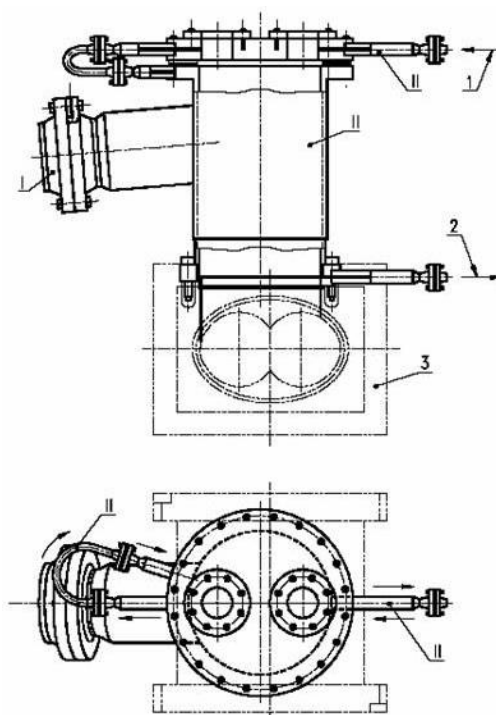
Estrusore bivate con degasaggio (Coperion GmbH).

Il dispositivo di degasaggio viene realizzato installando sul cilindro di estrusione uno più caminetti di estrazione, i quali sono solitamente collegati ad una pompa per il vuoto che facilita l'estrazione e non disperde i gas tossici nell'atmosfera.

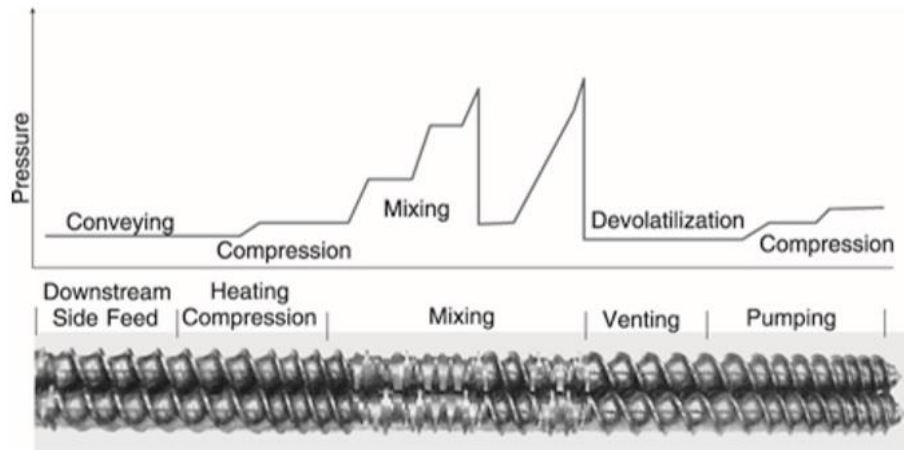
La pompa del vuoto invia i gas estratti dal cilindro di estrusione verso un serbatoio di condensazione, alla cui base viene a raccogliersi la condensa prodotta dei gas caldi, sulla sommità del serbatoio, una condotta invia i gas verso il sistema di filtraggio e depurazione, solitamente installato dal cliente in base alle normative locali vigenti.

La soluzione dell'installazione dei caminetti di degasaggio (che possono essere in numero fino a tre o quattro sul medesimo cilindro di estrusione) viene preferita dai trasformatori che non vogliono essiccare il granulo prima di inserirlo nella tramoggia di alimentazione e da coloro che utilizzano dei polimeri che producono gas e monomero durante il processo di fusione del polimero.

Per permettere l'espansione dei gas presenti nel fuso, le viti di estrusione hanno un profilo caratteristico, che prevede il diametro del nocciolo crescente fino alla zona del degasaggio per poi ridursi bruscamente (facilitando l'espansione e l'estrazione dei gas) per poi riprendere ad aumentare il diametro del nocciolo e di conseguenza ad aumentare la compressione.



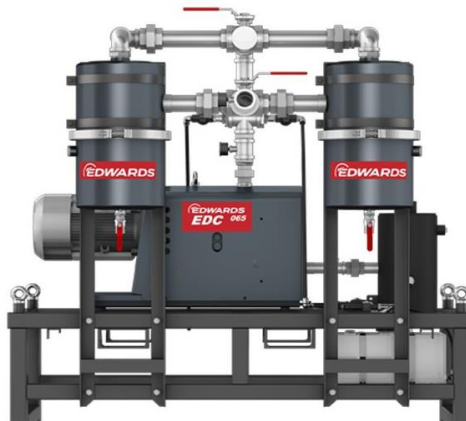
Caminetto di degasaggio per estrusore bivite.



Zone di pressione e profili vite con degasaggio (venting) per estrusore bivate.

Come si può vedere dalla figura qui sopra, la zona del cilindro di estrusione dove installare il degasaggio è, nei modelli semplificati, subito dopo la prima zona di miscelazione ovvero nella seconda metà della lunghezza del cilindro di estrusione.

La curva di pressione indica chiaramente che, prima del degasaggio, le componenti volatili del polimero fuso partecipano all'aumento di pressione nel cilindro, mentre subito dopo aver estratto i gas dal melt mediante il degasaggio, la pressione è notevolmente diminuita pur ricominciando ad aumentare a causa dell'effetto di pompaggio delle viti nella parte terminale.



Pompa per vuoto per il degasaggio (Edwards)

Essiccazione del granulo

Alcuni polimeri richiedono l'essiccazione prima dell'estrusione per prevenire la degradazione dei polimeri. Le resine, come ad esempio il nylon, il poliestere (polietilene tereftalato [PET]epolibutilene tereftalato [PBT]) ed il policarbonato, sono molto igroscopiche, ed assorbono molto rapidamente l'umidità dall'aria. Alle temperature di estrusione, l'umidità contenuta, degrada il polimero con un conseguente peggioramento delle proprietà finali del prodotto. Una corretta asciugatura per eliminare l'umidità è fondamentale per ottenere un prodotto finale di qualità elevata.

Anche altri materiali, come ad esempio gli acrilici, Ultem®, polisulfone, Noryl® e acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), assorbono l'umidità anche dall'aria e devono sempre essere asciugati prima della lavorazione. L'umidità nel polimero viene convertita in vapore nell'estrusore e, a seconda della quantità presente, può causare imperfezioni superficiali come rigonfiamenti, buchi nel prodotto o un prodotto schiumoso. Alcuni polimeri, ad esempio il nylon, vengono spediti asciutti in contenitori a prova di umidità. Con una corretta manipolazione, queste resine normalmente non richiedono una ulteriore asciugatura prima della lavorazione.

Tuttavia, se il contenitore viene rotto o se non viene completamente risigillato dopo l'apertura, il prodotto assorbirà l'umidità e dovrà essere asciugato prima dell'estrusione. I poliesteri sono particolarmente sensibili all'umidità e devono essere asciugati in essiccatori deumidificanti, trasportati con aria secca e ricoperti di aria secca o azoto nella tramoggia di alimentazione dell'estrusore. Gli essiccatori deumidificanti con punti di rugiada di -40°C sono consigliati per l'essiccazione della maggior parte dei polimeri.

Le formulazioni che richiedono, sia una resina polimerica secca che una miscelazione con altri ingredienti, possono richiedere particolari accorgimenti per la manipolazione. Una volta asciugata, una resina sensibile all'umidità, assorbe l'umidità quando viene esposta all'atmosfera. Gli additivi o altri componenti che vengono aggiunti alle formulazioni contenenti resine igroscopiche, devono essere sempre privi di umidità.

Se gli additivi non possono essere essiccati con la resina, sono necessarie speciali procedure di manipolazione o l'uso di singoli alimentatori per miscelare le resine secche e gli altri additivi o componenti, nella gola di alimentazione dell'estrusore. In alcuni casi, le resine contenenti umidità possono essere lavorate in un estrusore con un degasaggio sottovuoto, rimuovendo l'umidità nella sezione di degasaggio. Questo sistema però non funziona con tutte le resine perché può verificarsi un certo degrado del polimero prima che l'umidità venga rimossa.

Un ulteriore aspetto negativo di questo approccio è che l'estrusore viene effettivamente accorciato di circa un terzo della sua lunghezza, il che può limitare la capacità di produzione dell'estrusore. Oltretutto è necessario evitare un'eccessiva essiccazione per prevenire il degrado della resina con una conseguente perdita di proprietà ed uno sviluppo di corpi coloranti. Ad esempio, il Nylon 6,6 se essiccato eccessivamente, diventa giallo ed è accompagnato da una perdita di alcune proprietà.

Alcuni materiali termoplastici necessitano, oltre all'eliminazione dell'umidità contenuta, anche di un preriscaldamento prima di giungere alle viti di plastificazione dell'estrusore. L'essiccazione del granulo non igroscopico ed il preriscaldamento è spesso un'azione indispensabile per una lavorazione di qualità e di risparmio energetico.



Essiccatore monofase per granuli plastici (MSM S.r.l.)

Controllo della pressione del melt nel cilindro di estrusione

I granuli di polimero che vengono fusi in un estrusore (che sia monovite o bivate) per effetto del profilo delle viti e dell'azione di pompaggio delle stesse, la pressione all'interno del cilindro aumenta fino a dei valori che possono giungere ai 500 bar alla flangia di uscita. Le misurazioni della pressione del melt sulla testa dell'estrusore sono fondamentali quanto la temperatura di fusione. Per riprodurre lo stesso prodotto da una produzione all'altra, la temperatura di fusione deve essere la stessa per garantire che la viscosità della fusione e di conseguenza il rendimento, sia costante.

Allo stesso modo, la pressione costante produce una dimensione trasversale uniforme da una produzione all'altra, supponendo che la viscosità del fuso sia la stessa. Quando la pressione nella testa aumenta a causa di una velocità di estrusione instabile, la massa in uscita aumenta e l'area della sezione trasversale del prodotto diventa più grande. La seconda funzione del manometro è quella di fungere da dispositivo di sicurezza per prevenire un'eccessiva pressione della testa che può far saltare la testa dalla macchina o causare altri problemi all'attrezzatura. Normalmente il manometro è dotato di un allarme di alta pressione, che spegne l'estrusore nel caso in cui venga superata una pressione preimpostata. L'equazione mostra l'effetto della variazione di pressione sull'uscita volumetrica.

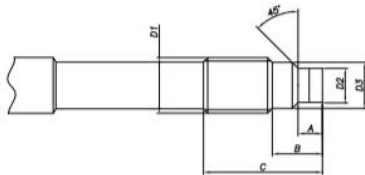
$$\Delta Q(\%) = \frac{\Delta P(\%)}{n}$$

dove ΔQ = variazione dell'uscita volumetrica espressa in percentuale

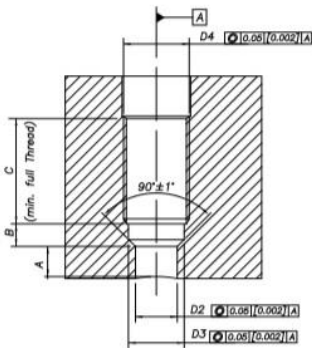
ΔP = variazione della pressione in percentuale

n = indice della legge di potenza del polimero in fase di elaborazione

Supponiamo che il polimero da processare sia polipropilene con un indice della legge di potenza di 0,35 ($n = 0,35$) e che la pressione della testa vari da 59 a 62 bar per un ΔP di 3 bar. Il ΔP in percentuale è $(3/59) \times 100 = 5,08\%$. $\Delta Q = 5,08 / 0,35$ o 14,5%. Supponendo che il processo stia funzionando a 90 kg/ora, la variazione della produzione è di 13 kg/ora, il che ha un impatto molto significativo sulla dimensione finale del prodotto.



D1	1/2-20UNF	M10x1.0	M14x1.5	M18x1.5
D2	.307/.305" [7.80/7.75mm]	.236/.234" [5.99/5.94mm]	.307/.305" [7.80/7.75mm]	.394/.392" [10.01/9.96mm]
D3	.414/.412" [10.52/10.46mm]	.336/.334" [8.53/8.48mm]	.475/.470" [12.07/11.94mm]	.630/.627" [16.00/15.92mm]
A	.219/.209" [5.56/5.31mm]	.256/.246" [6.50/6.25mm]	.236/.226" [5.99/5.74mm]	.236/.226" [5.99/5.74mm]
B	.450" [11.43mm]	.430" [10.92mm]	.480" [12.19mm]	.590" [14.98mm]
C	1.07" [27.2mm]	1.06" [26.9mm]	1.28" [32.5mm]	1.34" [34.0mm]



D1	1/2-20UNF	M10x1.0	M14x1.5	M18x1.5
D2	.313 ±0.001" [7.95 ±0.02mm]	.241 ±0.001" [6.12 ±0.02mm]	.319 ±0.001" [8.10 ±0.02mm]	.398 ±0.001" [10.10 ±0.02mm]
D3	.454 ±0.004" [11.53 ±0.1mm]	.344 ±0.004" [8.74 ±0.1mm]	.478 ±0.004" [12.14 ±0.1mm]	.634 ±0.004" [16.10 ±0.1mm]
D4	.515" [13mm] min.	.515" [13mm] min.	.630" [16mm] min.	.790" [20mm] min.
A	.225" [5.72mm] min.	.263" [6.68mm] min.	.240" [6.10mm] min.	.240" [6.10mm] min.
B	.17" [4.3mm] max.	.11" [2.8mm] max.	.16" [4.0mm] max.	.16" [4.0mm] max.
C	.75" [19mm]	.75" [19mm]	.75" [19mm]	.99" [25mm]

Dimensioni punta del sensore e foro di installazione (Gefran S.p.A.)

Una caratteristica fondamentale è di poter leggere la pressione del fluido fino a temperature di 538°C. La costruzione si basa sul principio della trasmissione idraulica della pressione e la tecnologia estensimetrica permette di tradurre il valore di una grandezza fisica in un segnale elettrico. La sollecitazione meccanica che trasferisce la pressione avviene tramite un liquido di trasmissione incompressibile (NaK – Sodio/Potassio).

Il sistema a trasmissione idraulica del segnale di pressione per garantire stabilità in temperatura (NaK) Liquido è conforme alla direttiva RoHS. Il Sodio/Potassio è definito come una sostanza sicura (GRAS) della FDA.

- Performance Level 'C'
- Gamme di pressione da: 0-35 a 0-1000 bar / 0-500 a 0-15000 psi
- Accuratezza: < ±0.25% FS (H); < ±0.5% FS (M)

La performance di sicurezza "Level C" dei trasduttori di pressione installati sugli estrusori, è obbligatoria in base alla norma UNI EN 1114-1:2011 e consiste in una sicurezza intrinseca del sensore di pressione. Il collegamento elettrico è realizzato in modo tale che se il sensore si rompe, invia comunque un segnale di allarme al PLC della linea arrestando l'impianto in sicurezza.



Trasduttore di pressione "Level C" (Gefran S.p.A.)

Controllo della temperatura nelle zone del cilindro di estrusione

Ogni zona del cilindro di estrusione, eccetto che nella zona 1, ha almeno uno o due riscaldatori controllati da una termocoppia. Il segnale della termocoppia comunica con il controller, accendendo o spegnendo il riscaldatore. Affinché il controller e i riscaldatori funzionino correttamente, anche la termocoppia deve funzionare correttamente.

Una termocoppia difettosa con una giunzione chiusa ad una temperatura fredda, indicherà che la temperatura è bassa e facendo in modo che il riscaldatore rimanga acceso, causando un riscaldamento eccessivo. Un circuito di termocoppia aperto viene solitamente rilevato dal controller come avente una temperatura elevata e i riscaldatori rimarranno spenti e la zona controllata si raffredda. Se una termocoppia non risponde correttamente, deve essere sostituita.

Le termocoppie devono essere collegate al termoregolatore corretto; altrimenti la termocoppia controlla i riscaldatori sbagliati, è un errore molto frequente.

Ad esempio, se la termocoppia della zona 2 è collegata al controller della zona 3 mentre la termocoppia della zona 3 è collegata al controller della zona 2 e la temperatura di setpoint per la zona 2 è 216 °C e la zona 3 è 232 °C, la temperatura effettiva dell'estrusore nella zona 2 e nella zona 3 sarà una relazione complessa che coinvolge il carico termico, il ritardo termico e i parametri di regolazione del controller.

Inutile dire che questa è una condizione da evitarsi. Le sonde di temperatura del cilindro di estrusione sono "fissate" con una molla, per garantire un buon contatto con la parete del cilindro e sono isolate per ridurre al minimo la perdita di calore lungo lo stelo della termocoppia. Le sonde a "temperatura di fusione" funzionano secondo gli stessi principi delle termocoppie a "temperatura di zona", tranne per il fatto che le termocoppie "a temperatura di fusione", devono sporgere nel flusso di fusione per ottenere una temperatura di fusione accurata (raramente usate negli estrusori).

Ogni zona del riscaldatore dovrebbe avere una lettura del contatore, sia sul pannello di controllo che su un'opzione disponibile nel sistema di controllo computerizzato basato su menù. Tutti i riscaldatori funzionano correttamente, in una qualunque zona, quando i riscaldatori sono accesi al valore fisso del 100%.

Supponendo che una zona abbia più di un riscaldatore e che la lettura dell'amperometro sia inferiore al normale, significa che almeno un riscaldatore è bruciato o non funziona correttamente.

I riscaldatori non funzionanti devono essere sostituiti il più presto possibile per evitare punti caldi o freddi lungo il cilindro dell'estrusore, con un conseguente riscaldamento non uniforme del polimero. Le letture dell'amperometro devono essere controllate giornalmente per verificare che tutti i riscaldatori funzionino correttamente. Se la temperatura effettiva della zona differisce dal setpoint, l'estrusore sta dicendo che qualcosa è fuori controllo.

Sono possibili molti scenari che causano la variazione della temperatura effettiva rispetto a quella impostata, ad esempio:

- La temperatura non controlla quella particolare zona.
- La termocoppia non funziona correttamente e potrebbe essere necessario sostituirla.
- L'impostazione della temperatura per il materiale in lavorazione non è corretta.
- Il calore prodotto dal "taglio" in eccesso viene generato in quella zona.
- Il raffreddamento dell'estrusore non funziona correttamente.
- Il cavo della termocoppia al controller non è collegato al controller e/o alla zona corretta.
- Il profilo (design) della vite non è corretto.



Termocoppia sonda di temperatura J con attacco a baionetta

Segue una tabella con le principali temperature di estrusione per vari materiali; esse sono solo indicative in quanto possono esserci delle variazioni in base al produttore ed alla formulazione, ma anche in base all'estrusore le cui caratteristiche operative ed il design delle viti, influenzano il processo e possono variare da costruttore a costruttore.

Material	Feed Zone, °F (°C)	Transition Zone, °F (°C)	Metering Zone, °F (°C)	Die Zone, °F (°C)
ABS	400° (204°)	425° (219°)	440° (227°)	460° (238°)
Nylon 6	420° (216°)	460° (238°)	480° (249°)	500° (260°)
Nylon 6,6	530° (277°)	535° (280°)	545° (285°)	540° (282°)
LDPE	340° (171°)	355° (180°)	365° (185°)	375° (191°)
LLDPE	300° (149°)	325° (163°)	364° (185°)	410° (210°)
HDPE	340° (171°)	380° (193°)	400° (204°)	400° (204°)
PP	375° (190°)	410° (210°)	430° (221°)	430° (221°)
Polystyrene	350° (177°)	400° (204°)	440° (227°)	450° (232°)
HIPS	375° (191°)	420° (216°)	450° (232°)	450° (232°)
PMMA	360° (182°)	400° (204°)	430° (221°)	445° (230°)
Flexible PVC	265° (130°)	340° (171°)	355° (181°)	365° (181°)
Rigid PVC	300° (149°)	320° (160°)	340° (171°)	365° (181°)
PC	510° (266°)	530° (277°)	550° (288°)	560° (293°)
Noryl®	450° (232°)	480° (249°)	510° (266°)	510° (266°)
Ultem®	600° (316°)	640° (338°)	675° (357°)	675° (357°)
PET	520° (270°)	550° (290°)	510° (265°)	510° (265°)
PBT	470° (243°)	490° (121°)	500° (260°)	500° (260°)
Polysulfone	550° (288°)	600° (316°)	650° (343°)	650° (343°)
Acetal	400° (204°)	390° (199°)	400° (204°)	410° (210°)
Thermoplastic Polyurethane	330° (166°)	360° (182°)	380° (193°)	380° (193°)

Iniezione di gas per l'estrusione di espansi

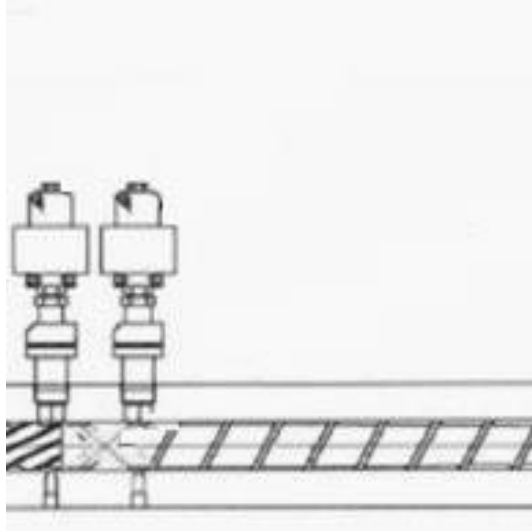
La richiesta di materiali espansi da isolamento o da imballaggio, è cresciuta in modo esponenziale a partire dagli anni 90 del secolo scorso. La richiesta di prodotti atti ad isolare termicamente ed acusticamente gli edifici e di imballaggi e contenitori alimentari si è progressivamente affermata ed ormai si tratta di una tecnologia matura anche se presenta delle varianti specifiche per ogni costruttore. La richiesta e la produzione avvengono nella maggior parte nei paesi del Nord Europa quali Germania, Danimarca, Polonia, Norvegia, Finlandia e Svezia.

I materiali più usati per essere espansi, sono il Polietilene PE che nella versione espansa viene chiamato XPE ed il Polistirene che nella sua versione espansa viene chiamato XPS.

Un primo tipo di impianto per materiali espansi per elevato volumi di produzione, prevede un estrusore bivate dove viene eseguita l'iniezione del gas espandente subito dopo la prima zona di materiale fuso, questo perché il fuso stesso, con l'aumentare della pressione all'interno del cilindro, sigilla la zona retrostante, quella di alimentazione, che presenta ancora i granuli del polimero nello stato solido o semisolido.

In questo tipo estrusore, la miscelazione del polimero fuso con il gas espandente è affidata alle viti di estrusione con il loro disegno specifico. Questo richiede un cilindro di

estrusione realizzato appositamente con i fori per gli iniettori già previsti. L'estrusore bivate viene collegato in tandem ad un estrusore monovite dove avviene l'espansione dei gas all'interno della miscela di polimero ed allo stesso tempo viene controllata ed abbassata la temperatura. Una linea del genere può essere anche lunga oltre 50 metri compresa la rulliera di raffreddamento.



Iniettori per gas espandente sul cilindro di estrusione con valvola di sicurezza

Un secondo tipo di impianto è una versione semplificata del precedente, dove non sono richieste produzioni in grandi quantità e pertanto è possibile economizzare e compattare la linea. In questo caso si opta per un solo estrusore in cui avviene sia l'iniezione del gas che l'espansione dello stesso nel polimero. La scelta dell'estrusore bivate è data dal suo elevato range di funzionamento a parità di capacità di miscelazione (rispetto ad un estrusore monovite).



Vista parziale di un impianto di estrusione per pannelli espansi (FAP S.r.l.)

Un terzo tipo di impianto invece prevede l'applicazione di un modulo di miscelazione collocato dopo la flangia di uscita di un normale estrusore. In questo modulo il polimero fuso viene miscelato con il gas espandente iniettato nel modulo stesso, esso contiene un miscelatore statico.

Gli elementi che compongono il miscelatore statico per estrusione sono costituiti da barre di acciaio sagomate, incastrate e saldate tra loro. Le barre creano canali di flusso che si intersecano l'un l'altro e trasportano la miscela di polimero e di gas, dalle pareti al centro del canale di flusso e viceversa.

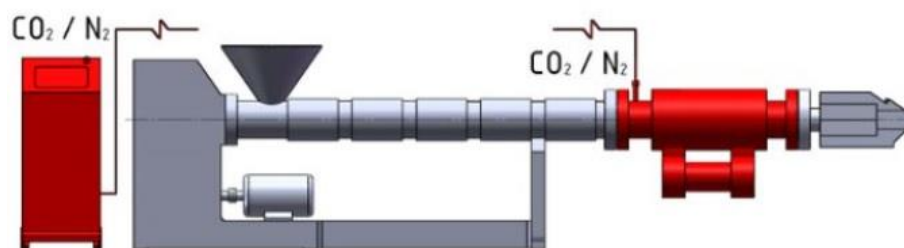


Miscelatore statico (Promix Solutions SG)

Ogni elemento è saldato alla propria virola ed ognuna è saldata alla successiva ma ruotata di 90 gradi fino a costituire il miscelatore completo. Questo tipo di sistema permette la massima tenuta del miscelatore creando una suddivisione del flusso prima bidimensionale e poi tridimensionale.

Questa soluzione presenta vantaggi e svantaggi, il vantaggio è dato dalla relativa facilità di trasformare un normale estrusore preesistente in un estrusore per polimeri espansi, ma questa soluzione presenta lo svantaggio di una limitata capacità di miscelazione del gas con il polimero e di una minore efficienza nella capacità di espansione dei gas, in quanto il modulo ha una lunghezza limitata e tutto il processo viene a concentrarsi in quella zona. Pertanto, esso non è adatto per elevate produzioni.

Inoltre, esso presenta l'ulteriore svantaggio di un ingombro aggiuntivo oltre all'estrusore proprio per le dimensioni del modulo di miscelazione.



Principio di funzionamento del Promix foam extrusion (Promix Solutions SG)

Per tutte le tipologie sono previste delle centraline e delle pompe di dosaggio del gas che devono essere installate in zone protette e sicure a norma ATEX, oltre che essere loro stesse certificate ATEX.



Pompe dosaggio gas espandenti per impianto foam (Lewa GmbH)

L'esperienza consente un grande vantaggio per i produttori di materiale espanso; infatti, con le opportune regolazioni del dosaggio dei gas e del polimero in estrusione, è possibile una riduzione in percentuale che può andare dal 5 al 70% del costo della materia prima (polimero).

Materia Prima: granuli PE/PP/PS

Agente espandente: isobutano/n-butano/propano/CO₂/azoto

1 Kg di PE / PP è normalmente composto da:

90 ÷ 95 % materia prima PE / PP,

5 ÷ 25% additivi (stabilizzanti, talco, coloranti, ecc.),

0.5 ÷ 20 % gas.

CAMPI D'APPLICAZIONE

Introduzione

Gli **estrusori bivate**, grazie alla costruzione modulare, alla flessibilità operativa, all'elevato livello di automazione e controllo, vengono utilizzati per un innumerevole campo di applicazioni.

Sono stati impiegati inizialmente nel sottore della produzione di masterbatch e compounding, grazie alla superiore capacità di non "stressare" il materiale ed alla elevata capacità produttiva ma sono stati via via applicati a tutti gli altri processi di estrusione delle materie plastiche.

Estrusori per masterbatch

I pellet di polimeri sono, nel settore delle materie plastiche, dei piccoli granuli in materiale plastico con una forma variabile da piccoli cilindretti, piccole sfere o dischetti dal diametro da 1 a 5 mm. Sono costituiti da polimero o da una miscela di polimeri e sono utilizzati come materia prima per la realizzazione di prodotti finiti in plastica ottenuti per estrusione o stampaggio.

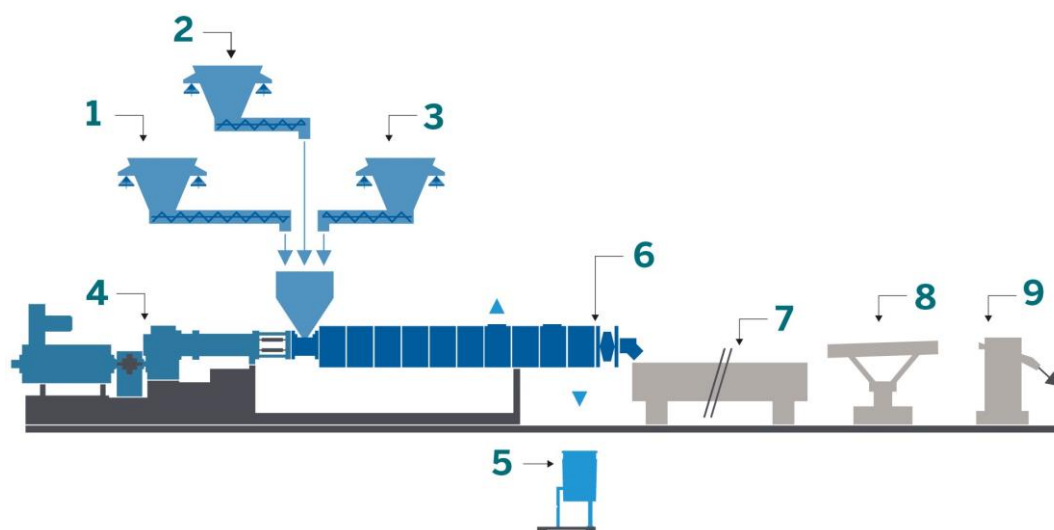
Un pellet particolare è il masterbatch, esso consiste in un pellet con una elevata concentrazione di additivi (ad esempio coloranti), rispetto alla concentrazione degli stessi additivi desiderati, nel prodotto finale.

Il masterbatch viene miscelato ai pellet di polimero vergine durante il processo di estrusione, in modo da rendere più agevole l'aggiunta degli additivi. Generalmente gli additivi devono essere presenti in piccolissime percentuali (anche parti per milioni) nel prodotto finale. Senza l'uso di masterbatch, si dovrebbero aggiungere gli additivi sotto forma di polvere o di liquidi, con una evidente difficoltà di dosaggio. Infatti, è molto più semplice pesare con esattezza alcuni grammi di masterbatch rispetto ad ottenere la stessa precisione di pesatura con alcuni microgrammi di additivi in polvere. Il masterbatch ha anche il vantaggio di essere facilmente miscelabile con i pellet di polimero rispetto a quanto avverrebbe con della polvere di additivi

In questo ambito, sono usati per il 90% degli estrusori bivate, in special modo si usano gli estrusori bivate corotanti.

Gli estrusori hanno una velocità di rotazione delle viti che varia dai 1200 giri/min ai 600 giri/min nelle taglie più piccole e dai 600 giri/min ai 150 giri/min nelle taglie più grandi; la capacità produttiva varia dai 100/150 Kg/ora delle taglie inferiori fino ai 5000/6000 Kg/ora delle taglie maggiori.

La linea completa per produrre masterbatch, si compone anche di altri dispositivi che devono essere collocati a ridosso dell'estrusore per ottenere il prodotto richiesto.



Schema linea di estrusione per masterbatch (Comac S.r.l.)

1. Dosatore
2. Dosatore opzionale
3. Dosatore additivi
4. Estrusore bivate corotante
5. Degasaggio
6. Testa di estrusione
7. Prima vasca di raffreddamento
8. Seconda vasca di raffreddamento
9. Taglierina

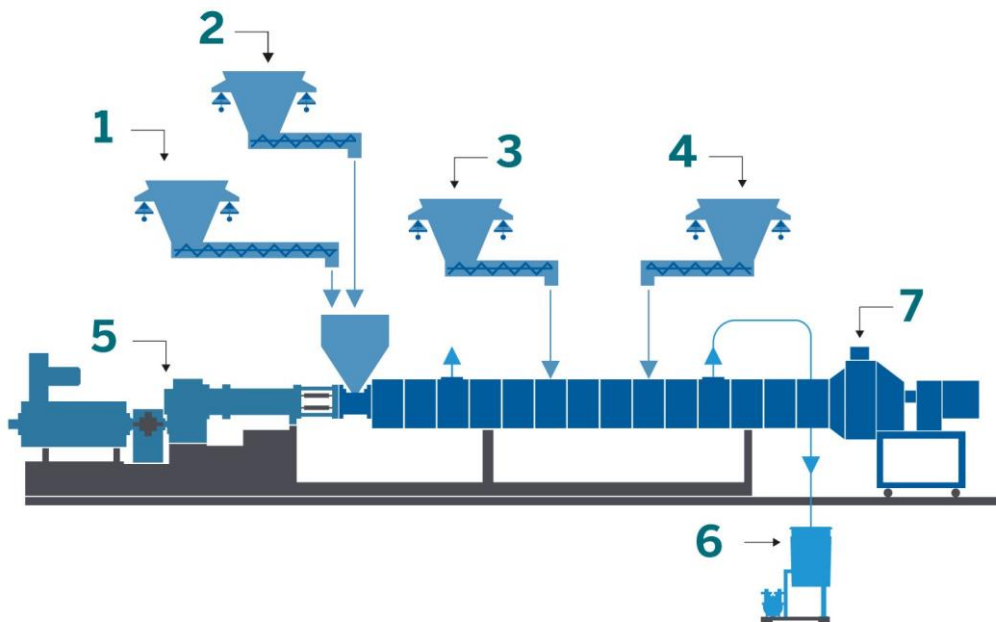
Estrusori per compounding

Il compounding è un processo di estrusione-pellettizzazione che consente la miscelazione di un polimero mediante fusione (resina termoplastica) con uno o più masterbatch al fine di ottenere una plastica sotto forma di composti o masterbatch con le proprie caratteristiche fisiche o termiche, come: antistatico, antiscivolo, anti-UV, antiossidante, ecc.

Questi masterbatch possono essere in forma solida, liquida o in polvere, oppure possono essere presentati sotto forma di pellet, di gomma o di elastomero. I pellet di plastica ottenute con l'estrusione compound possono essere caricate con fibre di carbonio o minerali o rinforzate con perle di vetro o fibra di vetro. Anche in questo ambito, sono usati per il 90% degli estrusori bivate corotanti.

Gli estrusori hanno una velocità di rotazione delle viti che varia dai 1200 giri/min ai 600 giri/min nelle taglie più piccole e dai 600 giri/min ai 150 giri/min nelle taglie più grandi; la capacità produttiva varia dai 200 Kg/ora delle taglie inferiori fino ai 6000 Kg/ora delle taglie maggiori.

Anche la linea completa per compound, si compone di altri dispositivi che devono essere collocati a ridosso dell'estrusore per ottenere il prodotto richiesto.



Schema linea di estrusione per compounding (Comac S.r.l.)

1. Dosatore
2. Dosatore opzionale
3. Forzatore per la carica laterale (Side stuffer)
4. Forzatore per la carica laterale (Side stuffer)
5. Estrusore bivate corotante
6. Degasaggio
7. Taglio in testa

Estrusori per granulazione

Gli estrusori per la granulazione sono stati sviluppati principalmente per il riciclo ed il recupero della plastica “di scarto”. Con questo termine intendiamo quella plastica che viene prodotta dall'impianto di estrusione durante la fase di avviamento e durante la fase di spegnimento.

In questi particolari momenti, prima che inizi il ciclo produttivo della linea, viene prodotto del materiale che non soddisfa i requisiti di peso, spessore e tolleranze del prodotto finale; si tratta del materiale che fuoriesce dalla testa durante il processo di riscaldamento e prima che i parametri si siano stabilizzati, oppure del materiale di fine produzione dove l'impianto in fase di fermata, rallenta fino a fermarsi e la plastica prodotta non ha più le qualità che aveva in produzione a velocità di linea.

Vi sono anche altri scarti e sono quelli, per esempio, dei rifili laterali di un impianto di film, foglia o lastra, tale materiale pur essendo generalmente dello spessore corretto, deve essere “rifilato” cioè eliminato mediante un taglio da eseguire con coltelli laterali

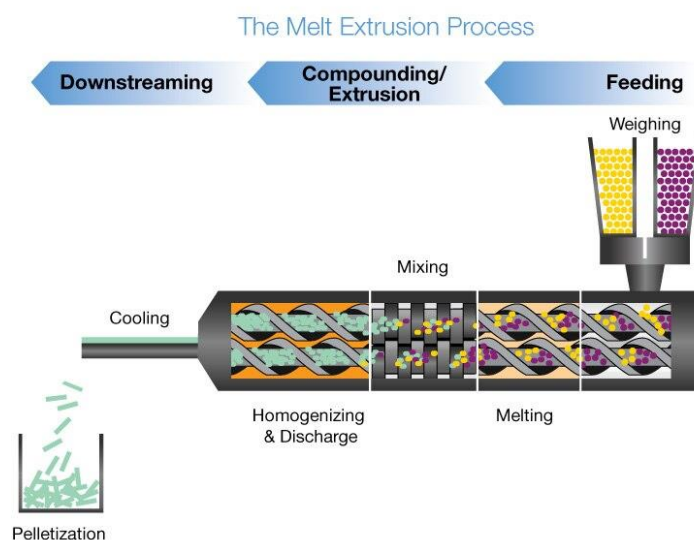
fissi o rotanti motorizzati, per dare al film, foglia o lastra, la giusta larghezza della bobina o lastra.

Questo prodotto di scarto della produzione, essendo solitamente in quantità notevole, dato il costo della materia prima, viene solitamente recuperato tramite un mulino macina scarti che riduce i rifili in un trinciato nuovamente utilizzabile in un estrusore.

Avendo già subito un processo di estrusione, il materiale recuperato ha comunque subito un certo degrado e non può essere estruso allo stato puro ma, a seconda del tipo di materiale, può essere re-immesso in tramoggia in quantità variabili e dipendenti dal prodotto stesso e da quello che si vuole ottenere come prodotto finale (ad esempio alcune bottiglie in PET per acqua minerale sono prodotte con una percentuale di PET riciclato, anche se il PET vergine deve avere comunque una percentuale superiore al 65%). Il materiale riciclato comunque incicia la trasparenza del materiale vergine (diventa giallognolo) quindi viene sempre estruso con una elevata percentuale di colorante; infatti, le bottiglie di plastica colorate per acque minerali, sono ottenute da estruso PET vergine + PET riciclato + masterbatch coloranti (di solito sono di colore verde o blu).

Estrusori per Hot Melt

L'estrusione a caldo Hot Melt (HME) è la lavorazione di materiali polimerici al di sopra della loro temperatura di transizione vetrosa (T_g) al fine di effettuare la miscelazione a livello molecolare di leganti e/o polimeri termoplastici e composti attivi. Utilizzato in diversi settori, l'HME è una combinazione dell'energia di fusione e di quellameccanicaepermette di ottenere direttamente in un'unica apparecchiatura, granulati o pellets senza l'impiego di componenti liquidi che richiedano un processo di essiccamento successivo.



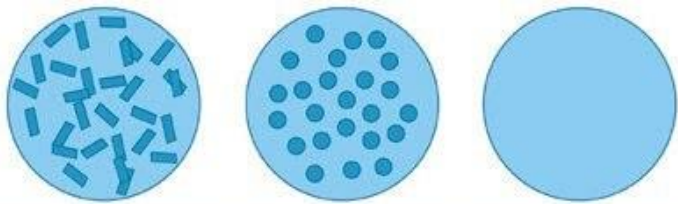
Schema di estrusione per Hot Melt (Thermo Fisher Scientific)

L'estrusione a caldo Hot Melt ha una delle principali applicazioni nella produzione di principi attivi poco solubili e allo stato solido, in polimeri idrofili o dotati di proprietà tensioattive. Questa tecnica si presta anche alla produzione di sistemi a rilascio controllato di sostanze, usando in questo caso dei polimeri con solubilità a pH dipendente.

Il processo viene condotto "a caldo" in maniera tale da rammollire il polimero, per parziale fusione o per il superamento della propria temperatura di transizione vetrosa Tg, la conseguenza di questo riscaldamento è la formazione di una massa di plastica allo stato semifluido nella quale il principio attivo ed eventualmente altri componenti, possono essere facilmente dispersi e disciolti. Le temperature di processo usuali sono comprese tra i 120 ed i 150 °C, in base al polimero utilizzato ed alla presenza di eventuali agenti plasticizzanti che abbassano la temperatura di transizione vetrosa Tg. Queste temperature sono comunque troppo elevate per poter applicare questo processo alla produzione di farmaci di natura peptidica, proteica o di origine biologica.

Nella **produzione farmaceutica**, l'HME viene utilizzato per disperdere le API (Active pharmaceutical elements) in una matrice a livello molecolare, formando così soluzioni solide. Ciò consente sistemi di rilascio di farmaci per farmaci scarsamente solubili o forme di farmaci specializzati come film per cerotti transdermici.

La scelta di un polimero adeguato come matrice per formare soluzioni solide stabili è cruciale in HME. I polimeri con un'alta capacità di solubilizzazione sono particolarmente adatti perché possono dissolvere grandi quantità di farmaci. I polimeri per esperimenti di estrusione a caldo si basano su diversi monomeri e strutture chimiche, come omopolimeri, copolimeri, copolimeri anfifilici, nonché solubilizzanti e plastificanti. La considerazione per ciascun materiale deve tenere conto della solubilità del polimero in un solvente, che può variare da elevata lipofilia a elevata idrofilia. È necessario selezionare un solvente adatto per la preparazione di soluzioni solide mediante l'essiccazione a spruzzo, in cui polimero e farmaco devono essere dissolti in un solvente volatile.



Drug	Crystalline	Amorphous	Molecularly dissolved
Polymer	Amorphous	Amorphous	Amorphous
Thermodynamic stability	Almost stable	Unstable (kinetically controlled)	Stable (drug below saturation solubility)

Dispersione API in estrusione per Hot Melt (Thermo Fisher Scientific)

I polimeri per l'estrusione a caldo devono presentare caratteristiche termoplastiche e devono essere termicamente stabili alla corretta temperatura di estrusione. Nello sviluppo di un sistema farmacologico HME, la transizione vetrosa e le temperature di fusione sono fattori critici. L'estrudibilità di un polimero è determinata principalmente da T_g o T_m e dalla viscosità del fuso. La maggior parte dei polimeri dimostra un comportamento tixotropico in cui la viscosità si riduce in funzione dell'aumento della sollecitazione di taglio.

L'attuale metodologia di scoperta di farmaci produce farmaci candidati di dimensioni molecolari e lipofilia crescenti, con conseguente scarsa solubilità e permeabilità. Meno del 10% dei nuovi candidati a farmaci dimostrano sia elevata solubilità che permeabilità, e il 30-40% dei farmaci che compaiono nell'elenco essenziale dei farmaci dell'Organizzazione Mondiale della Sanità sono stati segnalati come scarsamente solubili in acqua o lipofili. L'estrusione Hot Melt disperde il farmaco nella matrice a livello molecolare formando una soluzione solida.

L'estrusione Hot Melt HME è disponibile per una serie di applicazioni, tra cui dispersione solida amorfa, sistemi a rilascio controllato, generazione di polimorfismo, nuova cristallizzazione (cristallizzazione continua priva di solventi), sistemi polimerici porosi e Process Analytical Technology (PAT).

Nel processo di estrusione Hot Melt, l'API e gli eccipienti vengono immessi nell'estrusore. Tutti i componenti vengono tranciati, riscaldati, plastificati, miscelati e dispersi e infine plasmati pressandoli attraverso un'apertura della matrice. Lo sviluppo di un progetto di produzione HME richiede il controllo di numerosi parametri di elaborazione che influiscono sulla distribuzione del tempo di permanenza e il consumo specifico di energia meccanica (SMEC) deve essere considerato come la temperatura del fuso sulla matrice dell'estrusore, la pressione sulla matrice e la coppia.

Nella **produzione di colle e vernici**, l'HME viene utilizzato per la miscelazione dei leganti quali cere, leganti, pigmenti ed altri componenti. L'HME è la colla adesiva a caldo maggiormente utilizzata in molti settori industriali quali l'edilizia, l'automotive, in arti grafiche, in ambito medicale, tessile e arredamento e per le operazioni di imballaggio e di assemblaggio di materiali anche molto diversi tra di loro.

Il processo di estrusione genera un prodotto termoplastico, dal quale si ricavano stick o granuli di polimeri plastici privi di solventi (poliestere, poliammide, polietilene, polipropilene), atossici ed ecologici.

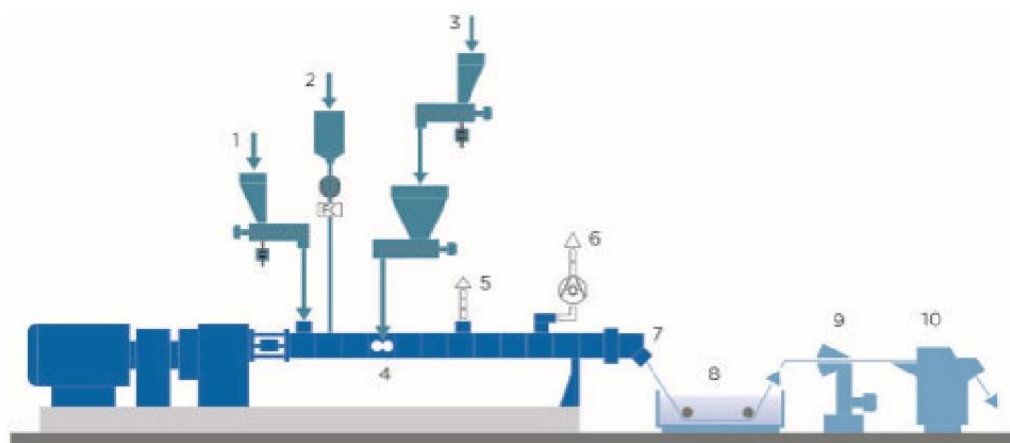
Estrusori per Bioplastica

La bioplastica più comunemente nota e diffusa sul mercato (anche per il suo basso costo) è il ben noto acido polilattico o PLA, derivante da amido ricavato dal mais, dal frumento, dalle patate, dalla tapioca o dal riso.

Essa è un tipo di plastica compostabile o biodegradabile ricavabile da materie prime di origine vegetale, quindi da materia organica rinnovabile e con un tempo di decomposizione di qualche mese in fase di compostaggio. I tempi di decomposizione definiscono se il prodotto è compostabile o biodegradabile; infatti la norma europea EN 13432, considera come compostabile, qualunque prodotto che si decompone entro 90 giorni mentre definisce come biodegradabile, quei prodotti che si decompongono almeno del 90% entro sei mesi.

Il processo di estrusione della bioplastica richiede la conoscenza specifica di questo particolare materiale, con una fluidità molto spesso variabile da un lotto di produzione ad un altro e dalla tipologia di compound. Inoltre, è necessario lo studio e la costruzione di viti di estrusione specifiche per questo materiale oltre all'utilizzo di filiere con una compressione adeguata ad ottenere un fuso omogeneo in grado di garantire produttività costante e senza interruzioni.

Inizialmente la produzione è stata realizzata con estrusori monovite, vi è stata negli ultimi anni uno sviluppo della produzione con gli estrusori bivate che, grazie alla loro capacità di miscelare il materiale senza "stressarlo", si sono rivelati molto indicati per l'estrusione di questo materiale delicato e dai parametri di processo molto ristretti. L'estrusione produce film in bolla ma anche tubi, e profili, nonché lastre da termoformatura per contenitori alimentari e componenti per l'agricoltura.



Schema linea di estrusione per bioplastica (Coperion GmbH)

1. Dosatore/premiscelatore amidi
2. Dosatore plastificante liquido
3. Alimentazione polimeri in pellet
4. Estrusore bivate corotante ad alimentazione laterale
5. Degasaggio
6. Degasaggio sottovuoto
7. Testa
8. Vasca di raffreddamento
9. Lama d'aria di asciugatura
10. Pellettizzatore

Estrusori per Lastre e Foglia

Dopo essere stato sviluppato per la produzione di compounding e masterbatch, l'estrusore bivate è stato presto utilizzato anche per la classica produzione di lastre e foglia estrusi in cui storicamente si è sempre usato l'estrusore monovite.

In particolar modo, l'uso di estrusori bivate corotanti, permette di ottenere una elevata capacità di miscelare materiali a basso costo disponibili da scarti di lavorazione di prodotti naturali (es polvere di legno) e non (es. plastiche di scarto) per ottenere manufatti con caratteristiche di qualità elevata.

Questo perché l'estrusore bivate corotante permette un'alimentazione dei singoli ingredienti direttamente nell'estrusore, ottenendo una miscela omogenea, pronta per essere estrusa in un semilavorato sia esso una foglia o una lastra. L'estrusione diretta consente notevoli risparmi energetici.

Alcuni costruttori hanno poi brevettato degli impianti per estrudere lastre in polipropilene (PP) caricate con farine di legno (Woodstok™ - ICMA S. Giorgio), gusci di noci o noccioli di olive finemente tritati (Poliwood™-Bausano/bg-plast), direttamente nell'estrusore bivate corotante. Questi impianti sono usati con grande successo in particolare nel campo dell'automotive (Fiat - Ford - Nissan - Volkswagen) per produrre lastre da termoformare per i pannelli di interno auto.

Questa tecnologia viene costantemente perfezionata nel tempo e viene adeguata tecnologicamente ai macchinari di nuova generazione (prestazioni migliori, produzioni più elevate, maggior precisione, ecc.) permettendo l'impiego di materie prime di più facile reperibilità.



Dettaglio testa piana e calandra per linea foglia (Krauss Maffei GmbH)

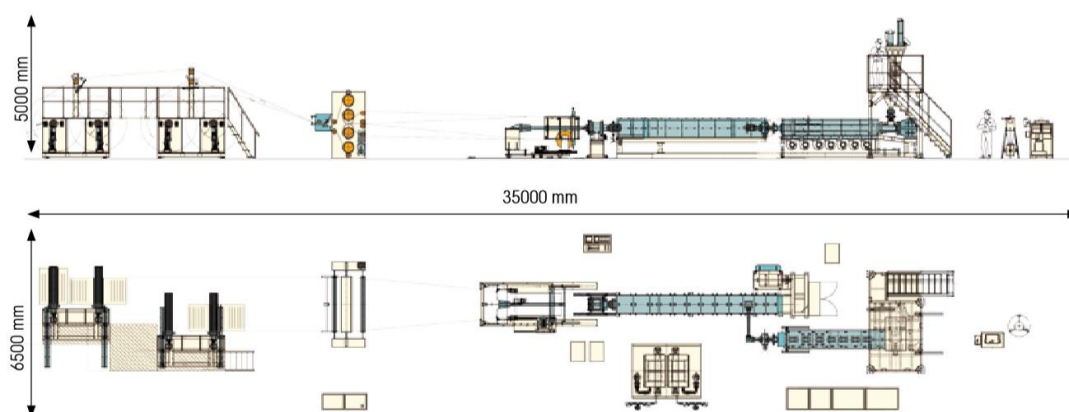
Estrusori per estrusi espansi (Foam)

La configurazione delle linee di estrusione dipende dalle portate richieste dal cliente, se la portata è inferiore a 400 Kg/h si utilizza generalmente un **estrusore bivate corotante lento**, se invece è più elevata, fino a 1500 Kg/h, si utilizza la tecnologia Tandem, in quanto è necessario dividere la prima parte del processo (fusione, miscelazione ed

iniezione del gas espandente) nell'estrusore primario (bivite corotante) con numeri di giri vite elevati, dalla seconda parte (raffreddamento del materiale fuso) nell'estrusore secondario(monovite) a bassi giri della vite.

Negli ultimi anni le linee di estrusione per pannelli XPS hanno subito importanti modifiche tecniche per l'adeguamento alle leggi vigenti, le quali prevedono la sostituzione dei tradizionali gas CFC e HCFC, il cui impiego è sempre più limitato. La configurazione dell'estrusore richiesto dal processo, il rapporto delle viti L/D, la geometria della vite e in particolare la geometria e la lunghezza della zona di miscelazione, la posizione e il numero di fori per l'iniezione del gas e il numero delle zone di riscaldamento/raffreddamento. Gli estrusori devono essere completamente a norma Atex II classe C T3 per l'utilizzo di gas infiammabili.

L'estrusore bivite per gli espansi (foam) incide in maniera relativamente importante sul costo globale dell'impianto; pertanto, viene solitamente utilizzato per l'impianto a più elevata produzione.



Configurazione linea di estrusione Tandem per produzioni superiori ai 500 Kg/h

Gli estrusori in configurazione Tandem per elevate produzioni hanno combinazioni variabili e modulari; si parte da una combinazione di estrusori monovite D.120 + D.150 fino ad arrivare agli estrusori bivite D.112 + monovite D.350 per la trasformazione di PS, PE e PET in espansi. Nell'estrusore primario avviene sempre la miscelazione ed iniezione, invece nell'estrusore secondario, avviene il raffreddamento ed trasporto del fuso.

Estrusori da laboratorio

L'**estrusore bivate da laboratorio** rappresenta la soluzione ideale per tutti quegli utilizzatori che vogliono testare dei materiali o dei processi, senza per questo impiegare un impianto standard con un elevato consumo di energia e di materiale. Essi sono i centri di ricerca, le università, i laboratori, i centri di formazione ma anche le aziende di produzione, che vogliono testare su piccola scala i processi di estrusione, al fine di valutare la fattibilità e la qualità dell'estruso per poi procedere alla produzione vera e propria.

Le ridotte dimensioni dell'apparecchiatura non devono ingannare l'osservatore, è una vera macchina completa, un estrusore bivate da laboratorio ha dimensioni che possono andare dal diametro minimo di viti di 12mm fino a 26mm, con rapporti L/D da 24/36/40/56 e può essere del tipo a viti corotanti o controrotanti.

L'estrusore può essere equipaggiato con un motore elettrico da 2,2 kW fino a 22kW di potenza installata e per una portata che va dai 4 kg/ora agli 80 kg/h (per LDPE). Solitamente per gli estrusori bivate da laboratorio si opta per un cilindro di estrusione monoblocco o apribile "a libro" in due parti, una inferiore ed una superiore. Realizzato in acciaio di qualità, con una durezza superficiale di 60 HRC ed in grado di operare in modo continuativo fino a 400 °C di temperatura.

Le viti possono essere modulari, con un albero brocciato centrale o di sezione esagonale su cui sono calzati i vari settori a spirale oppure sono di tipo monoblocco e vengono realizzate dal pieno con un tondo di acciaio per utensili. Un estrusore bivate da laboratorio può essere equipaggiato con una vasta gamma di accessori come cambiasfiltri a leva o a comando idraulico, tramogge volumetriche o gravimetriche, side feeder, pompe melt, pompe dosatrici per liquidi e PLC di controllo.



Estrusore bivate da laboratorio (Labtech GmbH)

PROGETTAZIONE DELL'ESTRUSORE

Introduzione

Gli estrusori bivate sono stati storicamente utilizzati per produrre pellet per consentire un'alimentazione coerente in un dispositivo di elaborazione secondario, come una pressa a iniezione o un estrusore monovite. Successivamente si è sviluppata una tendenza, ora in rapida crescita, a bypassare la fase di pellettizzazione e a produrre un film, una fibra, un foglio o un profilo direttamente dall'estrusore bivate. Questa operazione viene chiamata **estrusione diretta**. A prescindere dal prodotto finale, il processo eseguito nell'estrusore bivate sono le medesime.

Esistono due famiglie distinte di estrusori bivate, definiti come estrusori bivate a bassa velocità e a fusione tardiva LSLF (fino a 50 giri/min.) ed estrusori bivate ad alta velocità HSEI (fino a 1200giri/min). Gli estrusori bivate HSEI vengono utilizzati principalmente per il compounding, l'estrusione reattiva e/o la devolatilizzazione.

Gli estrusori bivate controrotanti LSLF, invece, sono progettati per miscelare a basso taglio e “pompare” a pressioni uniformi il melt (PVC e materiali simili). Questi ultimi estrusori non sono adatti per eseguire estrusioni ad alta intensità energetica.

Gli estrusori bivate HSEI lavorano il materiale contenuto tra il nocciolo delle viti e le pareti del cilindro. Le viti a settori, montate sugli alberi scanalati, consentono di trasferire la coppia massima al processo di estrusione e le velocità massime delle viti sono fino ai 1200giri/min.

Un tipico rapporto tra lunghezza e diametro (L/D) del cilindro di estrusione, è compreso tra i 30: 1 ed i 48:1, con un massimo fino a 60:1. I cilindri sono modulari e utilizzano il raffreddamento a liquido. Il motore immette energia nel processo tramite la rotazione delle viti che conferiscono il “taglio” al materiale. I parametri di controllo includono la velocità delle viti (rpm), la velocità di alimentazione, le temperature della sezione di processo e il livello di vuoto (per lo sfiato). Le letture tipiche sono la pressione di fusione, la temperatura di fusione e l'ampereaggio del motore (coppia).

Viti e cilindri a settori, combinati con le caratteristiche di pompaggio e di pulizia dell'estrusore bivate HSEI, consentono di adattare le geometrie delle viti e del cilindro al processo. Il trasporto e la plastificazione dei solidi avvengono nel primo 1/3 della sezione di processo. Gli elementi della vite per la miscelazione e la devolatilizzazione vengono definiti e applicati come richiesto dal processo, compresi quegli elementi che espellono i gas prodotti e stabilizzano la pressione sulla testa di estrusione.

Gli estrusori bivate HSEI sono alimentati “per fame” con una velocità di produzione determinata dall'alimentazione. Nell'estrusore HSEI, gli alimentatori dosano i solidi (pellet/riempitivi e così via) o i liquidi. Il numero di giri della vite dell'estrusore è indipendente dalla velocità di avanzamento e viene utilizzato per ottimizzare l'efficienza della mescola. Poiché il gradiente di pressione è zero per la gran parte del processo, i materiali possono essere introdotti nelle sezioni del cilindro a valle dell'alimentazione, tipicamente da un alimentatore laterale a doppia vite (side stuffer) che spinge i materiali nel cilindro dell'estrusore con delle viti senza compressione.

L'alimentazione di un forzatore laterale posto a valle dell'alimentazione principale può essere utile per ottenere carichi di riempimento elevati, per ridurre l'usura da abrasione nella sezione di processo dell'estrusore e durante la lavorazione di materiali sensibili al taglio. Un profilo di pressione controllata facilita anche lo sfiato dei vapori formati durante la lavorazione.

L'estrusore bivate HSEI è spesso accoppiato a un dispositivo di filtrazione e quindi a un sistema di pellettizzazione o un altro sistema di formatura (filiera) a valle per produrre un foglio, un film, una fibra o un profilo. Sono disponibili varie architetture di controllo in base al budget, all'acquisizione dei dati e al livello dei requisiti di automazione.

Energia specifica

L'energia specifica (SE) è la quantità di potenza immessa dal motore in ogni chilogrammo di materiale in lavorazione. Il calcolo viene effettuato nel modo seguente:

1) Potenza installata:

$\text{kW (erogata)} = \text{kW (Potenza del motore)} \times \% \text{coppia} \times \text{n}^\circ \text{ giri viti} / \text{n}^\circ \text{ massimo di giri} \times 0,97$ (rendimento del riduttore)

2) Calcoliamo l'energia specifica (SE):

Energia Specifica = kW (erogati)/kg per ora

- SE è indicata in kW per kg/ora,
- kW = kilowatts (Potenza del motore, kW = hp x 0,746),
- % coppia = % massima della coppia ammissibile
- Rpm = numero di giri vite/min.

Ad esempio: un estrusore bivate da 40 mm sta elaborando un PP caricato con minerali a 160 kg / h, funzionante a 400 giri / min con una coppia del 68%. La macchina ha un motore da 56 kW (circa 75 hp) e un numero di giri massimo possibile della vite di 600.

$\text{kW (erogati)} = 56 \text{ kW} \times 0,68 \times 400 / 600 \times 0,97 = 0,154 \text{ kW per kg/ora}$.

Un'energia specifica più bassa indica che viene utilizzata meno energia meccanica e un'energia specifica più alta indica più energia meccanica utilizzata.

È importante conservare i record dell'energia specifica, in particolare per la risoluzione dei problemi. Ad esempio, se un prodotto funziona sempre con un'energia specifica di circa 0,25 kW per kg/ora e passa improvvisamente a 0,16 kW per kg/ora e la macchina e le condizioni di processo non sono cambiate, significa che è la materia prima che è cambiata. L'energia specifica può essere utilizzata quando si confrontano materiali prodotti da estrusori bivate HSEI di dimensioni diverse o anche da diverse tecnologie di produzione.

L'energia specifica può anche aiutare a definire le future configurazioni della macchina e può anche essere usato come un riferimento per il ridimensionamento ed il confronto di diverse operazioni di produzione. Ad esempio, se un processo assorbe solo il 30-40% del carico del motore, è possibile di prevedere l'utilizzo un motore più piccolo sulla macchina successiva da realizzare (se uguale).

Coppia percentuale

Questa formula indica la percentuale della forza di rotazione disponibile utilizzata in un processo ed è una lettura tipica nel pannello di controllo come valore in percentuale (%) o in ampere. Questo è calcolato come segue:

$\% \text{ coppia} = \text{coppia erogata (amp)} / \text{coppia massima disponibile (amp)}$

- Amps = corrente elettrica o carico principale del motore (A = ampere).

Esempio: se un HSEI ha una corrente massima di 500A e durante il processo di estrusione si rilevano 400A, la coppia erogata è l'80%:

$$\text{coppia} = 400\text{A} / 500\text{A} = 0,8 = 80\%$$

A seconda dell'installazione, la potenza massima disponibile può essere limitata dagli alberi delle viti dell'estrusore, dal riduttore (per macchine più datate) o dal motore di azionamento installato (se è sottodimensionato rispetto al riduttore). Ad un valore prossimo al 100% viene implementata una logica di sicurezza per regolare l'azionamento per evitare che la frizione di sicurezza meccanica si disinnesti o, nel peggiore dei casi, per evitare danni all'albero della vite/al riduttore.

Coppia massima trasmissibile in relazione al numero di giri della vite

L'area della sezione trasversale degli alberi delle viti, il design, il tipo di acciaio, la lavorazione dell'albero e i trattamenti termici, determinano la coppia disponibile che può essere trasmessa nel processo e determina quale tipo motore e riduttore può essere installato sulla macchina. Questa formula aiuta a determinare il rapporto di trasmissione corretto per un nuovo estrusore bivate HSEI:

$$\text{Coppia} = 9550 \times \text{kW} / \text{numero di giri massimi dell'estrusore}$$

- Coppia = coppia totale per entrambe le viti, indicata in Newton-metri (Nm),
- kW = Potenza del motore installato sull'estrusore HSEI.

Esempio: un estrusore bivate HSEI con un diametro della vite di 60 mm ha una coppia nominale di 2800 Nm, utilizza un motore da 200 kW se impostato per 600 giri/min, allora un motore da 400 kW sarebbe specificato a 1200 giri/min come indicato di seguito:

$$2800 = (9550 \times 200) / 600$$

$$2800 = (9550 \times 400) / 1200$$

Per i processi che funzionano tra 0 e 600 rpm non c'è differenza se è stato utilizzato un azionamento da 200 kW (se a 600 rpm) o 400 kW, tranne per il fatto che il motore o l'azionamento più grande costa di più. Pertanto, se il processo non beneficia di velocità delle viti più elevate, probabilmente non dovrebbe essere specificata la configurazione kW/numero di giri più elevata.

Molto spesso bisogna scegliere tra un estrusore bivate HSEI con un diametro delle viti maggiore ma che opera a un numero di giri inferiore o una macchina più piccola che funziona a un numero di giri maggiore. Il differenziale di costo per entrambi deve essere confrontato prima di effettuare la selezione finale, specialmente per le macchine più grandi.

Scale-up

Lo scale-up è utile per stimare i tassi di produzione di estrusori bivate sulla base di esperimenti di laboratorio. Le geometrie per i due estrusori dovrebbero essere quasi identiche affinché questa equazione sia valida. Per i processi che aumentano in modo volumetrico, la formula di aumento in scala basata sulla potenza è la seguente:

$$Q_{\text{richiesto}} = Q_{\text{riferimento}} \times [(OD_{\text{richiesto}})/OD_{\text{riferimento}}]^3$$

- Q = portata richiesta (in qualunque unità),
- OD = diametro esterno vite (ognuna).

Esempio: un estrusore bivate da 27 mm produce 100 kg/ora e il processo non è limitato dal trasferimento di calore o da fattori di devolatilizzazione. Per stimare quanto produrrà un estrusore bivate da 75 mm, verranno applicati i seguenti calcoli:

$$Q(75 \text{ mm}) = 100 \times (75/27)^3$$

$$Q(75 \text{ mm}) = 100 \times 2.783 = 2148 \text{ kg/hr}$$

Prove sperimentali hanno evidenziato che maggiore è la differenza nelle dimensioni dell'estrusore, meno affidabile diventa questo calcolo.

Per un processo con trasferimento di calore limitato, l'esponente è più vicino a 2, per processi di devolatilizzazione, l'esponente di scale-up è compreso tra 2,3 e 2,7.

L'esperienza gioca un fattore importante per quanto riguarda la scelta dell'esponente da usare in base alla scalabilità dei processi specifici in un impianto. Sono disponibili anche formule avanzate e approcci di modellazione al computer per un lavoro su scala più intensivo.

Volume specifico

Il volume specifico (SV) rappresenta il volume approssimativo per la lunghezza del diametro esterno (OD) delle viti per le geometrie delle viti di tipo “Erdmenger” tradizionali. Questo calcolo, utile in numerose altre formule, consente di calcolare il volume nella sezione del processo. Il volume specifico SV viene calcolato come segue:

$$\text{Volume specifico} = 0,94 \times (\text{OD}^2 - \text{ID}^2) \times \text{OD} / 1000$$

- SV è indicato in cc/diametro (è sempre meglio avere il valore di SV dal fornitore della macchina, se possibile),
- OD = Diametro esterno vite (creste della spirale),
- ID = Diametro di nocciolo vite.

Esempio: Un estrusore bivate HSEI con le viti aventi un OD di 50 mm e un ID di 32 mm, il valore di SV è il seguente:

$$\text{SV} = 0,94 \times (50^2 - 32^2) \times 50 / 1000 = 73,8 \text{ cc/dia}$$

Questo numero può essere utilizzato anche per il ridimensionamento approssimativo tra macchine di dimensioni diverse che condividono somiglianze geometriche (rapporto OD / ID) e che non hanno dimensioni troppo diverse. Per esempio:

$$Q_{\text{target}} = Q_{\text{reference}} \times (\text{volume}_{\text{target}} / \text{volume}_{\text{reference}})$$

Esempio: un estrusore bivate da 45 mm ha un SV di 60 cc/dia e funziona a 150 kg/h, si può dedurre che un estrusore da 75 mm con un SV di 240 cc/dia lavorerà approssimativamente quattro volte il tasso:

$$Q_{\text{target}} (75 \text{ mm}) = 150 \times (240 / 60) = 600 \text{ kg/h}$$

Riempimento percentuale (% fill)

Questo valore fornisce la percentuale approssimata del volume disponibile nella sezione di processo che viene utilizzata nell'estrusore bivate HSEI alimentato a fame. Questo calcolo è utile per approssimare un punto di partenza su dove eseguire un processo.

È possibile utilizzare la seguente formula:

$$\% \text{ fill} = (Q \times 0,2777) / (SV \times \text{rpm} / 60) \times (SG \times Ef)$$

- Q = Portata in kg/h,
- Ef = Efficienza media di alimentazione (circa 35% per una vite con 1/3 settori di miscelazione e 2/3 settori di compressione),
- SV = Volume specifico dell'estrusore in cc/dia,
- Rpm = numero di giri viti,
- SG = Peso specifico del materiale in lavorazione.

Esempio, un estrusore da 40mm di viti con un SV di 34,8 cc/dia sta producendo a 50kg/h a 200 giri/min. il riempimento si calcola come segue:

$$\% \text{fill} = (50 \times 0,2777) / [34,8 \times (200 / 60)] \times 1 \times 0,35 = 0,34 \quad (\text{o } 34\% \text{ riempimento})$$

Questa formula restituisce un valore molto approssimativo ma ha lo scopo di fornire alcune informazioni sulle dinamiche di una sezione di processo. Possono essere fatti dei calcoli più complessi e accurati che tengono conto delle geometrie specifiche della vite, della viscosità del fuso e del grado di riempimento della vite.

Questi calcoli potrebbero rivelare che i processi intensivi di devolatilizzazione vengono eseguiti al 30% (o meno) di riempimento della vite perché una sezione del processo altamente "affamata" aumenta la superficie delle zone di fusione sotto lo sfianto del degasaggio.

I calcoli potrebbero dimostrare che formulazioni di masterbatch simili per applicazioni per film o lastra, utilizzano un volume del 40%, rispetto ad un 60% usato per le applicazioni di stampaggio a iniezione, a causa dei requisiti di miscelazione dispersiva comparativa.

Livelli di riempimento più elevati si traducono in una distribuzione del tempo di residenza (RTD) più ridotta ed uno sforzo di taglio (shear) inferiore, mentre livelli di riempimento inferiori sono associati a RTD più ampio e con più shear. Le approssimazioni del livello di riempimento aiutano a spiegare perché i diversi processi traggono vantaggio dalle percentuali di livello di riempimento comparative.

Tempo di residenza (RT)

Questa formula fornisce il tempo di permanenza approssimativo (RT) nella sezione di processo di un estrusore bivate HSEI. Come indicato sopra, la distribuzione del tempo di permanenza dipende fortemente dal grado di riempimento della vite. La seguente formula può essere utilizzata per calcolare RT:

$$RT(\text{sec.}) = (SV \times SG \times L/D \times \%fill) / (Q \times 0,2777)$$

- RT = Tempo di residenza in secondi,
- SV = Volume specifico in cc/dia,
- SG = Peso specifico,
- L/D = L/D rapporto estrusore,
- %fill = Grado di riempimento, espresso in decimali (es. 40% = 0,4),
- Q = kg/h portata in lavorazione.

Esempio: un estrusore da 50mm di diametro viti con un SV di 70 cc/dia e 48 L/D, produce materiale con un 1,1 SG a 270 kg/h. Assumendo un riempimento percentuale della vite di 0,4 (40 % fill), si calcola:

$$RT = (70\text{cc/dia} \times 1,1 \times 48 \times 0,4) / (270 \times 0,2777)$$

$$RT = 19,7 \text{ secondi}$$

La formula per calcolare RT fornisce indicazioni su quanto tempo i materiali sono esposti al calore e al taglio nella sezione del processo.

Portata specifica

La portata specifica (ST) fornisce la produzione per numero di giri vite per un dato processo e può essere calcolato come segue:

$$ST = (\text{kg/h}) / \text{rpm}$$

Esempio: un estrusore bivate di diametro 100 mm, produce 1000 kg/h a 250 giri/minuto, la portata specifica sarà:

$$ST = 1000 / 250 = 4 \text{ kg/rpm}$$

La produttività specifica fornisce un valore proporzionale al grado di riempimento (%fill) e viene utilizzata per confrontare produzioni simili a velocità diverse sulla stessa macchina.

Esempio: una produzione funziona a 1000 kg/h per 250 giri/min della vite, allora per 2000 kg/h sullo stesso estrusore, sono ipotizzabili circa 500 giri/min della vite.

Approssimazione dello sforzo di taglio

Lo sforzo di taglio (shear) è ciò che consente la miscelazione del polimero in un estrusore bivate. Sebbene non necessariamente accurato, quanto segue fornisce un'approssimazione approssimativa del taglio:

Riferimento sforzo di taglio intermesh = $10.4 \times \text{rpm} \times ((\text{OD} + \text{ID}) / \text{OD})$

Minimo canale per il taglio = $\text{rpm} \times \text{OD} / \{60 \times (\text{OD} - \text{ID})\}$

- Shear = 1/sec,
- Rpm = numero di giri vite (giri / min.),
- OD = Diametro esterno vite,
- ID = Diametro di nocciolo vite.

Esempio: un estrusore bivate con un diametro esterno di 110 mm e un diametro interno di 72 mm funzionante a 600 giri/min, si applicano i seguenti calcoli di taglio:

Riferimento sforzo di taglio intermesh = $10.4 \times 600 \times ((110 + 72) / 110) = 10,324 \text{ rec/sec}$

Minimo canale per il taglio = $600 \times 110 / \{60 \times (110 - 72)\} = 29 \text{ rec/sec}$

La formula può essere utilizzata come stima approssimativa per abbinare i giri al minuto per gli estrusori bivate HSEI con diametri diversi o per stimare il taglio a un particolare numero di giri.

Incremento della temperatura in relazione alla pressione

La generazione di una contro-pressione nella parte terminale dell'estrusore causata dal complesso testa+filiera, provoca un aumento della temperatura. Più restrittiva è l'uscita del materiale e maggiore è l'aumento della pressione e della temperatura di fusione, ciò può influire negativamente sul prodotto. La formula dell'aumento di temperatura è la seguente:

Cambio di temperatura (° C) = Cambio di pressione (bar) / 2

Esempio: un estrusore bivate HSEI sta elaborando 500 kg/ora e la pressione della testa è di circa 40 bar (580 psi), l'aumento della temperatura di fusione associato è di circa 20°C (variazione di temperatura = 40/2)

PROGETTAZIONE DELLE VITI

Introduzione

La coppia di viti di estrusore è nell'estrusore bivate, il cuore della macchina; da esse dipendono per oltre il 90% la buona riuscita del processo di plastificazione del polimero. La differenza fondamentale rispetto ad una vite di un estrusore monovite è che quest'ultima viene realizzata in un pezzo unico per gli estrusori più piccoli ed in due o tre parti, avvitate tra loro, per gli estrusori più grandi mentre nel bivate è composta da settori spirali o a camme per il taglio, calzati sull'albero brocciato centrale.

Un'altra differenza fondamentale è il rapporto lunghezza/diametro delle viti (L/D); se negli estrusori monovite il rapporto standard è circa $L/D=30-32$, negli estrusori bivate il rapporto più usato è il $L/D=24-28$. La lunghezza delle viti di un estrusore bivate è significativamente più corta rispetto ad una vite per estrusori monovite, a parità di portata erogata all'uscita dell'estrusore.




Questo è un ulteriore indizio della superiore capacità di plastificazione dell'estrusore bivate che, oltre ad avere uno sforzo di taglio inferiore sul polimero (stressa meno il materiale), ha una capacità di miscelazione superiore, richiedendo una lunghezza di vite inferiore e quindi un tempo di residenza del polimero all'interno dell'estrusore inferiore. Il tempo di residenza inferiore è una garanzia di una minore possibilità di degradazione del polimero che, rimanendo ad alta temperatura per un periodo di tempo minore, ne migliora le qualità ottiche e meccaniche.

Gli elementi della vite

I settori della vite sono l'elemento più importante per la configurazione del processo che si svolge nell'estrusore bivate. Modificando l'ordine dei settori della vite lungo la direzione del flusso di materiale attraverso l'estrusore, le caratteristiche di miscelazione e di trasporto possono essere modificate su di un intervallo molto ampio.

Esistono generalmente due tipi costruttivi di viti per gli estrusori bivate, le viti componibili a settori e le viti monoblocco; le viti a settori sono modulari, sono componibili in base alle esigenze della produzione in quanto i settori sono tutti intercambiabili e vengono calzati su di un albero scanalato di lunghezza adatta e sono bloccati alle estremità dal codolo e dal puntale. Le viti monoblocco, che possono essere anche coniche, vengono utilizzate soprattutto per gli estrusori di taglia medio – piccola, hanno un costo di realizzazione inferiore ma non hanno la modularità delle viti a settori; cambiando tipo di produzione, deve essere sostituita la coppia di viti.

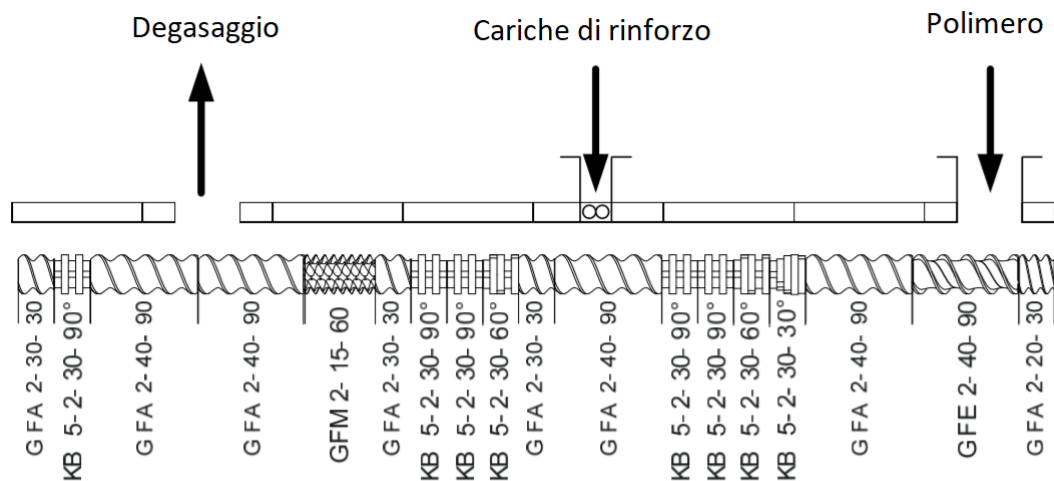
Procederemo ora a definire una tipica vite per compounding, che poi è il 90% delle richieste del mercato per gli estrusori bivate. La tabella seguente offre una panoramica delle caratteristiche generali dei tre principali tipi di elementi.

Tipo di settore	Funzione	Caratteristiche principali
	<p>Trasporto</p> <p>Aumento della pressione</p>	<p>Miscelazione limitata</p> <p>Tempo di residenza limitato</p>
	<p>Miscelazione dispersiva</p>	<p>Nessun incremento di pressione</p> <p>Tempo di residenza medio - lungo</p>
	<p>Miscelazione dispersiva</p>	<p>Nessun incremento di pressione</p> <p>Tempo di residenza medio - lungo</p>

Panoramica dei principali settori vite per estrusori bivate

Nella configurazione di una tipica vite per compounding, questi elementi sono quasi sempre usati in una configurazione speciale usando sequenze sul numero di nove elementi, in cui la sequenza dipende principalmente dal concetto generale di elaborazione. Tipicamente, le funzioni principali di una vite composta per un sistema riempito o rinforzato sono:

1. Fusione del polimero di base e degli additivi necessari.
2. Alimentazione laterale del riempitivo o delle fibre.
3. Degasaggio atmosferico per l'eliminazione dell'aria o dei gas incorporati.
4. Incorporazione delle fibre e/o dispersione del riempitivo.
5. Degasaggio sottovuoto.
6. Accumulo della pressione per il pompaggio del materiale attraverso la filiera.



Composizione tipica di una vite per compounding

Lo schema mostrato sopra, mostra un tipico set di viti per compounding per un composto contenente del riempitivo o delle cariche di rinforzo e che incorpora le fasi di lavorazione menzionate precedentemente.

A seconda della natura del polimero, del riempitivo, della viscosità, delle dimensioni della macchina, della coppia massima installata e dello standard di ogni costruttore, ogni vite deve essere modificata singolarmente. Spesso esiste più di una configurazione di vite adatta per la miscela ed alla fine dipende dalla tecnologia e dall'esperienza individuale di ogni costruttore, ma anche dalla necessità di flessibilità o dell'universalità della vite che ne determina il profilo finale.

Esistono diversi metodi per avvicinarsi a una configurazione della vite più o meno ottimale. Lo stato dell'arte attuale nel tipico settore del compounding è l'uso della vasta esperienza sia del produttore del compound che del costruttore della macchina per determinare una buona configurazione iniziale delle viti che consenta la produzione ottimale del tipo di composto desiderato. Per definire una configurazione iniziale, è possibile utilizzare la caratterizzazione qualitativa degli elementi a vite più comuni mostrati precedentemente. Sulla base di questo concetto iniziale, sulle viti vengono normalmente eseguite delle prove per ottimizzare la qualità dei materiali e della produzione.

Qualità dei materiali.

Delle proprietà molto diverse potrebbero essere: proprietà meccaniche, fattori di dispersione, degradazione del materiale, colore o altre proprietà che potrebbero essere influenzate dallo stato di dispersione e dalla degradazione del materiale.

Produzione.

In quasi tutti i casi le proprietà tecniche desiderate dovrebbero essere raggiunte al regime di potenza massima. Pertanto, spesso viene eseguito un test di qualità rispetto alla portata per determinare come interagiscono la velocità della vite e la velocità di avanzamento in combinazione con la configurazione del singolo processo.

Questo test di ottimizzazione della produzione può essere un processo che richiede molto tempo e materiale.

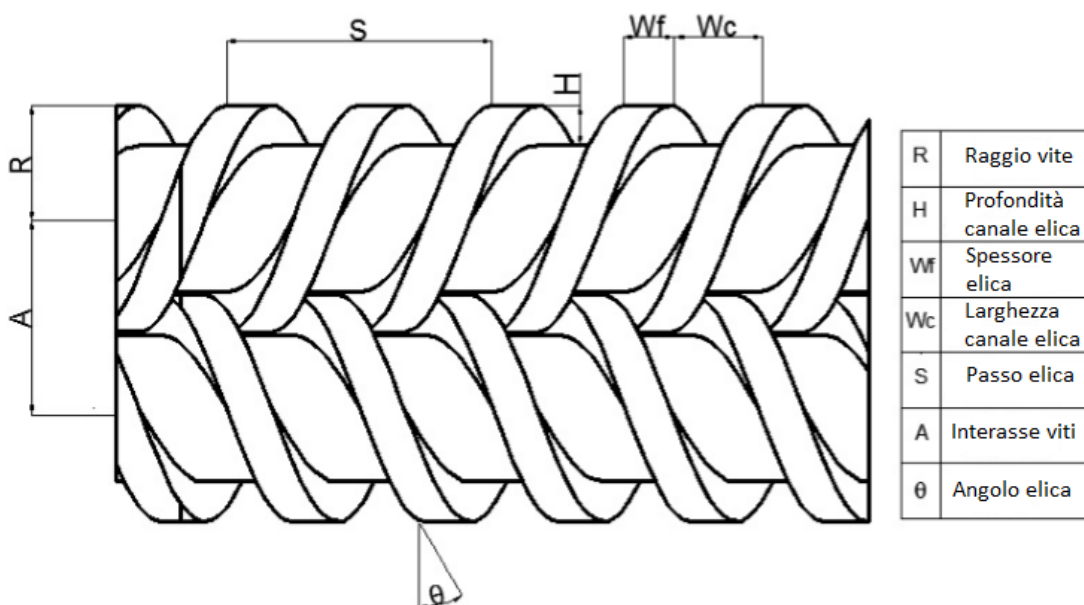
Parametri geometrici delle viti di estrusione

Analizziamo i parametri di progetto di una coppia di viti per un estrusore bivate controrotante e, per estensione, validi per le biviti in genere. Questi importanti parametri geometrici, sono riportati nella figura sottostante. In teoria, il rapporto tra la larghezza della spirale e la larghezza del canale è compreso tra 0 e 1. Se il rapporto tra la larghezza della spirale e la larghezza del canale è maggiore di 0,6 viene chiamato “elemento di trasporto spesso”. Negli alti casi, viene chiamato “elemento di trasporto sottile”. L'angolo dell'elica, θ , può essere calcolato come:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi R}{S}\right)$$

La larghezza del canale della vite, W_c , può essere calcolata come:

$$W_c = \frac{S}{i} - W_f$$



Dettaglio dei parametri per il disegno delle viti

Il modello di viscosità di Pierre J. Carreau nella sua equazione sotto riportata, è stato usato per calcolare la dipendenza dalla viscosità a velocità di taglio.

$$\eta_{eff} = \eta_{inf} + (\eta_0 - \eta_{inf}) (1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{\frac{n-1}{2}}$$

Nel modello di Carreau, η_0 è la viscosità a velocità di taglio zero, η_{inf} è la viscosità a velocità di taglio molto elevate (importante per le soluzioni, ma non per le fusioni), n è l'indice di potenza e λ è il tempo di rilassamento.

L'inserimento dei dati nella formula di Carreau, ha dato come risultati $\eta_0 = 12800$ Pa.s (approssimativi), assumendo come valori $\eta_{inf} = 10-12$ Pa.s, $n = 0.47$ e $\lambda = 1.4$ s.

Successivamente è stato deciso di utilizzare $\eta_0 = 10000$ Pa.s, $\lambda = 2$ e $n = 1, 0,7, 0,3$ per coprire la normale gamma di polimeri fusi, che probabilmente verrebbero elaborati in un estrusore bivate, nel nostro caso è controrotante con intermeshing.

Si assume una capacità termica specifica $C_p = 1530$ J / kg / ° K e si assume la densità di fusione $\rho = 1300$ kg / m³.

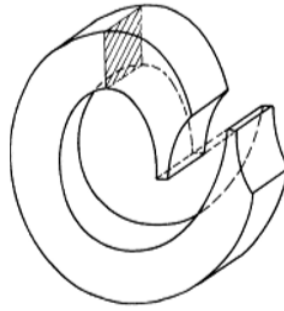
Il primo tentativo di calcolare la portata degli estrusori a vite multipla controrotanti per materiali termoplastici nella letteratura è stato eseguito da Schenkel nel 1963 che ha definito la seguente l'equazione:

$$Q_{th} = m N V_c \rho$$

dove Q_{th} è la portata in uscita teorica (di massa), m è il numero di viti, N è la velocità di rotazione delle viti, V_c è il volume della camera a forma di C per vite e ρ è la densità di fusione. Successivamente, nel 1965, Doboczky ha modificato l'equazione, estendendola agli estrusori bivate:

$$Q_{th} = 2 i N V_c \rho$$

dove i è il numero di canali tra le creste dell'elica. Nel 1978, Janssen ha utilizzato questa formula generale per gli estrusori bivate, per realizzare un modello matematico analitico più specifico per gli estrusori bivate controrotanti con intermeshing, assumendo che il volume della camera a forma di C, può essere calcolato sottraendo il volume di una determinata lunghezza della vite dalla stessa lunghezza del cilindro di estrusione vuoto.

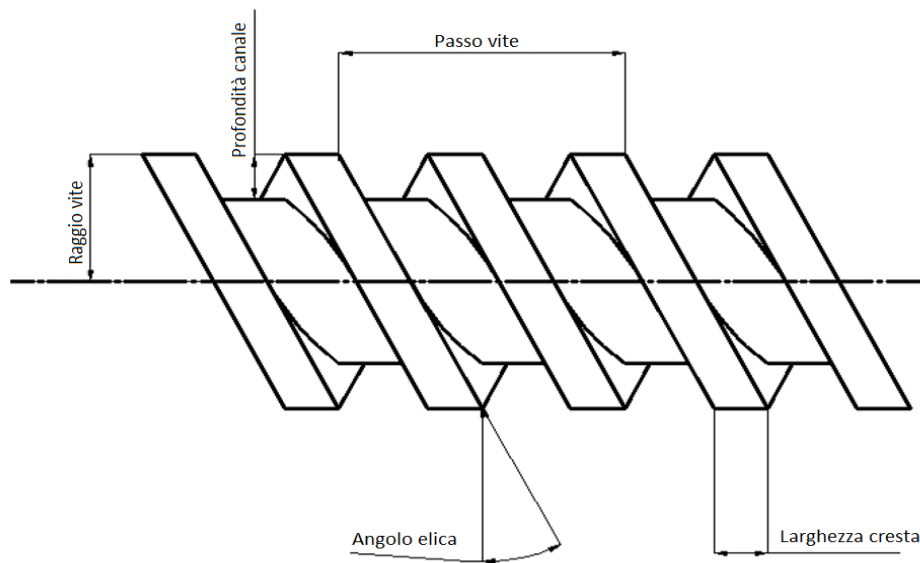


Forma a C del polimero fuso tra due creste della vite

Il volume, V_1 , di un lato del foro interno del cilindro su una lunghezza del passo tra due creste è stato calcolato come:

$$V_1 = \left\{ \left(\pi - \frac{\alpha}{2} \right) R^2 + \left(R - \frac{H}{2} \right) \sqrt{RH - \frac{H^2}{4}} \right\} S$$

dove le variabili di R , H e S per un estrusore bivate controrotante generico con intermeshing sono mostrate nello schema della figura successiva.



Variabili caratteristiche di una vite di estrusione

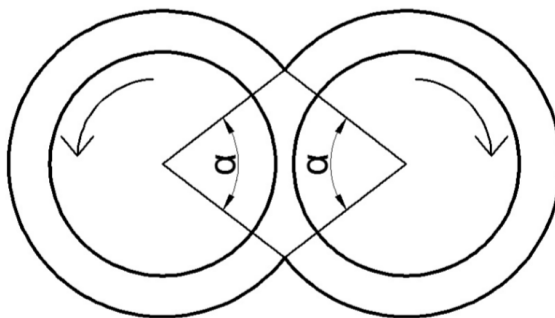
Alcuni dei valori tipici per queste variabili sono presentati nella tabella seguente. I valori sono rappresentativi di un polimero avente una densità del melt di 1300 kg/m³ e per un estrusore bivate con viti di diametro 89.7 mm.

Dati	P	Densità Melt	kg/m ³	1300	
	i	Numero di creste filetto		2	
	R	Raggio vite	mm	44.85	
	H	Profondità canale	mm	15.85	
	S	Passo vite	mm	caso 1	75
				caso 2	90
				caso 3	105
				caso 4	135
	Wf	Larghezza cresta	mm	17.5	
θ	Angolo dell'elica	(°)		14.9	
				17.7	
				20.04	
				25.6	
Risultati	Qth	Portata teorica in assenza di perdite	kg/h	caso 1	457.8
				caso 2	669.7
				caso 3	881
				caso 4	1304.8

Tabella variabili caratteristiche delle vite

α viene definito come l'angolo di sovrapposizione in radianti, è dato dalla formula:

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{RH - H^2/4}}{R - H/2} \right]$$



Sovrapposizione in un estrusore bivate controrotante

Il volume V_2 del nocciolo della vite su una lunghezza di passo è:

$$V_2 = \pi(R - H)^2 S$$

Il volume V_3 è il volume tra due creste di vite è:

$$V_3 = 2\pi \left\{ \left(RH - \frac{H^2}{2} \right) W_f + \left(RH^2 - \frac{2}{3} H^3 \right) \tan(\theta) \right\}$$

dove Wf e θ per un tipico estrusore bivate hanno dei valori, presentati nella tabella della pagina precedente.

Il volume totale della camera a forma di C è:

$$V_c = \frac{V_1 - V_2 - iV_3}{i}$$

Janssen ha calcolato e verificato le equazioni pesando l'acqua necessaria per riempire il cilindro dell'estrusore. I valori calcolati con la formula erano inferiori al 2% rispetto ai valori misurati; quindi, i calcoli possono essere considerati sufficientemente accurati.

Le configurazioni delle viti gemelle, che siano corotanti o controrotanti non possono essere realizzate con un rasamento a zero tra le spire adiacenti delle due viti contigue, altrimenti il metallo di una si sfreggerà sul metallo dell'altra e si avrebbe in breve tempo un'usura elevatissima delle stesse; oltre ad avere surriscaldamenti anomali e l'impossibilità di controllare e regolare la temperatura di quella zona.

È necessario realizzare le viti con un gioco sufficiente tra loro e questo produrrà sempre delle perdite di portata tra le successive camere a forma di C lungo il cilindro di estrusione, tali perdite si verificheranno sempre, in ogni estrusore bivate.

Perdite di portata nelle viti di estrusione

Il calcolo delle perdite di portata è stato inizialmente affrontato da Doboczky e da Klenk. Essi hanno assodato che si verificano delle perdite di portata in quattro aree ben definite; tali perdite, sono state chiamate:

Qc., perdita di portata nella “calandratatura”, cioè la perdita di portata che si verifica tra la cresta della spirale ed il nocciolo della vite.

Qt, perdita di portata posteriore nel “gap” tetraedrico tra i fianchi delle viti.

Qf, perdita di portata per dispersione del “gap” tra la cresta della spirale ed il cilindro di estrusione, lontano dalla regione di intermeshing.

Qs, perdita di portata che si verifica tra i fianchi delle spire adiacenti delle due viti.

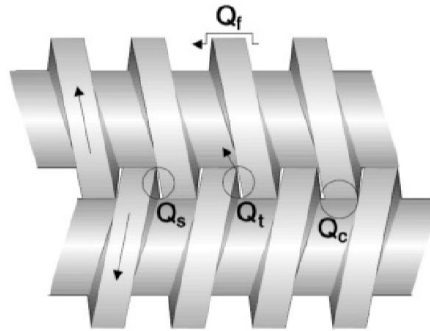
Janssen ha inoltre identificato due fonti di pressione per questo semplice modello. La prima fonte di pressione è quella che si sviluppa sulla testa di estrusione. Questa sorgente di pressione dalla testa è assunta zero in questo semplice modello a causa dell'effetto di “isolamento” di ciascuna camera a C rispetto alla successiva.

Sempre Janssen ha spiegato che la seconda fonte di pressione è definita come “la parete mobile dell'estrusore” (cioè il fronte delle spire che avanzano ruotando) ed il flusso che si genera all'interno della camera stessa.

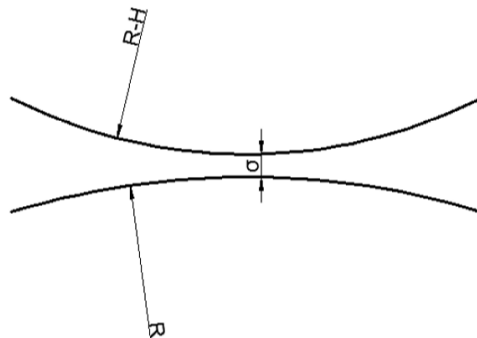
Ha scritto la seconda fonte di pressione nella formula:

$$\Delta p = 6\eta \frac{2\pi RN}{H^2} \left(\frac{S}{i} - W_f \right)$$

dove Δp è la differenza di pressione locale tra le camere a forma di C opposte, R è il raggio della vite, S è la lunghezza del passo della vite, i è il numero di spire della vite, W_f è la larghezza delle spire e N è la velocità della vite.



Perdite di portata localizzate su una coppia di viti controrotanti (Fitzpatrick, 2009)



Perdita per calandratura (Janssen, 1978)

Perdite di portata - dati	R	Raggio Vite	mm	44.85	
	H	Profondità canale vite	mm	15.85	
	Wf	Larghezza spira vite	mm	17.5	
	i	Numero di passi		2	
	α	Angolo di sovrapposizione	radianti	1.207	
	S	Lunghezza passo vite	mm	Caso 1	75
				Caso 2	90
				Caso 3	105
				Caso 4	135
	θ	Angolo Elica	rad	Caso 1	0.26
				Caso 2	0.31
				Caso 3	0.40
				Caso 4	0.45
	ϵ	Larghezza gap laterale	mm	Caso 1	1.25
				Caso 2	5
Caso 3				8.75	
Caso 4				16.25	
σ	Gap di calandratura	mm	1.15		
δ	Gap tra vite e cilindro	mm	0.5		
N	Velocità rotazione vite	giri/min.	30		
η	Viscosità	Pa.s	10000		
ρ	Densità Melt	Kg/m ³	1300		

Tabella dei dati di perdite di portata in un estrusore bivate

La perdita per calandratura, Q_c , in un estrusore bivate, è la perdita di portata che si verifica nello spazio esistente tra le due viti. È la portata di dispersione, cioè il flusso tra le viti che si intersecano.

Questo flusso di dispersione si verifica sempre in un estrusore bivate e non è eliminabile in quanto causato proprio dalla costruzione delle viti. Janssen ne derivò la semplice equazione per un fluido newtoniano come:

$$Q_c = \frac{4(S - W_f i)}{3i} * \left\{ N\pi(2R - H)\sigma - \frac{\Delta p \sigma^3}{6\pi\eta\sqrt{(2R - H)\sigma/2}} \right\}$$

Poiché ci sono quattro zone di calandratura in un bivate controrotante per due spire per ogni passo della vite, il valore di Q_c nell'equazione deve essere moltiplicato per quattro per ottenere il flusso di dispersione totale della perdita di calandratura per ogni camera a forma di C.

I flussi di perdite di calandratura totali calcolati per le condizioni esaminate in questo lavoro sono mostrati nella tabella che segue.

S	Lunghezza passo vite	mm	Caso 1	75
			Caso 2	90
			Caso 3	105
			Caso 4	135
Qc	Perdita totale per calandratura	kg/h	Caso 1	66.14
			Caso 2	90.7
			Caso 3	115.2
			Caso 4	163.8
Qc/Qth	Perdite totali per calandratura / Portata di massa totale teorica		Caso 1	0.144
			Caso 2	0.135
			Caso 3	0.130
			Caso 4	0.125

Tabella delle perdite per calandratura totali

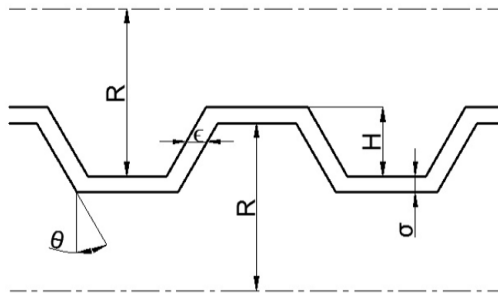
Varie prove sperimentali hanno determinato che la portata di dispersione delle zone di calandratura rispetto alla portata teorica varia dal 10% al 44% per varie geometrie. Ulteriori prove sperimentali dell'anno 1995, hanno permesso di scoprire che il flusso di dispersione delle zone di calandratura erano di circa l'11% della produzione teorica per un estrusore bivate controrotante di diametro 34 mm mentre, l'anno successivo, le prove effettuate su di un estrusore bivate controrotante di diametro 40 mm, hanno trovato la perdita del flusso di dispersione pari al 5% della portata totale.

Come mostrato nella tabella precedente, il flusso di dispersione totale della calandratura sulla portata di massa teorica varia tra il 12,5 e il 14,4% per diverse lunghezze della vite di 90 mm di diametro di un estrusore bivate controrotante. Questo rapporto non cambia in maniera sostanziale all'aumentare della lunghezza del passo della vite; tuttavia, la quantità del flusso di perdite per calandratura totale aumenta con l'aumentare della lunghezza del passo della vite.

La perdita del gap tetraedrico Q_t , è la perdita di portata che si verifica nello spazio esistente tra le spire adiacenti delle due viti, la cui forma in sezione è approssimativamente di forma tetraedrica. Janssen ha sviluppato un modello semplificato per il flusso di dispersione nel gap tetraedrico utilizzando l'analisi dimensionale e l'analisi di regressione delle misurazioni. Quel modello semplificato può essere scritto in una formula come:

$$Q_t = \frac{\Delta p * R^3}{\eta} * 0.0054 * \left(\frac{H}{R}\right)^{1.8} * \left(\theta + 2 * \left(\frac{\epsilon + \sigma * \tan\theta}{H}\right)^2\right)$$

dove ϵ è la larghezza dello spazio laterale e σ è lo spazio di calandratura. C'è un solo spazio tetraedrico per ogni camera a forma di C. Tutti i parametri utilizzati nel calcolo sono visibili nella figura sottostante, con valori rappresentativi riportati nella tabella seguente.



Parametri geometrici per il calcolo delle perdite nel gap tetraedrico (Jenssen, 1978)

Nel 1995 T. Li, ha riscontrato che il flusso di dispersione tetraedrica rappresentava circa l'1% della produzione teorica per un *estrusore bivate controrotante con intermeshing* (ICRTSE) di diametro 34 mm. Allo stesso modo, Kajiwara nel 1996 ha scoperto che il flusso di gap tetraedrico era dell'1,6% della portata totale di massa per una spirale di un estrusore ICRTSE da 40 mm di diametro. Sperimentalmente è stato riscontrato che il flusso di dispersione tetraedrica sulla portata di massa teorica variava tra l'1,4 e il 12% per lunghezze di passo delle viti diverse per un ICRTSE di 90 mm di diametro. Questo rapporto aumenta con l'aumentare della lunghezza del passo della vite, specialmente per i settori con spire sottili.

S	Lunghezza passo vite	Mm	Caso 1	75
			Caso 2	90
			Caso 3	105
			Caso 4	135
Qt	Perdita nel gaptetraedrico	kg/h	Caso 1	6.59
			Caso 2	17.56
			Caso 3	42.4
			Caso 4	158.84
Qt/Qth	Perdite totali gap tetraedrico / Portata di massa totale teorica		Caso 1	0.014
			Caso 2	0.026
			Caso 3	0.048
			Caso 4	0.12

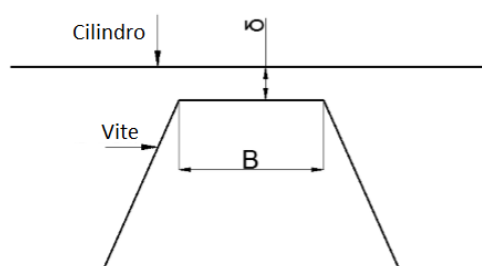
Tabella delle perdite totali per gap tetraedrico

La perdita di portata nel gap tra la cresta delle spire della vite ed il cilindro, Q_f , è stata sviluppata da Jenssen in un modello analitico per prevedere le perdite di questa zona. L'equazione analitica può essere scritta come:

$$Q_f = (2\pi - \alpha) R \left\{ \frac{2\pi RN\delta}{2} + \frac{\delta^3}{6\eta W_f} \left[3\eta \frac{2\pi RN}{H^2} * \left(\frac{S}{i} - W_f \right) + \Delta P \right] \right\}$$

dove α è l'angolo di sovrapposizione in radianti e ΔP è la caduta di pressione dovuta alla testa di estrusione; ΔP sarà zero se non vi sarà la testa montata alla fine dell'estrusore. Il valore di Q_f nell'equazione precedente deve essere moltiplicato per due per ottenere il flusso di perdita totale di portata nel gap tra la cresta delle spire della vite ed il cilindro a causa della presenza di due viti.

I parametri geometrici e i parametri di progettazione sono indicati nella figura e nella tabella seguenti.



Schema del gap tra cresta delle spere vite e cilindro estrusore

Varie prove sperimentali effettuate nei primi anni 90 del XX secolo, hanno rilevato che il flusso di dispersione del gap tra spire vite e cilindro, era circa il 7% della portata teorica per un estrusore bivate controrotante con intermeshing di 34 mm di diametro. È stato osservato che il flusso di dispersione totale del gap sulla portata di massa teorica variava tra il 5,7 e il 16,4% per diverse lunghezze del passo della vite di 90 mm di diametro viti. Questo rapporto aumenta con la riduzione della lunghezza del passo della vite, specialmente per le viti aventi le spire di elevato spessore.

S	Lunghezza passo vite	mm	Caso 1	75
			Caso 2	90
			Caso 3	105
			Caso 4	135
Qf	Perdita nel gap vite - cilindro	kg/h	Caso 1	75.14
			Caso 2	75.18
			Caso 3	75.24
			Caso 4	75.27
Qf/Qth	Perdite totali gap vite-cilindro / Portata di massa totale teorica		Caso 1	0.164
			Caso 2	0.112
			Caso 3	0.085
			Caso 4	0.057

Tabella delle perdite totali per il gap vite - cilindro

La perdita di portata nel gap laterale è l'ultimo tipo di gap che produce delle perdite, le quali si verificano sui fianchi delle spirali. Il modello analitico sviluppato da Janssen per questo flusso di perdite nel gap laterale, Q_s , è stato sintetizzato nella formula seguente:

$$Q_s = \pi N(2R - H) (H - \sigma)(\epsilon + \sigma \tan(\theta))$$

Poiché vi sono quattro zone laterali per camera a forma di C, i valori di Q_s nell'equazione precedente, devono essere moltiplicati per quattro per ottenere il flusso di perdite di gap laterale totale di un estrusore bivate.

Le prove sperimentali hanno rilevato che il flusso di dispersione del gap laterale è del 91% della portata totale di massa per un estrusore bivate controrotante con viti di 40 mm di diametro. Il flusso di dispersione del gap laterale diventa prevalente nell'estrusore controrotante quando il rapporto tra larghezza della spira e larghezza del canale diminuisce, cioè quando viene utilizzato un elemento di trasporto sottile.

In questo studio, gli elementi di trasporto della vite erano elementi di trasporto spessi per i casi 1 e 2 ma erano elementi di trasporto sottili per i casi 3 e 4. È evidente dalla tabella seguente, che l'influenza del flusso di dispersione del gap laterale diventa estremamente importante per gli elementi di trasporto sottili. Il flusso di dispersione del gap laterale totale sulla portata della massa teorica varia tra il 10% e il 41% per diverse lunghezze della vite di 90 mm di diametro. Questo rapporto aumenta con l'aumentare della lunghezza del passo della vite. Inoltre, il flusso di dispersione del gap laterale è il flusso di perdita sicuramente dominante rispetto a tutti gli altri tipi di flussi di dispersione, specialmente per i settori di vite con spirali sottili.

S	Lunghezza passo vite	mm	Caso 1	75
			Caso 2	90
			Caso 3	105
			Caso 4	135
Q _s	Perdita nel gap laterale	kg/h	Caso 1	49.68
			Caso 2	171.34
			Caso 3	294
			Caso 4	536.33
Q _s /Q _{th}	Perdite totali gap laterale / Portata di massa totale teorica		Caso 1	0.1
			Caso 2	0.25
			Caso 3	0.33
			Caso 4	0.41

Tabella delle perdite totali per il gap laterale

Il modello semplificato del calcolo della portata totale in un estrusore bivate controrotante per viti a doppio principio (ovvero di due spire per ogni giro), idealmente segue un'equazione di bilancio della massa:

$$Q_{total} = Q_{th} - Q_t - 2Q_f - 4Q_c - 4Q_s$$

In cui:

- Q_{total} è la portata totale della massa,
- Q_t è il flusso di dispersione tetraedrico,
- Q_f è il flusso di dispersione del gap delle spirali,
- Q_c è il flusso di dispersione di calandratura
- Q_s è il flusso di perdite del gap laterale.

Le portate totali di massa sono mostrate nella tabella seguente:

S	Lunghezza passo vite	mm	Caso 1	75
			Caso 2	90
			Caso 3	105
			Caso 4	135
Qtotal	Perdita totale di massa (compresi i flussi di perdita)	kg/h	Caso 1	259.32
			Caso 2	313.63
			Caso 3	353.82
			Caso 4	367.79
Qtotal/Qth	Perdite totali di massa / Portata di massa totale teorica		Caso 1	0.566
			Caso 2	0.468
			Caso 3	0.401
			Caso 4	0.281

Portata totale di massa (compresi i flussi di perdita) per varie lunghezze di passo delle viti

Si può vedere che la portata totale di massa aumenta gradualmente aumentando la lunghezza del passo della vite. L'efficienza di pompaggio di un estrusore bivate controrotante è un parametro critico per poterne misurarne le prestazioni. L'efficienza di pompaggio è definita come il rapporto tra la portata totale di massa e la portata teorica.

Il flusso di massa totale sulla portata di massa teorica (efficienza di pompaggio) varia tra il 28% e il 56% per diverse lunghezze di passo della vite di 90 mm di diametro. L'efficienza di pompaggio diminuisce con l'aumentare della lunghezza del passo della vite, questo accade perché gli spazi tetraedrici e laterali diventano sempre più grandi quando il passo delle viti aumenta. In pratica, questi vuoti causano un maggiore flusso di dispersione.

Il rapporto tra larghezza della spirale (spessore) e larghezza del canale è un importante parametro geometrico. In quest'analisi, sono stati utilizzati dei rapporti di larghezza spirale/larghezza canale di 0,875 - 0,636 - 0,5 - 0,35. La tabella seguente indica che la portata di massa totale aumenta solo leggermente diminuendo il rapporto tra la larghezza della spirale e la larghezza del canale.

Wf/Wc	Spessore spirale / Larghezza canale	mm	Caso 1	0.875
			Caso 2	0.636
			Caso 3	0.5
			Caso 4	0.35
Qtotal	Perdita totale di massa (compresi i flussi di perdita)	kg/h	Caso 1	259.32
			Caso 2	313.63
			Caso 3	353.82
			Caso 4	367.79

Portata totale di massa (compresi i flussi di perdita) per vari rapporti spessori spire-larghezza canale viti

Inoltre, la sperimentazione ed i risultati ottenuti, dimostrano che l'efficienza di pompaggio aumenta con l'aumentare del rapporto “spessore spirale/larghezza-canale”. I settori di vite con spirali più spesse hanno un comportamento di pompaggio migliore rispetto ai settori con spirali più sottili.

Velocità della vite	Passo della vite	Portata totale di massa (incluse le perdite di flusso)
N	S	Q _{total}
giri/min.	mm	kg/h
30	75	259.32
60		519.53
120		1039.08
30	90	313.63
60		628.93
120		1257.86
30	105	353.82
60		710.31
120		1420.63
30	135	367.79
60		740.96
120		1481.93

Portata totale di massa (compresi i flussi di perdite) per viti di vari diametri

L'ultimo parametro che è stato analizzato in questo studio è stata la velocità di rotazione delle viti. Sono state selezionate delle velocità di 30, 60 e 120 giri/min. per comprendere la loro influenza sul comportamento di pompaggio di un estrusore bivate controrotante. Le portate di massa totali, Q_{total}, sono indicate nella tabella precedente per le varie velocità delle viti.

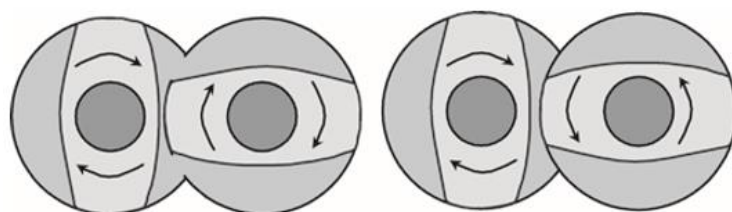
Si può vedere che la portata totale, Q_{total}, aumentata linearmente con la velocità di rotazione delle viti; tuttavia, l'efficienza di pompaggio non cambia granché con il variare della velocità di rotazione delle viti. Il motivo è che mentre la portata totale, Q_{total}, aumenta linearmente con la velocità della vite, la portata teorica, Q_{th}, aumenta anch'essa linearmente nello stesso identico modo.

Questa prova sperimentale evidenzia che il rapporto tra la perdita di portata e la perdita totale non cambia quasi mai con il variare della velocità delle viti per un estrusore bivate controrotante.

Tipologie di viti di estrusione

La differenza tra gli estrusori bivate corotanti e controrotanti è il verso di rotazione di una vite rispetto all'altra. Negli estrusori corotanti, entrambe le viti ruotano nella stessa direzione, mentre negli estrusori controrotanti, una vite ruota in senso orario e l'altra ruota in senso antiorario. Con le viti corotanti, entrambe le viti hanno le spirali in senso destrorso o sinistrorso, a seconda della rotazione della vite (oraria o antioraria).

Negli estrusori controrotanti, una vite ha la spirale destrorsa e l'altra ha la spirale sinistrorsa. Il flusso del polimero in un estrusore con viti completamente compenetranti e corotanti crea un percorso a figura di “8 in orizzontale” attorno ai noccioli delle viti, anche se il materiale non passa tra le viti. Questo genera delle regioni ad alta e bassa pressione per il materiale vicino alla sommità del cilindro dell'estrusore. Il flusso del polimero in un estrusore controrotante viene forzato tra le due viti, generando una regione ad alta pressione sul gap, dove il materiale viene forzato tra le viti e una regione di bassa pressione all'uscita del gap.



Coppia di viti corotanti (SX) e controrotanti (DX)

Oltre a identificare gli estrusori bivate in base al senso di rotazione delle viti, si possono distinguere gli estrusori in base la distanza che intercorre tra le due viti; essi possono essere con viti completamente compenetranti, parzialmente compenetranti o non compenetranti. Il flusso del materiale fuso e lo sforzo di taglio generato su di esso, dipendono dalla compenetrazione delle due viti.

Il profilo delle viti può essere definito come aperto o chiuso, in conseguenza che il materiale possa fluire in una determinata direzione. Se il materiale può fluire in direzione longitudinale rispetto al canale di alimentazione della testa, la vite si definisce “a profilo aperto” nella direzione della lunghezza; teoricamente il materiale può spostarsi da un canale al canale successivo, consentendo il flusso del fuso in direzione longitudinale.

Se il materiale non può fluire in direzione longitudinale, la vite viene definita “a profilo chiuso”. Nel caso invece di una coppia di viti controrotanti e parzialmente compenetranti, viene comunque considerata a profilo aperto in quanto essa permette sempre al materiale fuso di fluire sia in senso longitudinale che trasversale.

Con le viti corotanti completamente compenetranti, il materiale non può passare tra le viti, in quanto una vite gira in senso orario mentre l'altra gira in senso antiorario, impedendo il flusso incrociato del materiale fuso; pertanto, viene considerata come una vite “a profilo chiuso”.

La tabella alla pagina seguente mostra le varie configurazioni di viti per estrusori bivate che consentono il flusso del materiale assialmente e attraverso il canale e quelle che non lo consentono. Il flusso di dispersione normale causato dal gioco meccanico tra le due viti non è considerato nel computo del flusso di materiale.





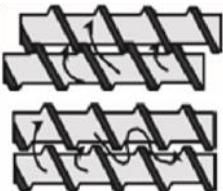


Interasse viti	Flusso materiale	Controrotante	Corotante
compenetranti	chiuso in senso longitudinale e trasversale		Impossibile
	aperto in senso longitudinale e chiuso trasversalmente	impossibile	
	aperto in senso longitudinale e trasversale	possibile ma non pratico	settori a lobi e miscelatori
parzialmente compenetranti	aperto in senso longitudinale e chiuso trasversalmente		impossibile
	aperto in senso longitudinale e trasversale		
non compenetranti	aperto in senso longitudinale e trasversale		

Tabella configurazione delle coppie di viti di estrusione per bivate

Le configurazioni delle viti sono di tipo aperto al flusso incrociato (o longitudinale) è direttamente correlato all'efficienza di trasporto, miscelazione e pompaggio in un particolare estrusore. Se la lunghezza assiale è chiusa, il percorso lungo la vite viene diviso in aree isolate senza la possibilità di flusso nella direzione assiale. Il flusso incrociato aperto consente un percorso del materiale attorno alla vite e il polimero scorre nella direzione radiale, poiché viene trasferito avanti e indietro tra le viti.

Se la direzione trasversale è chiusa, il materiale non può fluire tra le viti adiacenti, risultando impossibile un flusso nella direzione radiale. Quando sia la lunghezza che il flusso incrociato sono aperti, si genera una buona miscelazione distributiva insieme ad un basso incremento di pressione.

Se in entrambe le direzioni di flusso incrociato, longitudinale e trasversale, sono chiuse, si ottiene una buona miscelazione dispersiva con una buona generazione di pressione. Gli estrusori bivate con viti non compenetranti sono aperti sia assialmente che trasversalmente, indipendentemente dal fatto che l'estrusore si stia corotante o controrotante.

I parametri da valutare con attenzione per la progettazione delle viti sono fondamentalmente i seguenti:

- Il tempo di permanenza, che è il tempo che il polimero, gli additivi o altri componenti di formulazione impiegheranno per attraversare l'estrusore, dall'alimentazione alla testa.
- La distribuzione del tempo di permanenza, che è il tempo più breve o più lungo che le diverse particelle impiegano per attraversare l'estrusore.
- La dispersione, che è la miscelazione delle particelle disperdendole uniformemente in tutto il fuso.
- Il trasferimento di calore, che è la capacità dei riscaldatori di trasferire il calore nel materiale in lavorazione per creare un profilo di temperatura uniforme in tutto il fuso.
- Il degasaggio, che è la capacità dell'estrusore di rimuovere gli elementi volatili o l'umidità attraverso una o più aperture di sfiato lungo il cilindro di estrusione.
- Il pompaggio, che è ciò che fornisce una pressione di fusione e di plastificazione uniforme ed un'alimentazione continua di materiale alla testa.
- L'autopulizia, che avviene in un settore della vite che si interseca e rimuove il polimero dall'elemento della vite adiacente.
- La suddivisione in zone, che sono delle aree specifiche dell'estrusore che raggiungono obiettivi specifici nel processo di estrusione come fusione, miscelazione, alimentazione, ecc.
- La velocità di uscita, che si misura nella velocità di produzione o i kg/ora che possono essere erogati da uno specifico diametro di estrusore con una specifica potenza installata.
- La miscelazione distributiva, che distribuisce uniformemente tutti i componenti e la temperatura di fusione nell'estruso.

Gli estrusori bivate per la lavorazione delle materie plastiche, si sono evoluti negli ultimi 60 anni passando da una disposizione delle viti da sovrapposte ad una configurazione a viti affiancate e da una alimentazione esclusivamente da polveri ad una alimentazione con molti altri tipi di materiali come granuli, polveri e liquidi. I primi estrusori bivate avevano viti di estrusione con i settori di trasporto a tre lobi, con accoppiata una motorizzazione avente potenza e coppia limitata ed un riduttore di piccole dimensioni.

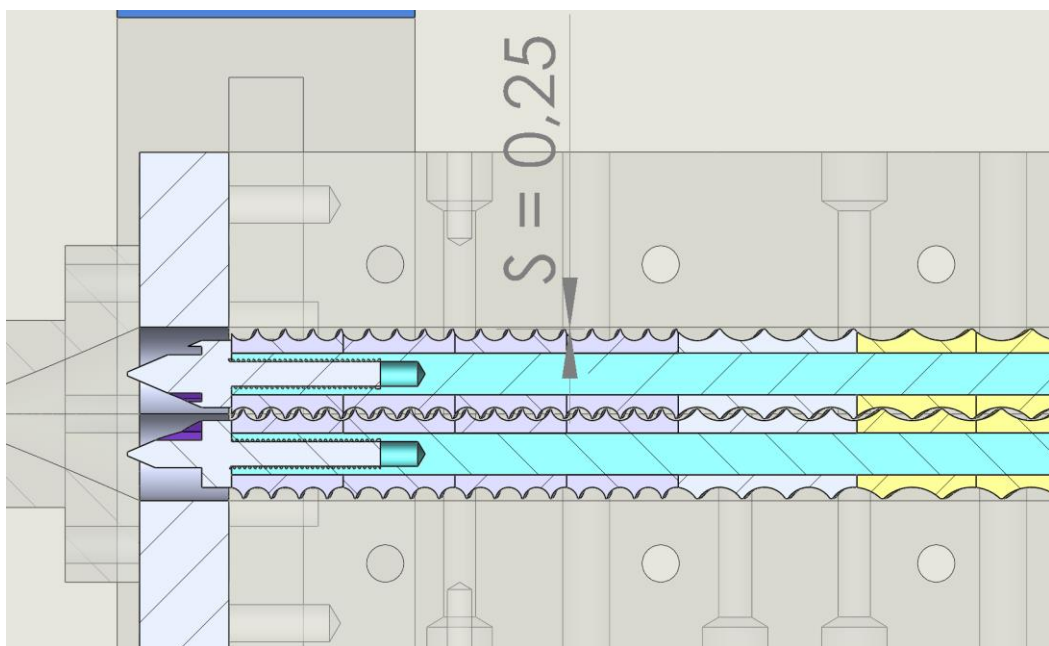
I settori vite a tre lobi sono stati sostituiti progressivamente con i settori a due lobi aumentando così il volume libero e la capacità di produzione. Conseguentemente, le viti sono state accoppiate a motorizzazioni più potenti e a riduttori più grandi in grado di erogare una coppia superiore alle viti e consentendo una distanza maggiore dall'asse centrale del cilindro di estrusione, con un conseguente maggior volume libero all'interno del cilindro di estrusione.

La somma delle modifiche effettuate nell'estrusore ha consentito un aumento notevole del tasso di produttività. Con i settori a vite compenetranti, la distanza dall'asse centrale dell'albero e il diametro della vite determinano il volume libero, le velocità di taglio e il diametro dell'elemento della vite esterno-interno (D_o/D_i). La profondità del canale di trasporto deve essere tale da fornire uno spessore sufficiente tra il diametro interno del settore a vite e l'albero, per poter trasferire tutta la coppia erogata dal motore alle viti ed una o due grandi linguette tagliate negli elementi a tre lobi trasferiscono la coppia.

Nel sistema con due lobi, lo spessore della parete è troppo sottile per poter usare delle grandi chiavette. Per ovviare a questo inconveniente, sono stati sviluppati diversi sistemi per trasferire la coppia del motore con le pareti degli elementi a vite più sottili.

La figura di esempio seguente mostra una coppia di viti, in essa si nota la distanza tra la spirale ed il “nocciolo” della vite e la distanza dalla parete del cilindro di estrusione. Le profondità del canale aperto tra la vite e la parete del cilindro (meno lo spazio nel canale occupato dalle spirali della vite adiacente) più lo spazio tra i settori di miscelazione o di altri elementi e la parete del cilindro, compongono il volume libero dell'estrusore.

Il volume libero dell'estrusore è la misura dello spazio disponibile nel cilindro di estrusione per contenere il pellet, la polvere, i rinforzi, i riempitivi e/o fusione del polimero con una specifica configurazione a vite.



Distanza “spirali vite – cilindro” per la misura del volume libero

Il volume libero dell'estrusore è dato dall'equazione:

$$V_o = A_o \times L$$

dove V_o = Volume libero

A_o = Area aperta dell'elemento a vite

L = Lunghezza della vite

A_o può essere calcolato per ciascun elemento a vite usando l'equazione

$$A_o = A_b - A_s$$

dove A_b = area cilindro di estrusione

A_s = area viti di estrusione

Un maggiore volume libero offre all'estrusore una maggiore capacità produttiva. Il volume libero è direttamente correlato al rapporto D_o/D_i e alla distanza dalla linea centrale dell'albero. Il volume libero è proporzionato rispetto alla coppia dell'estrusore. Gli alberi delle viti devono dimensionati adeguatamente per essere in grado di trasferire la coppia disponibile del motore attraverso le viti per elaborare una specifica quantità di materiale.

All'aumentare del volume libero dell'estrusore, nel cilindro dell'estrusore è disponibile più spazio libero, risultante dai canali delle viti più profonde. Aumentando la profondità dei canali vite, il metallo tra il fondo del canale e l'albero della vite diminuisce, fornendo una minore superficie utile per trasferire la coppia del motore a ciascun elemento a vite. Di conseguenza, il rapporto del diametro dell'elemento a vite esterno interno raggiunge un valore ottimale. Con bassi valori D_o/D_i c'è un volume libero molto piccolo nell'estrusore e la distanza dalla parete dell'albero della vite al fondo del canale è abbastanza elevata.

In questo scenario è possibile trasferire una coppia elevata dal motore alla vite, ma è necessaria solo una coppia limitata poiché il materiale contenuto nell'estrusore è abbastanza poco. Con rapporti D_o/D_i elevati, è disponibile un volume maggiore di estrusore, che consente di elaborare più materiale. Tuttavia, lo spessore della parete dell'elemento vite tra il fondo del canale e la parete dell'albero diminuisce, rendendo più difficile il trasferimento della coppia dal motore alle viti, richiesta per l'elaborazione. La distanza dall'asse centrale tra gli alberi diventa importante perché distanze minori limitano la dimensione del cuscinetto reggispira nel riduttore, riducendo così la coppia che può essere trasferita dal motore agli alberi delle viti.

Si è dimostrato che alberi per viti più grandi, possono trasferire più coppia ma hanno un volume libero inferiore nel cilindro e una maggiore distanza dalla linea centrale. Di conseguenza, viene elaborato meno materiale quando sono presenti alberi di diametro maggiore. È necessario operare un bilanciamento delle dimensioni, in quanto alberi delle viti più piccoli portano a un volume libero maggiore, mentre alberi, cuscinetti reggispira, la distanza dalla linea centrale e la sede per la chiavetta, devono essere calcolati con precisione per essere in grado di gestire una coppia maggiore.

Se l'estrusore passa dalle viti con settori a tre razze e tre lobi alle viti con due razze e due lobi, il volume libero aumenta. Aumentando sia il rapporto D_o/D_i che la distanza dalla linea centrale, il volume libero aumenta ulteriormente. La relazione sul volume libero relativa al numero di lobi e al rapporto D_o/D_i di vari estrusori commerciali è mostrata nelle seguenti equazioni:

$$a = (D_o + D_i) / 2$$

$$h = (D_o - D_i) / 2$$

dove a è la distanza dall'asse centrale ed h è l'altezza della spirale dal nocciolo della vite.

All'aumentare del volume libero, la coppia dell'estrusore deve anch'essa aumentare per poter elaborare la portata aggiuntiva di materiale. Con le pareti dei settori vite più sottili tra la superficie dell'albero della vite e il fondo del canale, risulta complesso trasferire la maggiore coppia erogata dai motori più potenti e dai riduttori più grandi, alle viti. Le prime macchine con viti a tre lobi avevano una grande sede per una chiavetta rettangolare su ciascun albero. Con le macchine a due razze e due lobi, vennero utilizzate due chiavette su due sedi poste a 180° tra loro all'interno del settore vite.

Man mano che le pareti interne dei settori vite si assottigliavano con l'aumentare del rapporto D_o/D_i , la sede per chiavetta è stata sostituita da quattro barre tonde e poi da alberi esagonali, ottagonali o alberi scanalati, a seconda del costruttore dell'estrusore.

L'aumento di volume libero richiede una coppia del motore più elevata, poiché la maggior parte dell'energia per fondere la plastica viene fornita dal motore. All'aumentare del materiale presente nell'estrusore, l'energia per elaborare la plastica deve aumentare proporzionalmente. La coppia erogata durante la rotazione si ricava dalla potenza divisa per la velocità angolare, dove la velocità angolare è definita come giri al minuto moltiplicati per 2π per trasformare la velocità angolare in radianti/minuto. La coppia viene così calcolata dall'equazione:

$$\text{Potenza} = C \times \text{coppia} \times 2\pi N$$

dove C = fattore di conversione (1 CV = 33.000 ft.-lb./min.) P = Potenza data in cavalli (CV) N = Velocità della vite indicata in giri/min Coppia = lb.-ft. L'aumento della potenza del motore fornisce una coppia maggiore a una velocità di rotazione della vite costante. L'elevata velocità di rotazione della vite si traduce in una maggiore potenza, consentendo di alimentare l'estrusore con più materiale nell'unità di tempo.

Gli estrusori bivate, sempre alimentati a "bocca affamata", funzionano ad alti regimi per generare un'energia sufficiente per convogliare, fondere, miscelare e pompare il polimero fino alla testa. Oltre all'aumento del volume libero, i moderni estrusori bivate possono funzionare a regimi molto elevati. L'energia specifica, misurata in kW ora/kg, è correlata alla quantità di materiale che può essere elaborata in base alla velocità della vite e alla potenza assorbita. All'aumentare della velocità della vite, la potenza aumenta, consentendo così di elaborare più materiale.

A bassa velocità di rotazione delle viti, c'è poca energia disponibile; di conseguenza, se l'estrusore viene alimentato in maniera eccessiva, il motore e l'azionamento si arrestano andando in blocco perché vengono superati i requisiti di coppia e potenza del sistema. Ciò significa che quando si avvia un estrusore alimentato a bocca affamata, le viti vengono avviate ed il materiale deve venire alimentato lentamente nell'estrusore. Una volta che il materiale inizia ad uscire dalla testa, la velocità delle viti viene progressivamente aumentata prima che venga inviato troppo materiale all'estrusore e monitorando costantemente il valore della coppia.

La quantità di materiale che può essere alimentata dipende dalla potenza disponibile e dalla velocità di rotazione delle viti. Durante il funzionamento, la coppia delle viti viene monitorata e mantenuta al di sotto di un determinato valore limite.

La relazione dei requisiti di potenza e di coppia dipende da quanto vengono riempiti i canali tra le spire delle viti. Poiché l'estrusore viene alimentato "a bocca affamata" e la velocità delle viti funziona ad un numero di giri sufficiente per rimuovere tutto il materiale da alimentare, la maggior parte degli elementi a vite non è piena. A seconda degli elementi della vite e della configurazione della vite, alcune sezioni della vite possono essere completamente riempite. Se il riempimento della vite è del 30%, il volume libero totale disponibile tra la vite e la parete del cilindro è del 70%, dato che il polimero occupa solo il 30% del volume totale.

Ciascun canale di trasporto può essere riempito solo parzialmente con polimero solido o fuso, a seconda del passo dell'elemento della vite e della configurazione della vite. Il riempimento percentuale in qualsiasi posizione lungo la vite dell'estrusore è una funzione della velocità di avanzamento, del numero di giri e del passo della vite, della configurazione della vite e dei gradienti di pressione lungo la vite.

Nel calcolo delle velocità di taglio, i valori cambiano in base al riempimento. Il materiale nell'estrusore presenta una distribuzione del tempo di permanenza basata sul disegno del profilo della vite, sul tipo di estrusore bivate, sul rapporto lunghezza/diametro (L/D), sulla velocità della vite e sulla velocità di avanzamento. Il tempo medio di permanenza è definito dal tempo indicato dall'equazione:

$$T = V/Q$$

dove V = volume libero utilizzato Q = portata volumetrica per unità di tempo.

La distribuzione del tempo di permanenza può essere ridotta o ampia. Gli estrusori bivate controrotanti e a maglie incrociate hanno la distribuzione del tempo di permanenza più ristretta, seguita da vicino dall'estrusore bivate corotante con viti compenetranti. Gli estrusori bivate controrotanti con viti non compenetranti hanno la più ampia distribuzione del tempo di permanenza.

I settori della vite hanno una specifica denominazione che li identifica nelle loro principali caratteristiche geometriche che influenzano il processo di estrusione.

In una vite a due lobi, ogni elemento di trasporto contiene due spirali, con gli elementi chiamati "elementi a due rampe". Sono due i numeri caratteristici che rappresentano il passo e la lunghezza dell'elemento (settore vite) e che identificano gli elementi di trasporto.

Esempio A: Un settore vite di trasporto tipo 45/45.

Il primo numero rappresenta il passo o la lunghezza dell'elemento a vite richiesto per una determinata spirale per compiere un giro completo attorno al nocciolo della vite,

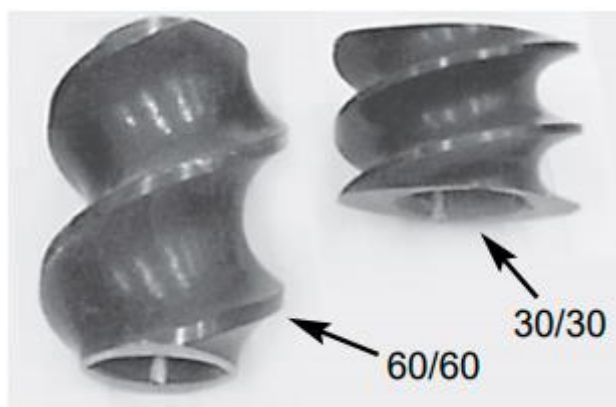
mentre il secondo numero rappresenta la lunghezza del settore vite. Di conseguenza, il passo è di 45 mm, cioè sono necessari 45 mm per una spirale per completare un giro attorno al settore, ed il settore è lungo 45 mm.

Esempio B: Un settore vite di trasporto tipo 60/60.

Significa che il settore vite ha un passo di 60 mm, cioè richiede 60 mm di lunghezza della vite per far compiere alla spirale un giro completo attorno alla vite, ed il settore della vite è lungo 60 mm.

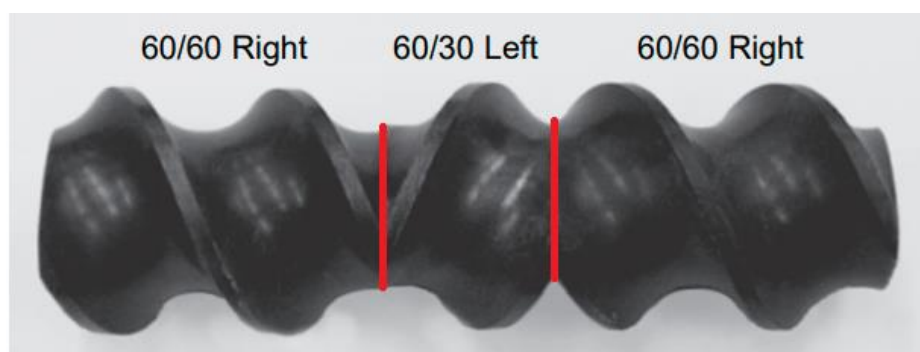
Esempio C: Un settore vite di trasporto tipo 90/90.

Come per l'esempio precedente, significa che il settore vite ha un passo di 90 mm, cioè richiede 90 mm di lunghezza della vite per far compiere alla spirale un giro completo attorno alla vite, ed il settore della vite è lungo 90 mm.



Settori vite di trasporto tipo 60/60 e 30/30

Vi sono anche dei settori di vite che hanno geometrie diverse, rispetto a quelle omogenee precedentemente illustrate, oppure sono una combinazione di varie tipologie.



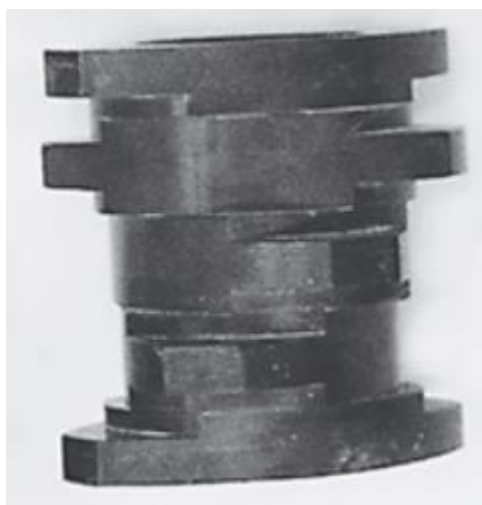
Settore di vite di trasporto composta da un tipo 60/60 dx + uno 60/30 sx + uno 60/60 dx

Gli elementi di trasporto possono essere a passo destro o sinistro per trasportare il materiale in avanti o indietro nel cilindro di estrusione; molto spesso vengono inseriti settori vite a passo destro e a passo sinistro sulla stessa vite; questo serve per “frenare” il fuso e creare una sorta di “guarnizione” necessaria, per esempio, per isolare la zona di devolatilizzazione, ma anche per eseguire una miscelazione più aggressiva.



Settore di miscelazione tipo 45/5/30 destro

Gli elementi di miscelazione, chiamati settori di masticazione, hanno dischi di forma ellittica posti in diverse configurazioni geometriche attorno al settore. Viene aggiunto un ulteriore numero alla nomenclatura del settore di miscelazione, che indica il numero di dischi. Un settore di miscelazione 45/5/30 significa che ha il secondo disco ruotato di 45° rispetto al primo disco con un totale di 5 dischi e una lunghezza di 30 mm.



Settore di miscelazione tipo 45/5/45 destro

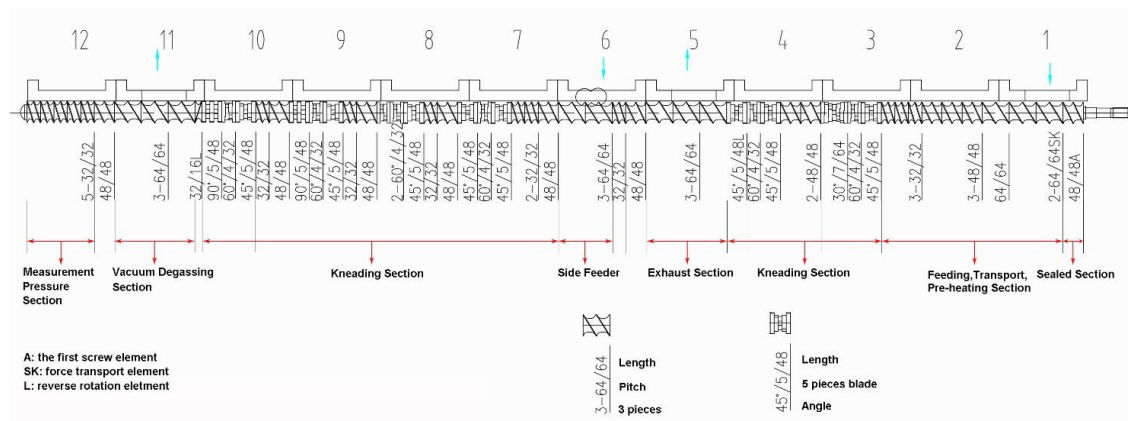
Un settore di miscelazione 45/5/45 significa che ha il secondo disco ruotato di 45° con un totale di 5 dischi in una lunghezza di 45 mm. Simile agli elementi di trasporto, ci sono i settori per miscelare destri e sinistri, con i dischi che ruotano in senso orario e antiorario. I settori di miscelazione neutri hanno il secondo disco a 90° di rotazione dal primo disco. Questi sono designati come 90/3/15, in cui il secondo disco si trova a 90° dal primo, con tre dischi e una lunghezza totale di 15 mm. Esistono comunque anche molti altri tipi di elementi a vite speciali da diversi produttori di macchine, ognuno ha sviluppato la propria tecnologia specifica.

Nel caso di estrusori bivate corotanti, alcuni funzionano con le loro viti che ruotano in senso orario, mentre altri funzionano in senso antiorario. Quando le viti ruotano in senso orario con gli elementi di trasporto destri, essi spostano il materiale dalla gola di alimentazione alla testa, mentre con degli elementi di trasporto sinistri, essi spostano il materiale indietro verso la gola di alimentazione. Se le viti corotanti ruotano in senso antiorario, gli elementi sinistri trasportano il materiale dalla gola di alimentazione verso la testa, mentre gli elementi destri riportano il materiale verso la gola di alimentazione.

Per gli estrusori controrotanti, una vite ruota in senso orario e l'altra in senso antiorario, di conseguenza gli elementi a vite sulla vite rotante in senso orario sono elementi destrorsi per convogliare il materiale verso la testa, mentre la vite che ruota in senso antiorario utilizza elementi di trascinamento sinistrorsi per spostare il materiale verso la testa.

Gli estrusori bivate paralleli, corotanti e con viti compenetranti sono gli estrusori bivate più comuni disponibili sul mercato e sono prodotti da diverse aziende in tutto il mondo. Per fornire l'elevata coppia e il numero di giri richiesti dalle viti con una portata così elevata, il motore ed il riduttore hanno quasi lo stesso ingombro del cilindro di estrusione.

Le zone delle viti e la loro funzione



Composizione delle viti

Le viti in un estrusore bivate adottano un design modulare, combinato da albero scanalato e settori a spirali calettati pezzo per pezzo. L'elemento della vite è costituito principalmente da settori di trasporto e da settori di miscelazione.

Settore di trasporto (esempio su viti d.48): passo grande 64 mm, passo medio 48 mm, passo piccolo 32 mm.

Settore di miscelazione: normalmente maggiore è l'angolo, maggiore è la forza di taglio. Angoli tipici 30°, 45°, 60°, 90°.

Zona 1. Sezione di tenuta

Come primo settore delle viti, viene inserito un settore con spirali a passo normale, in modo da impedire che il materiale fuoriesca dal lato dei codoli delle viti e creare così una sigillatura sulla parte posteriore delle viti. Il materiale viene portato in avanti molto velocemente.

Zona 2. Sezione di alimentazione principale

In questa zona, vengono usati settori a spirale con passo maggiorato. L'ampio passo e il settore di trasporto della vite, assicurano che il materiale sia trasportato in avanti velocemente fino alla successiva sezione di fusione. Il passo maggiorato del settore di trasporto assicura che la bocca di alimentazione sia sempre "vuota" dal polimero che riceve, questo significa che l'estrusore viene alimentato "a bocca affamata" come deve essere per un estrusore bivate.

Una composizione della vite tipica è realizzata con settori vite diversi, per esempi assemblando un settore vite a passo grande + un settore vite a passo medio + un settore vite a passo piccolo, questa configurazione permette che il materiale sia trasportato velocemente, per poi rallentare ed aumentare la compressione e poi riempire tutta la vite per la preparazione della miscela di polimeri.

Zona 3. Sezione di miscelazione primaria (fusione e compounding)

Questa zona viene composta da una combinazione di diversi settori di miscelazione per completare la miscelazione preliminare del polimero. In questa zona si verificano dei processi termici e chimici importanti, si ha un aumento della temperatura del fuso ed una miscelazione del polimero con gli additivi od altri componenti.

La fonte di calore proviene per il 10% -20% dal riscaldamento del cilindro, mentre il rimanente 80% -90% proviene dallo sforzo di taglio e dall'attrito del granulo di materiale tra le viti ed il cilindro.

Zona 4. Sezione di devolatilizzazione

Questa zona ha un design della vite specifico, caratterizzato da un elemento di trasporto a passo largo. Utilizzando un elemento a vite con spirale sinistra, prima della bocca di sfianto, si viene a formare un riflusso di materiale per sigillare e mantenere una elevata pressione e per rimuovere le impurità volatili, i gas e i vapori.

Zona 5. Sezione di ingresso dell'alimentatore laterale (Side Feeder)

Vi possono essere uno o più sezioni di ingresso per gli alimentatori laterali, da uno fino a tre o quattro, tutto dipende dal tipo di estrusore e di miscela che si vuole ottenere e quindi di quanti additivi bisogna aggiungere in cascata.

Il design della vite comprende elementi di trasporto a passo largo per l'alimentazione, più un elemento a passo piccolo per sigillare ed aumentare la compressione del materiale prima dell'ingresso dell'alimentatore laterale.

Vengono aggiunti come additivi la fibra di vetro, la fibra di carbonio o materiali vari da riempimento.

In questa zona, la temperatura della sezione del cilindro per l'alimentatore laterale o la sezione successiva potrebbe essere più bassa rispetto alla temperatura impostata. In ogni caso, il sistema di riscaldamento e termoregolazione deve continuare a funzionare.

Zona 6. Sezione di miscelazione secondaria(compounding)

La zona è composta da settori realizzati con dei dischi di forma ellittica, posti tra loro con diversi angoli rispetto all'asse della vite. In base ai tipi di settori utilizzati, la miscelazione avverrà in maniera distributiva e dispersiva.

Screw Element Type (Example as KTE-65)	Right-handed Large Pitch Transport Element	Right-handed Small Pitch Transport Element	Left-handed Small Pitch Transport Element	Extra Wide Kneading Element	Normal Wide Kneading Element	Narrow Wide Kneading Element	Orthogonal Type Kneading Element	Forward Staggered Kneading Element	Backward Staggered Kneading Element
	 72/72	44/22 44/44	 44/22L	45°/5/72	 30°/7/72	45°/5/36	 90°/5/56	 45°/5/64	45°/5/44L 45°/5/56L
Compounding Distribution	A little	A little	Medium	Small	Medium	Good	Good	Medium	Good
Compounding Dispersion	A little	A little	Medium	Good	Medium	Small	Good	Medium	Good
Material Transportation	Fast	Slow	Backward				No	Forward	Backward

Tipologie di settori vite

Zona 7. Sezione di degasaggio sottovuoto

La zona del degasaggio è necessaria per rimuovere le impurità volatili, i gas e i vapori prodotti dal materiale di fusione ed asportati mediante una pompa a vuoto. Queste sostanze volatili devono essere estratte prima che possano raggiungere la testa di estrusione e fuoriuscire da essa provocando imperfezioni sul materiale in uscita.

Il design caratteristico della vite comprende un elemento di trasporto a passo largo. Si deve utilizzare un elemento a vite sinistrorso prima della bocca del degasaggio per formare un riflusso di materiale e mantenere un'alta pressione nel materiale fuso.

Il diametro di nocciolo della vite in questa zona si riduce in maniera sostanziale, per permettere ai gas estratti la migliore espansione per poter essere aspirati in maniera efficace dalla pompa a vuoto. Mediante una canalizzazione a tenuta, si collega la pompa ad un dispositivo di abbattimento per poter contenere l'emissione di monomero, gas nocivo, nell'ambiente.

A causa dell'estrazione delle sostanze volatili e dei gas, viene anche asportato molto calore dall'interno del cilindro. Risulta quindi necessario un accurato controllo della temperatura di questa zona.

La pompa a vuoto deve essere sufficientemente potente per assicurare una completa asportazione dei gas e delle sostanze volatili prodotte nel corso del processo di estrusione, le bolle di gas devono essere eliminate prima che il fuso inizi la fase finale di compressione nell'ultima parte delle viti, altrimenti la qualità del prodotto ne risulterà compromessa.

Zona 8. Sezione compressione e di misurazione della pressione

La fase finale che precede la fuoriuscita del fuso dall'estrusore è quella di compressione dove il polimero fuso viene nuovamente portato ad una pressione di circa 200 bar tramite settori vite a spirali con passo stretto.

Nella parte terminale del cilindro di estrusione, sul cilindro o sulla flangia di ingresso della successiva pompa melt, vi è installata una sonda di pressione collegata con il PLC per il controllo diretto del processo.

Approfondimento sull'uso del settore a spirale inversa

La caratteristica del settore vite a spirale inversa è quella di avere, rispetto all'elemento standard che ha la spirale nel senso di avanzamento dell'estrusore, la spirale in senso opposto. Poiché la spirale inversa convoglia il materiale nella direzione opposta, il settore con la spirale in avanti convoglia il materiale nella direzione di estrusione, quindi nel materiale si stabilisce un'elevata pressione sul punto di inizio del settore a spirale inversa, necessaria affinché il fuso del polimero possa superare la resistenza che viene opposta dalle spirali inverse e possa procedere in avanti, nel senso dell'estrusione.

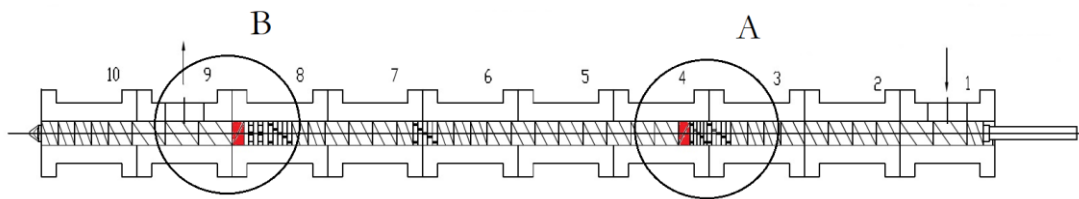
In base a particolari esigenze del processo di estrusione, nell'estrusore possono formarsi zone a pressioni diverse (pressioni differenziali) poste in zone diverse lungo l'asse delle viti di estrusione od anche comprese entro una distanza relativamente breve. Se risulta necessario l'aggiunta di un additivo liquido o di un agente schiumogeno, esso viene aggiunto in una data posizione lungo la direzione assiale della vite e deve essere aggiunto in una zona di bassa pressione.

In questa zona viene prevista un settore vite a spirale inversa, prima della zona di iniezione o di alimentazione dell'additivo, per poter formare una tenuta ad alta pressione che impedisce all'additivo liquido o all'agente espandente di fluire in direzione contraria.

La formazione di una zona di bassa pressione dietro all'elemento a spirale inversa, facilita l'aggiunta di additivi o agenti espandenti. Un settore vite a spirale inversa è posto davanti alla bocca di devolatilizzazione per creare un'alta pressione davanti alla zona di scarico ed una drastica diminuzione della pressione per facilitare la fuoriuscita dei gas.

La ragione della caduta di pressione nella spirale inversa è che l'elemento vite a spirale inversa, non ha la capacità di trasporto in avanti e l'avanzamento del materiale è ottenuto a scapito della perdita di pressione. Il valore della caduta di pressione nell'elemento vite a spirale inversa è un fattore importante che deve essere considerato durante la progettazione e nella selezione di tali elementi.

Il settore vite a spirale inversa è un elemento che crea resistenza ed un innalzamento della pressione. Davanti ad esso dovrebbe essere previsto un elemento convogliatore a spirale normale per vincere la resistenza e convogliare il materiale in direzione della testa dall'estrusore. L'aggiunta di un settore a spirale inversa provocherà un picco di pressione, l'aggiunta di due settori a spirale inversa provocherà due picchi di pressione; e procedendo in questo modo, è possibile impostare più componenti a spirale inversa secondo necessità.



Schema delle viti con settori a spirale inversa (evidenziati di colore rosso)

Lo schema evidenzia una tipica applicazione del settore a spirale inversa su una vite per estrusori bivate; il primo settore a spirale inversa (partendo dalla zona di alimentazione primaria situata a destra del disegno), viene posto subito dopo la prima zona di miscelazione (dettaglio A) mentre il secondo settore a spirale inversa viene posizionato subito dopo la seconda zona di miscelazione e prima della bocca di devolatilizzazione (dettaglio B).

CONDIZIONI DEL PROCESSO D'ESTRUSIONE

Introduzione

Le condizioni in cui avviene il processo d'estrusione del polimero sono fondamentali per l'omogeneità e la qualità del prodotto finale. La conduzione del processo richiede un'analisi costante ed istantanea, dei vari parametri che influiscono direttamente ed indirettamente sul processo di plastificazione. I parametri più importanti sono la temperatura e la pressione del melt, che sin dalle origini della tecnologia di estrusione, è stato necessario controllare e, con il progredire della tecnologia, automatizzare il processo analisi e correzione dei parametri in modo automatico. Vi sono comunque altri parametri di processo altrettanto importanti per la buona riuscita di un prodotto realizzato mediante l'estrusione e che ora andremo ad analizzare.

Il comportamento del polimero nell'estrusore

Gli obiettivi da raggiungere nel processo di estrusione sono fondamentalmente cinque:

- Creare un prodotto omogeneo per alimentare la testa di estrusione.
- Ottenere una temperatura di fusione costante.
- Elaborare il polimero a una temperatura di fusione specifica.
- Ottenere una pressione di fusione costante.
- Elaborare il polimero a una pressione di fusione specifica.

Con questi obiettivi da perseguire, il disegno delle viti e le condizioni operative sono scelti per soddisfare gli obiettivi di estrusione per ottenere un prodotto di qualità.

Profilo di pressione del melt

Durante la rotazione delle viti, il pellet di resina viene gradualmente dosato dalle spirali dei settori vite e fuso gradualmente, generando una pressione lungo il suo percorso. La progettazione delle viti richiede comunque degli ulteriori approfondimenti ed alcune indagini preliminari, specie durante l'attività di ricerca e sviluppo. Tra le viti ed il cilindro, è necessario mantenere una tolleranza opportuna tra le superfici delle spirali e la superficie interna del cilindro, questo risulta funzionale alle dimensioni dell'estrusore ed è di fondamentale importanza.

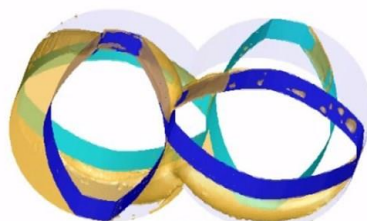
Le spirali, inoltre, sono caratterizzate da una profondità variabile, intesa come distanza tra il bordo esterno ed il nocciolo della vite. La profondità variabile viene realizzata per facilitare e consentire il trasporto costante del materiale all'interno del cilindro, tenendo conto della variabilità suo grado di fusione e della pressione generata.

Nel passaggio dalla zona di alimentazione a quella di fusione, infatti, si ha un incremento dello scorrimento del fuso e della pressione del polimero contro le spirali del settore vite, conseguente di una graduale riduzione della profondità delle spirali.

Dopo questa fase, la profondità delle spirali viene mantenuta costante, permettendo il dosaggio del polimero fuso.

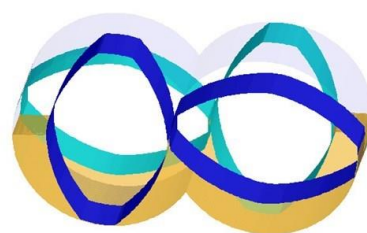
Per affrontare le evidenti criticità progettuali delle viti di un estrusore, si ricorre spesso a tecniche di simulazione numerica basate sulla Fluidodinamica Computazionale (CFD), ma anche il Metodo di Analisi degli Elementi Finiti (FEM) ed il Metodo degli Elementi Discreti (DEM) possono dare il loro contributo.

L'utilizzo di un software CAE per implementare le tecniche di simulazione, è di notevole aiuto per correttezza dell'attività di progettazione e di predizione delle reali condizioni operative. I risultati di una simulazione multifase in regime transitorio della distribuzione di una miscela e della sua qualità sono mostrati come esempio nella figura seguente.



*Simulazione multifase in regime transitorio della qualità di distribuzione della miscela
(Coperion GmbH)*

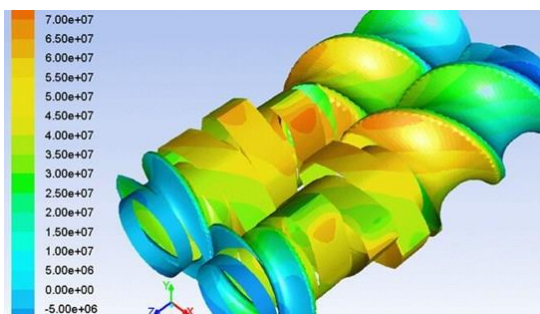
In base a quanto prescritto dalle prerogative del Design of Experiment (DOE), possiamo vedere nell'immagine seguente, una simulazione di un regime transitorio bifasico, essa consente di valutare e calcolare le sezioni della vite riempite parzialmente.



Simulazione in regime transitorio bifasica per il calcolo delle sezioni della vite riempite parzialmente (Coperion GmbH)

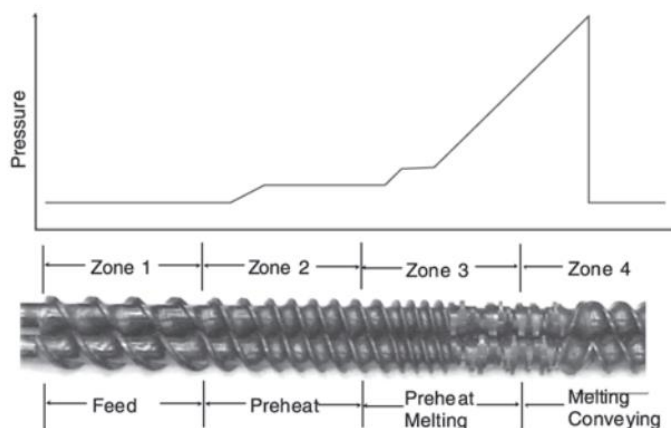
Queste tecniche di simulazione ed analisi sono abbastanza complesse e richiedono una conoscenza approfondita sia del software di verifica che dei fenomeni fisici relativi. La complessità viene ad aumentarsi quando inseriamo nel computo il contributo del calore da scorrimento e della pressione. I valori di entrambi sono crescenti fino a che il melt raggiunge la filiera della testa ed esce dalla macchina.

Sono fattori determinanti nella progettazione degli estrusori, come mostrato nei risultati della simulazione seguente, dove sono evidenziate le aree di alta pressione (di colore giallo e arancio) e quelle di pressione più bassa (di colore verde e azzurro).



Simulazione dell'incremento di pressione in un estrusore bivate (Coperion GmbH)

Le viti giocano un ruolo cruciale, infatti la dimensione del profilo vite, la produttività della macchina, i costi dei vari componenti ed il tipo di accoppiamenti cinematici scelti, sono fortemente dipendenti dalle attività di ricerca e sviluppo.



Curva delle pressioni del melt associate alla zona delle viti

Abbiamo visto che il polimero fuso all'interno dell'estrusore attraversa regioni di alta e di bassa pressione lungo il cilindro, tra la bocca di alimentazione e la filiera della testa, a seconda della configurazione della vite. I settori di miscelazione e le tenute mediante il polimero fuso, generano regioni di alta pressione lungo tutta la lunghezza della vite, mentre gli elementi di trasporto a passo largo generano aree di bassa pressione. In un'area in cui sono presenti solo elementi di trasporto, cambiando il passo delle spirali da un passo grande a un passo piccolo aumenta la pressione di fusione.

Il diagramma qui sopra, mostra una configurazione della vite nelle prime zone del cilindro di estrusione e la curva nel diagramma che rappresenta la corrispondente generazione di pressione lungo l'estrusore. La pressione del polimero fuso raggiunge il suo valore massimo in corrispondenza dell'elemento di trasporto posteriore. Per forzare il polimero fuso attraverso l'elemento di trasporto posteriore, si genera una pressione. La pressione è alta nell'area di miscelazione e bassa nell'area di devolatilizzazione.

Gli elementi di trasporto a passo ridotto all'estremità della vite aumentano la pressione del fuso allo stampo. Similmente, se realizziamo un grafico per la temperatura di fusione lungo la vite, risulterà con un profilo molto simile a quello della pressione di fusione.

In ciascuna regione ad alta pressione nel senso della lunghezza della vite, il riscaldamento dovuto al taglio aumenta, determinando una temperatura di fusione più elevata. Al termine della sezione di fusione (elemento di trasporto posteriore), la temperatura di fusione del polimero è superiore al punto di fusione o di plastificazione della stessa.

I settori di miscelazione e gli elementi di trasporto a spirale inversa, se non adeguatamente progettati, possono causare il degrado del polimero per surriscaldamento termico.

Tempo di permanenza del polimero nell'estrusore

Il **tempo di permanenza**, o tempo di residenza del polimero, è il tempo in cui ogni granulo di polimero o particella, rimane all'interno dell'estrusore durante il processo; il tempo viene considerato dall'entrata nella bocca di alimentazione fino al punto di uscita, che per convenzione è la flangia terminale dell'estrusore oppure all'uscita della testa.

Ogni profilo delle vite ha associato un tempo di permanenza del polimero che dipende da alcuni fattori, quali:

- Numero di giri delle vite.
- Numero dei settori vite di trasporto.
- Numero dei settori vite di miscelazione.
- Numero dei settori vite di trasporto posteriori.
- Numero di altri settori vite.
- Produzione in kg/ora di materiale.

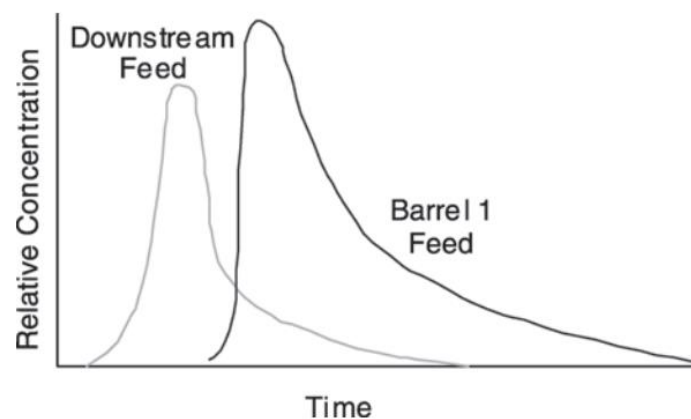


Diagramma della Curva di distribuzione del tempo di permanenza

Il diagramma rappresenta la curva di distribuzione del tempo di permanenza di un polimero che viene caricato dalla bocca di alimentazione; la seconda curva di distribuzione è invece riferita all'alimentazione di cariche ed additivi o polimeri, inseriti nell'estrusore mediante il forzatore laterale (side stuffer).

Ogni ingrediente che alimenta l'estrusore da punti differenti dalla bocca di alimentazione ha un proprio tempo di permanenza e quindi una sua curva caratteristica nel diagramma.

Il tempo di permanenza nell'estrusore è un fattore estremamente importante in quanto mette in relazione la curva di temperatura del polimero e la sua degradazione; un polimero può essere riscaldato per lungo tempo a bassa temperatura o per breve tempo ad alta temperatura, senza che si degradi.

Se invece il tempo di permanenza ad alta temperatura è troppo lungo, questo causa sicuramente la degradazione del polimero. Tempi di permanenza superiori, producono una degradazione del polimero tale da riportarlo allo stato solido a temperature elevate ed a consumare gli stabilizzatori termici.

Lunghi tempi di permanenza consumano ulteriormente gli stabilizzatori termici, compromettendo la stabilità termica del polimero. Con una coppia di viti specificatamente costruite e con una adeguata alimentazione, confrontando velocità diverse di viti, si può riscontrare che le viti a più alta velocità consentono:

- Basso tempo di residenza.
- Alta temperatura del melt.
- Coppia trasmessa più bassa.
- Migliore capacità di miscelazione.
- Con additivi e rinforzi, bassi attriti di rotazione.

Viti (giri/min.)	τ (sec.)
75	105
125	90
175	80
225	70

Tabella dei Tempi di permanenza del polimero in base ai giri delle viti

Il tempo di permanenza può essere corto o lungo, esso dipende dall'estrusore e dal polimero da elaborare. La tabella allegata qui sopra, si riferisce ad un estrusore bivate corotante con diametri di viti da 40 mm, provato con varie velocità delle viti e con una produzione di 45 kg/ora.

Il tempo di residenza viene misurato in maniera sperimentale, aggiungendo del colorante nero concentrato attraverso la bocca di alimentazione e monitorando il tempo che impiega per poter vedere il cambio di colore del polimero all'uscita della testa di estrusione.

Alla velocità di 225 giri/min il colore nero è visibile per la prima volta dopo 70 secondi, dopo altri 30 secondi il colore del polimero diventa grigio scuro ed il colore inizia a scomparire.

Poter misurare il tempo di permanenza in maniera accurata, consente una verifica sulla corretta configurazione della quantità di produzione, della velocità di rotazione delle viti e la configurazione corretta delle viti stesse. Cambiando anche uno solo di questi tre elementi, si produrrà una modifica del tempo di permanenza del polimero.

Profili di temperatura nell'estrusore.

Sono disponibili diverse opzioni per selezionare il profilo di temperatura corretto, esse vanno dalle raccomandazioni del fornitore della materia prima, all'esperienza in produzione. Con dei prodotti già testati in precedenza, l'esperienza degli operatori od uno standard documentato, le procedure operative determinano la condizione migliore di estrusione. Tuttavia, la prima volta di un nuovo prodotto da estrudere, può creare delle problematiche.

I fornitori del polimero devono allegare le schede tecniche con indicati i profili di temperatura raccomandati, le condizioni di asciugatura necessarie, il design od il tipo di testa e di filiera adatti, il profilo della vite più indicata con anche il rapporto L/D ed il numero di giri raccomandato.

Inoltre, i fornitori del polimero offrono indicazioni sul profilo ottimale della vite per gli estrusori monovite ma non raccomandano il profilo delle viti per gli estrusori bivate. Pertanto, nell'estrusore bivate è responsabilità dell'utilizzatore di sviluppare il corretto design della vite per la particolare applicazione. La base di partenza per lo sviluppo e l'ottimizzazione, può essere quella di utilizzare le linee guida per sviluppo della vite mostrate nel capitolo precedente.

Il rapporto L/D (lunghezza/diametro) è definito sulla base della matrice finale (testa/filiera) e dei requisiti dimensionali finali. Con dei nuovi materiali, il cilindro dell'estrusore, i profili di temperatura ed il numero di giri delle viti, sono variabili fino a quando la qualità del prodotto e i tassi di produzione non avrà raggiunto uno standard accettabile. Durante l'ottimizzazione del processo, le condizioni di estrusione vengono registrate con la descrizione della qualità del prodotto, in modo da poter stabilire le migliori relazioni tra il profilo della temperatura di estrusione, la velocità delle viti e la velocità di produzione con qualità del prodotto.

Adottando un approccio analitico mediante la DOE (Design of experiment) che è un metodo di approccio alla progettazione ed organizzazione sperimentale, è possibile analizzare e valutare sistematicamente la natura, gli obiettivi, gli elementi significativi degli esperimenti e dei processi su cui operano, per poter finalizzare le prove sperimentali con la massima efficacia ed ottenere il risultato migliore.

Mediante una ragionata applicazione delle tecniche DOE, è possibile ridurre in maniera significativa i costi per la realizzazione di prove sperimentali ed eseguendo delle prove pianificate in modo corretto, si possono ottenere risultati in grado di fornire informazioni utili, anche solo utilizzando delle semplici tecniche di analisi statistiche che l'analisi DOE utilizza. Se poi, integriamo l'analisi DOE con il metodo statistico a matrici Taguchi, con l'uso di semplici strumenti, è possibile indagare su di un elevato numero di parametri ed ottenere delle valutazioni importanti sul comportamento del sistema con il vantaggio di ridurre al minimo le prove sperimentali.

L'applicazione del metodo Taguchi nella progettazione degli esperimenti DOE è un valido aiuto ed un importante strumento di ricerca per ottenere miglioramenti continui della qualità dei prodotti e dei processi. Attraverso la sperimentazione si riesce a identificare i fattori che più influenzano la qualità e le prestazioni dei prodotti e selezionare per essi i valori ottimali, seguendo i paradigmi del "Robust Design" si possono rendere i prodotti stessi più stabili nel loro comportamento rispetto all'influenza delle variabili esterne ed incontrollabili.

La progettazione degli esperimenti DOE può essere impiegata per ottimizzare le condizioni di lavorazione. Una volta che si ottengono le condizioni di elaborazione dell'equilibrio, tutte le condizioni operative, i setpoint e le osservazioni di processo registrati come base di dati per l'esecuzione di produzione future. Le possibili combinazioni di temperatura sul cilindro di estrusione disponibili per il funzionamento non sono, come si potrebbe erroneamente pensare, illimitate.

Solo alcuni profili di temperatura potranno dare origine ad un prodotto accettabile fornendo contemporaneamente un processo in condizioni ottimali. Quando si conosce dove il polimero fonde o si ammorbidisce, la miscelazione richiesta dopo la fusione ed eventuali alimentazioni e aperture di sfianto a valle, è possibile selezionare i set-point di temperatura in base ai requisiti di elaborazione per la formulazione di un particolare polimero. I possibili profili di temperatura includono:

- Temperatura in aumento progressivo, con i set-point che aumentano continuamente dalla gola di alimentazione fino alla testa di estrusione.
- Un profilo di temperatura inverso o decrescente, con i set-point che diminuiscono dalla prima zona del cilindro riscaldato fino alla testa di estrusione.
- Un profilo di temperatura costante, dove si trovano tutte le zone del cilindro impostate esattamente sullo stesso set-point di temperatura.
- Un profilo a curva di Gauss, dove la temperatura è più bassa nella prima zona del cilindro riscaldato, e poi aumenta gradualmente verso le zone centrali dell'estrusore per poi diminuire progressivamente verso la testa di estrusione.
- Varie combinazioni di questi profili.

Il profilo di temperatura che funziona meglio con un dato polimero, dipende dal design della vite e dell'estrusore. Le variabili possibili sono:

- Tipo di polimero
- Viscosità del polimero
- Miscelazione percentuale
- Alimentazione a valle
- Sfiato
- Velocità di avanzamento del melt

La temperatura di fusione del polimero è una proprietà critica per il controllo del processo di estrusione e l'ottimizzazione della produttività, il controllo è necessario per ridurre al minimo la degradazione del polimero.

La prima zona del cilindro è normalmente raffreddata ad acqua (zona di alimentazione) ed è senza riscaldamento. Questo permette una alimentazione del polimero con una temperatura uniforme, impedendo che si attacchi alla tramoggia o alla bocca di alimentazione. Impedisce anche che il polimero fonda prematuramente nella prima zona del cilindro, creando problemi nel processo di plastificazione e la possibilità di anticipare la degradazione del polimero con un prodotto finale non in linea con quanto previsto.

La temperatura nella seconda zona del cilindro estrusore viene impostata normalmente a 10 – 18 °C, ben al di sotto del punto di fusione dei polimeri semicristallini (70 °C) e sopra la temperatura di transizione vetrosa T_g dei polimeri amorfi. Nella zona 2 del cilindro di estrusione, il polimero viene compresso e preriscaldato man mano che avanza verso la successiva zona 3. Le temperature vengono progressivamente aumentate nelle zone 3 e 4 fino a raggiungere la temperatura di fusione prescritta per il tipo di polimero. La norma consolidata prescrive che la zona 3 del cilindro, sia di circa 11 °C al di sotto della temperatura di fusione desiderata per i polimeri semicristallini o amorfi.

Nella zona 4, si imposta la temperatura a quella di fusione del polimero lavorato. A seconda del disegno del profilo della vite, un polimero viene normalmente portato a fusione proprio nella zona 4. I settori che seguono servono per mantenere la temperatura di fusione, a miscelare e comprimere il polimero ed anche a raffreddarlo se necessario, a seconda delle funzioni che si verificano in ogni zona del cilindro.

Se si lavora troppo il materiale, in un particolare settore del cilindro, mediante una miscelazione dispersiva e/o distributiva, si ha un aumento del calore generato dal taglio e potrebbe essere necessario raffreddare il polimero fuso, asportando il calore in quella determinata zona del cilindro si previene la degradazione del polimero.

La zona di ingresso dell'alimentatore laterale è un settore dove, a causa dell'ingresso di additivi, resine, riempitivi o rinforzi a temperatura ambiente, si verifica un brusco calo della temperatura del melt. Nella zona di ingresso, nella zona precedente ed in quella successiva, è necessario aumentare la temperatura delle zone per portare rapidamente il melt alla temperatura di fusione del polimero.

La temperatura di fusione del polimero viene mantenuta costante anche nella zona di degasaggio, per mantenere la volatilità dei gas durante l'espulsione degli stessi.

Le zone che seguono sono utilizzate per ottimizzare la temperatura di fusione e per mantenere un flusso costante di polimero nella testa.

Le ultime zone del cilindro possono essere utilizzate per fornire al melt la giusta compressione e non solamente per raffreddare il polimero. Infatti, la pressione del melt che si genera nelle zone terminali del cilindro di estrusione, può essere un parametro critico da controllare. La "resistenza" alla fusione aumenta in genere con una viscosità di fusione inferiore, che diminuisce con temperature di fusione più basse.

Le condizioni di una elaborazione "standard" per varie resine commerciali sono molto teoriche. Nell'elaborazione reale, le condizioni possono variare da quelle consigliate, ed è dipendente da vari fattori quali:

- Modifica del polimero
- Additivi ritardanti di fiamma
- Modificatori di impatto
- Riempitivi e rinforzi
- Stabilizzatori UV e così via
- Rapporto L/D dell'estrusore
- Disegno della testa di estrusione
- Disegno delle viti

Inoltre, il polimero prodotto dal medesimo produttore ma in tempi e in lotti diversi, può variare anche notevolmente nelle caratteristiche chimiche e pertanto richiedere dei parametri di estrusione differenti per essere elaborato correttamente.

La velocità di rotazione delle viti

La velocità delle viti in un estrusore alimentato a "bocca affamata" è un parametro fondamentale nel controllo del processo di estrusione, essa consente al polimero una corretta miscelazione, generazione ed incremento della pressione, raggiungimento della temperatura di fusione e fusione dei granuli o polveri.

La velocità di rotazione delle viti, inoltre, determina direttamente il riempimento percentuale delle viti, il tempo di permanenza del polimero nell'estrusore ed il livello di coppia del motore necessaria.

Le viti vengono tenute a un numero di giri sufficiente per generare abbastanza potenza per impedire all'estrusore di superare la sua coppia limite e conseguentemente il suo spegnimento. Durante l'avvio, le viti sono fatte girare ad alti regimi fino a raggiungere la velocità desiderata.

Questo impedisce all'estrusore di generare una coppia eccessiva e quindi lo spegnimento prematuro, mentre la velocità di avanzamento è stata aumentata. Alla portata prevista, il motore eroga alle viti in rotazione una coppia di circa il 90%.

Con il processo stabilizzato si può ridurre la coppia erogata dal motore, questo consente un aumento della quantità di polimero inviato alla testa ma si genera anche un aumento della temperatura di fusione, che oltre a fornire una maggiore miscelazione, provoca anche un aumento del degrado del polimero dovuto all'energia termica.

Infatti, oltre ad una coppia più bassa, un numero di giri più elevato riduce il tempo di residenza e la percentuale di riempimento della vite. Un numero di giri più basso con il medesimo rendimento genera una coppia maggiore, un tempo di permanenza più lungo nell'estrusore ed un maggiore riempimento della vite.

Con un processo stabilizzato ed una alimentazione uniforme e senza nessun picco di coppia causato dall'alimentazione del polimero, la coppia può essere erogata al 95% fino a raggiungere il 97 – 98%.

Tuttavia, se si verifica un picco di coppia causato dall'alimentazione o si verifica un'anomalia, il motore può superare limite di coppia e di conseguenza spegnersi. Un monitoraggio del limite di coppia in equilibrio per almeno 30 minuti fino ad un'ora di tempo indicherà se velocità di rotazione della vite può essere mantenuta in sicurezza con una velocità inferiore ed una coppia più elevata oppure si può mantenere la medesima velocità ma con una coppia più alta. Un motivo per ridurre la velocità della vite e l'aumento di erogazione della coppia è quello di minimizzare la temperatura di fusione risultante dallo sforzo di taglio.

Il processo è sempre una ricerca dell'equilibrio per ottenere le migliori condizioni di estrusione, dove:

- Portata
- Velocità delle viti
- Temperatura di fusione
- Tempo di residenza
- Miscelazione
- Design delle viti

devono sempre venire ottimizzati per poter avere una produzione di qualità.

Una velocità di rotazione della vite troppo elevata, può generare così tanto calore da taglio, che la temperatura di fusione non può essere controllata. In questo caso il risultato è una portata ridotta, riducendo la velocità di rotazione delle viti, si abbassa la temperatura di fusione. In definitiva, potrebbe essere necessario un diverso design delle viti per poter ottimizzare il processo per numero di giri vite, capacità, coppia e temperatura di fusione.

Fondamentalmente, nell'estrusione alimentata “con fame” il rendimento è determinato da tutte le velocità di avanzamento e non dalla velocità delle viti. La velocità delle viti determina il tempo di permanenza in estrusore e la percentuale di riempimento delle viti.

Se un'alimentazione di additivi viene aggiunta a valle, non bisogna ridurre la velocità di rotazione delle viti per ottimizzare la coppia fino a quando tutti i flussi di alimentazione non sono stabilizzati nelle percentuali corrette.

Supponendo che le viti non girino alla massima velocità e che la miscelazione sia al limite, aumentando la velocità delle viti, migliorerà la miscelazione fino a quando non sarà possibile avere delle viti con il design ottimizzato per una migliore miscelazione. Se gli additivi e le cariche sono stati aggiunti a valle dell'alimentazione principale, un numero di giri più elevato aumenta l'attrito nel processo di estrusione, causando una qualità inferiore del prodotto.

Impostazione dei parametri di produzione.

Impostare un nuovo ciclo di produzione è una fase estremamente delicata che se non correttamente eseguita, compromette irrimediabilmente il processo produttivo. Esso richiede che i dosatori, le tramogge e le apparecchiature a valle, (condotti, estrusore, alimentatori laterali, pompa, cambia filtro, testa) siano perfettamente puliti. Se è previsto un essiccatore del polimero, è necessario che anch'esso, compresi canali di trasporto e quelli del vuoto, siano completamente puliti per prevenire la contaminazione.

L'estrusore viene avviato e fatto funzionare a vuoto e possibilmente spurgato con materiale di spurgo appropriato a seconda del successivo prodotto da lavorare. Potrebbe essere necessario estrarre le viti e sostituirle con quelle dal profilo più idoneo per lavorare il prodotto previsto. Un profilo della vite appropriato al materiale da lavorare ottimizza la produttività ed è vantaggioso se la produzione si svolgerà per un tempo prolungato.

Bisogna controllare la disponibilità delle materie prime e verificare che tutti gli ingredienti della formulazione siano a temperatura ambiente o nell'essiccatore per il tempo e la temperatura appropriati per ottenere il corretto contenuto di umidità. Se le materie prime fossero immagazzinate in un contenitore posto in un magazzino freddo o caldo, le materie prime dovrebbero essere portate nell'impianto di lavorazione e lasciato riposare per raggiungere la temperatura di equilibrio almeno 24 ore prima dell'inizio della produzione.

Le materie plastiche sono ottime isolanti, pertanto richiedono molto tempo per raggiungere la temperatura di equilibrio. Un'aggiunta di resina o di additivi nell'estrusore a valle dell'alimentazione principale può alterare i parametri di lavorazione in modo da non riuscire ad ottenere il prodotto finale desiderato.

Prima di iniziare una nuova produzione, è importante analizzare i record di produzione precedenti, per verificare come è stato ottenuto il prodotto l'ultima volta, la sua qualità ed eventuali problematiche occorse durante il processo.

Quest'analisi è un grande aiuto per l'operatore per poter anticipare eventuali modifiche che potrebbero essere necessarie prima dell'avvio della produzione.

Bisogna verificare che tutti i setpoint siano impostati per la produzione richiesta e che tutte le apparecchiature (riscaldatori, termocoppie, controllo di temperatura, raffreddamento della bocchetta di alimentazione e sul cilindro, sistema del vuoto, degasaggio, ecc.) funzionino correttamente. Prima di iniziare una nuova produzione, bisogna controllare e correggere eventuali problemi di sicurezza attorno all'estrusore, ad esempio fili scoperti o connessioni allentate sulla testa, pulizia intorno all'estrusore ed un adeguato isolamento della testa, carter e protezioni rimosse per la manutenzione, ecc...

Se l'estrusore è rimasto fermo per un periodo prolungato o è stato spento completamente, è necessario riscaldare l'estrusore per portare tutte le zone in temperatura, compresa la testa fino al raggiungimento dei valori impostati sui setpoint prima di iniziare ad estrarre. Il tempo necessario per raggiungere la temperatura di equilibrio, dipende dalle dimensioni dell'estrusore. Se la testa raggiunge la temperatura di setpoint molto più lentamente delle temperature del cilindro dell'estrusore, bisogna comunque attendere che sia l'estrusore che la testa abbiano raggiunto la temperatura di equilibrio.

Normalmente uno o due ore sono sufficienti per portare a temperatura il cilindro dell'estrusore; un tempo aggiuntivo di preriscaldamento può provocare la formazione di resina bruciata o degradata lasciata all'interno del cilindro dell'estrusore producendo delle macchie nere all'avvio a causa del polimero degradato. Le macchie nere generate dal polimero in degradazione, devono essere completamente eliminate dal sistema prima di produrre e raccogliere il prodotto di qualità.

Se vengono utilizzati degli alimentatori volumetrici o gravimetrici per il polimero in granuli o per degli additivi, può essere richiesta la calibrazione o di reimpostare i valori dei parametri di processo, prima della produzione successiva. Gli alimentatori gravimetrici a perdita di peso possono essere facilmente impostati inserendo il corretto valore in chilogrammi/ora richiesti per ogni flusso di alimentazione richiesto dalla formulazione. Potrebbero essere necessari alimentatori volumetrici da ricalibrare per l'ingrediente della formulazione alimentato da quel particolare alimentatore. Bisogna comunque controllare fisicamente che ogni alimentatore stia erogando i chilogrammi/ora corretti.

L'attrezzatura a valle deve essere controllata per la sicurezza, per il corretto funzionamento e la regolare manutenzione, prima dell'avvio dell'impianto. Le velocità di funzionamento dei coltelli per il taglio o il cambio dei coltelli, le rulliere con i rulli puliti, il rullo di traino in buone condizioni, la regolazione degli spazi necessari allo scarico del prodotto finito, la regolazione della temperatura dei rulli riscaldati o della vasca di raffreddamento, ecc...

Avviamento

Prima di avviare l'estrusore, bisogna verificare e serrare nuovamente i bulloni della filiera dopo che il sistema ha raggiunto la temperatura impostata. Avviare l'estrusore con una velocità di rotazione delle viti che va dai 20 ai 50 giri/min. ed iniziare ad aggiungere gradualmente il polimero alla bocchetta di alimentazione fino a quando la coppia indicata raggiunge circa il 50%- 60% ed il polimero ormai fuso, scorre liberamente fino alla testa. Durante questo periodo, bisogna monitorare la coppia e la pressione della testa. Se è presente un'ostruzione di polimero solidificato nella testa, nei colli di trasporto o in qualche altra parte, la pressione aumenterà molto rapidamente, causando una situazione di pericolo.

Nel caso, sempre possibile, che si verifichi un picco di pressione, bisogna fermare immediatamente la rotazione delle viti e determinare la causa dell'anomalia, prima di ripristinare la produzione. Se la pressione supera il limite massimo reimpostato, l'estrusore si spegnerà automaticamente, infatti la sonda di pressione rilevando il valore anomalo, invia il segnale al computer che controlla l'estrusore, procedendo all'immediato spegnimento.

Per la sicurezza degli operatori, comunque, è meglio non camminare o sostare davanti alla testa dell'estrusore fino a quando il materiale contenuto non sia completamente fuoriuscito dal cilindro di estrusione, questo perché se la pressione raggiunta è molto elevata è sempre possibile una rottura delle viti di fissaggio che possono essere proiettate in avanti come proiettili e colpire e ferire gravemente gli operatori.

Una volta che il polimero fuso esce dalla testa, la velocità della vite dell'estrusore può essere aumentata, seguita da un aumento delle velocità di avanzamento del materiale. Il materiale viene aggiunto alle viti lentamente per impedire all'estrusore di superare la coppia elevata limite ed arrivare allo spegnimento in automatico dell'estrusore.

Indipendentemente dal processo di estrusione, l'attrezzatura a valle dell'estrusore è normalmente avviata a bassa velocità e segue in progressione l'aumento di velocità con quella dell'estrusore. Dopo che l'apparecchiatura a valle è correttamente avviata e il prodotto erogato è di qualità soddisfacente, si può aumentare la velocità di avanzamento (monitorando la coppia dell'estrusore), fino a raggiungere le impostazioni desiderate.

Portare l'impianto ad una velocità elevata troppo rapidamente od utilizzare delle velocità errate nell'estrusore, può causare la liquefazione del polimero fuso ed interrompere il processo di estrusione, richiedendo il riavvio del processo.

La quantità di materiale che si può produrre, dipende dalla forza di coesione del polimero fuso. Estrudere con un'elevata resistenza del polimero allo stato fuso, può essere facilmente gestita, mentre una bassa forza di coesione del fuso, rende la raccolta del prodotto a valle una sfida complessa. I materiali elastomeri ed i prodotti poco caricati, mostrano un'ottima resistenza alla fusione e sono facili da trattare, mentre i

materiali cristallini con un alto indice di fluidità (MFI) e altamente caricati sono materiali che possono avere una scarsa resistenza alla fusione e rompersi molto facilmente.

Avviata la produzione e stabilizzato il processo, si raccolgono dei campioni di prodotto da analizzare per determinare se soddisfa le specifiche richieste. A seconda delle dimensioni dell'estrusore, l'intero sistema impiega un po' di tempo per raggiungere l'equilibrio. Pertanto, si continua a raccogliere dei campioni di prodotto ed a monitorare il prodotto ed il processo, mentre l'estrusore raggiunge l'equilibrio di funzionamento, apportando eventualmente delle piccole regolazioni sulla testa necessarie per portare il prodotto nelle specifiche dimensionali corrette.

Una volta raggiunto l'equilibrio del processo, bisogna registrare tutte le condizioni operative come, la temperatura impostata ed effettiva, la pressione di fusione, la temperatura del fuso, il carico dell'estrusore, i giri/min delle viti, la velocità di avanzamento, le condizioni dell'essiccatore, la velocità del traino, la temperatura dell'attrezzatura del traino, le pressioni associate ai cilindri di traino, i livelli di vuoto, la qualità del prodotto e le dimensioni del prodotto.

Funzionamento a regime

Lo stato stazionario (o condizione di equilibrio) dipende dalla dimensione dell'estrusore. I piccoli estrusori (fino a 40 mm di diametro viti) possono impiegarne da 20 a 40 minuti per raggiungere l'equilibrio, mentre i grandi estrusori (fino a 135 mm di diametro viti) possono richiedere una o due ore. Il tempo per raggiungere l'equilibrio dipende:

- La massa metallica in fase di riscaldamento (cilindro e viti)
- La resina lavorata (la resina è fredda e prende il calore lontano dall'estrusore)
- Il calore generato dal taglio dal motore e dalla vite

I cambiamenti nelle condizioni di processo non dovrebbero mai essere effettuati prima che l'apparecchiatura raggiunga l'equilibrio. Dopo che sono state eseguite delle regolazioni, l'attrezzatura deve poter raggiungere l'equilibrio di processo ancora prima che l'effetto possa essere determinato. Se un estrusore funziona correttamente sin dall'avvio, producendo un prodotto di qualità, e successivamente da 45 minuti a un'ora dopo l'inizio della produzione, il prodotto peggiora qualitativamente e non si sono verificati cambiamenti di processo, significa che il prodotto non funziona bene nelle condizioni di equilibrio ma invece funziona bene alle temperature di avvio effettive.

Dei nuovi prodotti in fase di ricerca e sviluppo da testare, usati in un estrusore da piccola produzione o da laboratorio, possono richiedere un consistente processo di modifiche per stabilire le condizioni operative standard da utilizzare su di un estrusore grande da produzione. Bisogna modificare la temperatura, l'incremento di velocità o la velocità di rotazione delle viti in modo significativo perché si verifichi un effetto sul prodotto. Se, per esempio, cambiamo la temperatura di una zona di 1 °C, la variazione non è abbastanza significativa per produrre dei cambiamenti.

Se, invece, la modifica della temperatura della zona è compresa tra gli 8 ed i 14 °C è un valore sufficiente per determinare se la modifica ha un effetto significativo sul prodotto in esame. Bisogna sempre attendere del tempo affinché l'estrusore raggiunga l'equilibrio prima di esprimere un giudizio sull'effetto provocato dalla modifica sulle proprietà del prodotto. Anche gli effetti generati dai cambi di velocità delle viti non sono istantanei.

Nel cilindro dell'estrusore, le temperature devono raggiungere la condizione di equilibrio risultante dal calore generato dalla velocità della vite e dal calore aggiunto o asportato dal sistema di termoregolazione.

A causa della consistente massa metallica del cilindro d'estrusione, il riscaldamento ed il raffreddamento, richiede del tempo per compensare le variazioni di temperatura risultanti dalle variazioni di velocità della vite.

Qualsiasi modifica al processo che non mostra alcun effetto sul prodotto, può essere ripristinato alle impostazioni originali prima di venire apportata un'altra modifica. Dopo una modifica del processo, bisogna concedere del tempo affinché l'estrusore raggiunga l'equilibrio. Si raccomanda di cambiare sempre e solo una variabile alla volta, inoltre con modifiche troppo rapide, l'estrusore non ha mai l'opportunità per arrivare all'equilibrio e raggiungere le condizioni ottimali di processo diventa molto difficile se non impossibile.

Spegnimento e/o cambio di produzione

La modifica del prodotto, la manutenzione o l'interruzione del lavoro nel fine settimana richiedono lo spegnimento dell'estrusore. La procedura di spegnimento o il cambio di prodotto, dipende da una serie di fattori diversi, quali:

- Per quanto tempo il sistema rimarrà inattivo?
- Il prodotto cambierà colore da uno più chiaro ad un colore più scuro?
- Il prodotto cambierà colore da uno più scuro ad un colore più chiaro?
- Il prodotto cambierà completamente con un polimero diverso?
- Il nuovo processo ha una formulazione di livello superiore o ha una temperatura di fusione più bassa?
- La nuova formulazione della resina è compatibile con la resina precedente?
- La viscosità del nuovo fuso è maggiore o minore rispetto alla vecchia resina a una data temperatura di fusione?

La prima domanda che ci si deve porre è: per quanto tempo l'estrusore rimarrà spento? La risposta a questa domanda detta la linea da condurre e la procedura da seguire. Se, ad esempio, stiamo lavorando del PVC rigido su un estrusore bivate controrotante (parallelo o conico) e l'estrusore deve essere spento per più di pochi minuti, il PVC deve essere eliminato dall'estrusore per prevenirne la degradazione. Il PVC subisce una reazione di degradazione auto-catalitica e una volta inizia il degrado, peggiora progressivamente. Vengono generati molto rapidamente dei puntini o granelli neri ed il materiale risulterà degradato.

Con altri tipi di polimeri, se l'estrusore resterà acceso ma inattivo per più di dieci minuti con le viti ferme, bisognerà spegnere l'alimentazione ed eseguire lo spurgo dell'estrusore. Se la produzione verrà interrotta durante la notte e riavviata al mattino e le resine lavorate sono termicamente stabili, possono essere mantenute nel cilindro dell'estrusore avendo cura di spegnere la termoregolazione od impostare le temperature ad un livello più basso.

Alla ripartenza, si riportano le temperature a quelle di produzione normale. Se il polimero è termicamente instabile, è necessario spurgare completamente l'estrusore per poter riempire il cilindro con del materiale di spurgo termicamente stabile. Anche in questo caso, bisogna spegnere la termoregolazione o regolare le temperature ad un livello inferiore per tutto il tempo in cui l'estrusore resterà inattivo. Al riavvio, si riportano le temperature a quelle prefissate per il prodotto e lo si alimenta con del polimero vergine per rimuovere tutto il materiale di spurgo e la resina degradata eventualmente presente, prima di iniziare il processo di estrusione.

I cambi di prodotto che richiedono un cambio di colore risultano più semplici quando si passa da un colore più chiaro a uno più scuro. Quando gli alimentatori si svuotano, si aggiunge il nuovo materiale nell'alimentatore mentre l'impianto continua a funzionare. Si va a scartare tutto il materiale di transizione fino al raggiungimento del nuovo colore. Se si esegue con attenzione questo procedimento, la velocità delle viti potrebbe non dover essere mai abbassata.

Se il cambio di prodotto non può essere fatto ad alta velocità, si può realizzare facilmente abbassando la velocità dei giri delle viti durante il passaggio dal prodotto 1 al prodotto 2, rallentando le apparecchiature a valle e scartando tutto il materiale di transizione. A seconda del sistema di alimentazione che fornisce la nuova resina di colore più scuro alla tramoggia di alimentazione, potrebbe essere necessaria una pulizia accurata, per assicurarsi che non ci sia la contaminazione incrociata con dei residui del prodotto precedente.

Una volta che la formulazione del colore più chiaro viene rimossa dal sistema, è possibile raccogliere il nuovo prodotto. Se il cambio di prodotto sta passando da una formulazione di colore da più scuro a più chiaro, il prodotto richiede molto più tempo per cambiare colore e probabilmente, una più lunga fase di eliminazione dello scarto.

Svuotando gli alimentatori, spurgando l'estrusore con del materiale a basso costo per rimuovere la resina più scura, si eliminano i residui della produzione precedente e si inizia ad aggiungere la resina più chiara negli alimentatori dell'estrusore. Con la linea completamente spurgata e gli scarti eliminati, si può iniziare a raccogliere il nuovo prodotto più chiaro.

Quando si passa ad estrarre un prodotto che richiede un polimero completamente diverso dal precedente, la procedura di conversione dipende dalle vecchie e le nuove caratteristiche del polimero.

Le domande da porsi in un cambio di produzione simile sono:

- 1) La conversione di produzione richiede temperature di fusione più elevate?
- 2) Il polimero originale e quello nuovo sono chimicamente compatibili?
- 3) Qual è la viscosità di ciascun polimero al momento del cambio di prodotto?
- 4) Risultano necessarie delle viti dal profilo differente?

Se il nuovo polimero richiede delle temperature di fusione più elevate (1) rispetto al polimero precedentemente lavorato, bisogna verificare se l'impianto consente il funzionamento a tali temperature e, se la risposta è affermativa, bisogna impostare le nuove temperature e dare il tempo alla linea di raggiungere l'equilibrio termico di funzionamento. Se l'impianto non consente il funzionamento a temperature elevate (per esempio se dobbiamo estrarre del PEEK) bisogna valutare se è possibile semplicemente sostituire i componenti non adatti (in un numero minimo) oppure bisogna rivolgersi ad un altro tipo di impianto per la lavorazione.

Se il nuovo polimero è chimicamente compatibile con il precedente (2) non vi sono problemi, se invece non lo è, bisogna verificare che i canali di passaggio del polimero fuso non contengano componenti o anelli di tenuta (come, ad esempio il Teflon che non può superare i 260 °C), oppure che non sia chimicamente corrosiva per l'acciaio.

È importante verificare qual è la viscosità del nuovo polimero(3), in modo da poter impostare i parametri corretti di estrusione quali, la temperatura e giri delle viti. La viscosità di un polimero dipende dal suo peso molecolare e generalmente, una viscosità più elevata richiede una temperatura di fusione più elevata rispetto ad una resina con viscosità inferiore. Allo stesso modo, una pressione elevata corrisponde a una viscosità elevata.

Se il nuovo polimero si discosta significativamente dal punto di vista chimico, da quello usato precedentemente, esso potrebbe richiedere l'uso di viti differenti (4) da quelle installate. Questo può significare due soluzioni differenti; per le viti monoblocco è necessario una sostituzione completa con due viti di costruzione ex novo, mentre per quelle composte a settori potrebbe essere sufficiente smontare i settori sfilandoli dalle aste millerighe e cambiare la sequenza e/o il numero dei settori stessi. Nel caso che il nuovo polimero sia molto simile chimicamente a quello precedente, è molto probabile che le viti installate vadano già bene e che sia solo necessario aggiustare i parametri di velocità dei giri delle viti e le temperature.

REOLOGIA DEI POLIMERI

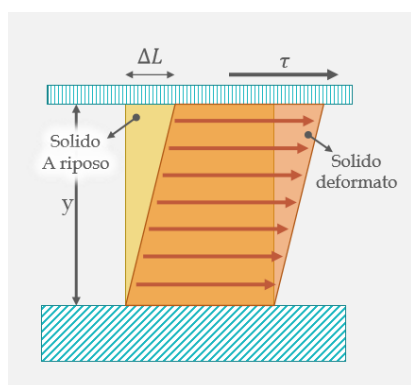
Introduzione

Per molti anni, il processo di estrusione dei polimeri mediante gli estrusori bivate, è stata applicata direttamente sul campo senza un reale approccio scientifico. Per sapere come progettare e costruire un estrusore bivate e la sua coppia di viti, è necessario partire dal polimero o dalla miscela di polimeri che dobbiamo estrudere ed analizzarli attentamente. Come abbiamo visto nel primo capitolo che descrive alcuni polimeri adatti all'estrusione, essi presentano delle caratteristiche fisiche e di lavorazione molto diverse tra loro.

Per eseguire i calcoli che seguiranno, solitamente si parte dalle caratteristiche del polimero che sono riportate nella sua scheda tecnica che viene fornita solitamente dal produttore del polimero stesso. La scheda deve riportare un numero di dati sufficiente per iniziare ad impostare i parametri di produzione dell'estrusore; temperatura delle zone, velocità delle viti, necessità o meno della devolatilizzazione, ecc...

La scheda tecnica del polimero deve riportare il peso specifico del polimero, il colore, la taglia (granuli o polvere), la durezza, la temperatura di fusione, la temperatura di esercizio dopo il raffreddamento, se è igroscopico, le prove di resistenza a cui è stato sottoposto il campione (trazione, flessione, resistenza a rottura, allungamento, ecc...).

La scienza della reologia



Il termine reologia, che deriva dal greco antico “ $\rho\acute{\epsilon}\omega$ ” (reo = scorrere), unito a “logia” *teoria*, è la scienza che studia il flusso e le deformazioni dei materiali, per effetto dell'azione di forze esterne. La reometria è invece quell'insieme di tecniche atte a misurare le proprietà reologiche di un materiale.

Scopo della reologia è quello di individuare e studiare il legame, determinato dalla microstruttura del materiale, tra le forze applicate e il moto (o la deformazione) che esse determinano.

La lavorazione delle materie plastiche pone alcuni problemi teorici molto complessi a causa del comportamento meccanico dei polimeri che è intermedio tra i solidi e i liquidi.

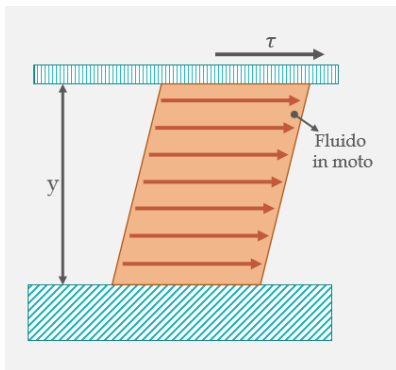
Sotto l'azione di un sistema di forze applicato dall'esterno, un corpo subisce:

- a) una deformazione elastica, se il corpo riacquista la configurazione iniziale dopo la rimozione dello stato di sollecitazione;
- b) una deformazione plastica, se la deformazione permane anche dopo la rimozione dei carichi esterni;
- c) se invece, sotto l'azione di forze esterne finite, la deformazione aumenta con continuità e senza alcun limite, il materiale fluisce.

Entro i limiti estremi di un comportamento perfettamente elastico, perfettamente plastico o viscoso, nella realtà esiste una gamma intermedia di materiali piuttosto complessi e per i quali sono stati proposti o adottati numerosi modelli reologici. Così come i liquidi sono distinti in newtoniani e non newtoniani a seconda della costanza o meno del coefficiente di viscosità, ovvero della capacità di scorrimento di un fluido sotto l'azione delle forze di taglio, la viscoelasticità è definita come la proprietà dei materiali complessi suscettibili di subire deformazioni di tipo elastico, associate a deformazioni di tipo viscoso.

Tutti i materiali che esibiscono un comportamento irregolare durante le fasi di sollecitazione, se non analizzati correttamente mediante reometri o viscosimetri, possono portare a comportamenti inaspettati durante il processo di lavorazione e nella loro applicazione. Analizzando il comportamento tra i solidi ideali ed i fluidi ideali otteniamo alcune importanti informazioni che ci consentono di capire il comportamento dei polimeri allo stato fuso.

I solidi ideali si comportano in maniera totalmente elastica e reagiscono ad uno sforzo di taglio con una deformazione reversibile:



$$\tau = dL/dy$$

dove τ è lo sforzo di taglio (Pa)

G è il modulo di elasticità (PA)

dL/d è la deformazione (adimensionale)

G rappresenta la resistenza alla deformazione: maggiore è il suo valore e minore sarà la deformazione del solido (a parità di sforzo di taglio); esso dipende principalmente dalla natura chimico-fisica del materiale (per gomma ~ 0.01 GPa; per l'acciaio ~ 200 GPa). Nei solidi ideali, la deformazione è reversibile: rimuovendo lo sforzo, si elimina anche la deformazione.

I fluidi ideali si comportano in maniera totalmente viscosa e reagiscono ad uno sforzo di taglio con una deformazione irreversibile (scorrano):

$$\tau = \mu \, dv/dy$$

dove τ è lo sforzo di taglio (Pa)

μ è la viscosità (Pa s)

$dv/dy = \gamma$ è la velocità di deformazione (1/sec)

μ rappresenta la resistenza allo scorrimento: maggiore è il suo valore e minore sarà lo scorrimento del fluido (a parità di sforzo di taglio).

La deformazione è irreversibile: l'energia trasmessa attraverso lo sforzo di taglio viene spesa dal fluido per scorrere (e in parte dissipata sotto forma di calore). Rimuovendo lo sforzo non si recupera energia.

Reometria

Per reometria si intende quell'insieme di procedure che vengono messe in atto per misurare le proprietà reologiche di un materiale mediante strumenti specifici. La reometria nel campo dell'estrusione delle materie plastiche, si occupa principalmente di misurare con accuratezza le proprietà viscoelastiche del polimero in esame.

La reometria permette di ottenere le informazioni che consentono di caratterizzare le proprietà reologiche dei materiali fluidi. Con il reometro si svolgono due classi di misure: misure di viscosità, per una valutazione delle proprietà di scorrimento; misure in regime oscillatorio, per una valutazione delle proprietà di deformabilità della struttura del materiale. Grazie alle misure di reologia, si possono collegare le proprietà fisiche di un materiale o di una formulazione durante le varie tappe del processo, alle proprietà d'uso del prodotto e alle sue prestazioni per l'utilizzatore finale.

Viscosità

La viscosità rappresenta l'attrito interno di un liquido, ed esprime la maggiore o minore facilità di scorrimento di uno strato del liquido rispetto ad uno strato adiacente. La viscosità dei liquidi normalmente diminuisce con l'aumentare della temperatura.

Dal punto di vista microscopico e quindi delle particelle, il valore della viscosità dipende sia dalla forma e dalla grandezza delle molecole sia dall'entità delle interazioni tra esse. In realtà non tutti i liquidi hanno un comportamento simile; quindi, si è soliti suddividerli in due grandi categorie:

- Liquidi newtoniani: sono quei liquidi che seguono la legge di Newton;

- **Liquidi non newtoniani:** sono quei liquidi che non seguono la legge di Newton perché la loro viscosità cambia sia con il variare della pressione sia con il variare di altre grandezze chimico-fisiche.

Alla prima categoria appartengono l'acqua e gli oli. Alla seconda categoria appartengono tutti i materiali plastici.

La viscosità assoluta o dinamica è la “difficoltà” che incontra la massa di un fluido (liquido o gas) a scorrere liberamente in un condotto. In particolare, questa è definita appunto viscosità dinamica ed è misurata in **poise** (simbolo P). Dividendo questa grandezza per la densità, si ottiene la viscosità cinematica (misurata in stokes, St) che è in relazione con la difficoltà di caduta libera di un solido attraverso un fluido. La viscosità di un liquido è praticamente indipendente dalla pressione mentre diminuisce all'aumentare della temperatura. Nel caso dei gas, essa aumenta all'aumentare della temperatura e della pressione. Supponendo di dividere in strati il fluido, è la forza richiesta per muovere alla velocità di 1 m/s uno strato di fluido di 1 m² rispetto ad uno supposto fisso e distante 1 m.

La viscosità dinamica si misura solitamente in:

Poise (P) = g / (m·s) oppure (Pa·s) = Kg / (m·s) = (N·s)/m² oppure cps = mPa·s

10 Cps Viscosità bassa

130 Cps Viscosità media

1800 Cps Viscosità alta

La **viscosità cinematica o relativa** η_r è data dal rapporto fra la viscosità dinamica e la massa volumica del fluido.

La viscosità cinematica si misura solitamente in:

Stoke (St) = 1E-04(m²/s) oppure in centiStoke (cSt) = 1E-06(m²/s)

L'**indice di viscosità (I.V.)**, esprime la costanza della graduazione viscosa di un determinato olio alle diverse temperature; quindi, tanto quanto questo valore sarà maggiore e tanto la viscosità rimarrà costante al variare della temperatura, mentre minore sarà tale valore e maggiore risulterà tale variazione.

La **viscosità intrinseca** può essere determinata sperimentalmente misurando il numero di viscosità in funzione della concentrazione in corrispondenza dell'intercetta sull'asse delle ordinate. Il **numero di viscosità** può anche essere correlato alla massa molare.

Viscoelasticità

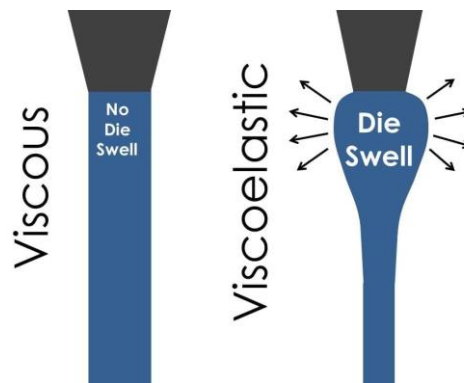
Il comportamento meccanico dei materiali polimerici si caratterizzano per la viscoelasticità, esso può essere considerato come la somma di un comportamento viscoso e di un comportamento elastico. Quando i polimeri si trovano nella fase completamente solida, si caratterizzano da un comportamento elastico comune a tutti i

solidi; se andiamo ad analizzare una curva tipica “sforzo-deformazione”, notiamo delle deviazioni dal comportamento puramente elastico che è dovuto all’insorgere di componenti di tipo viscoso.

Quando i polimeri si trovano allo stato fuso, mostrano un comportamento prettamente viscoso, il fenomeno del “die swell” che si presenta quando il fuso esce dalla filiera, è indice dell’insorgenza delle componenti elastiche. Possiamo spiegare che il “die swell” si verifica a causa che, all’uscita dall’estrusore, le catene polimeriche non essendo più costrette in uno spazio ridotto, si rigonfiano fino a 2 – 2,5 volte il diametro iniziale, tentando di recuperare le dimensioni che avevano in precedenza. Inoltre, se la testa di estrusione non ha la filiera circolare, il materiale mostra anche una variazione di forma.

L’insorgenza di questo fenomeno si può contrastare o ridurre, per esempio, aumentando la lunghezza della matrice dell’estrusore. Le condizioni di lavorazione del polimero influenzano la dimensione del fenomeno “die swell”, pertanto sia la natura elastica che quella viscosa del polimero, non hanno un valore costante ma rappresentano una ulteriore variabile del processo.

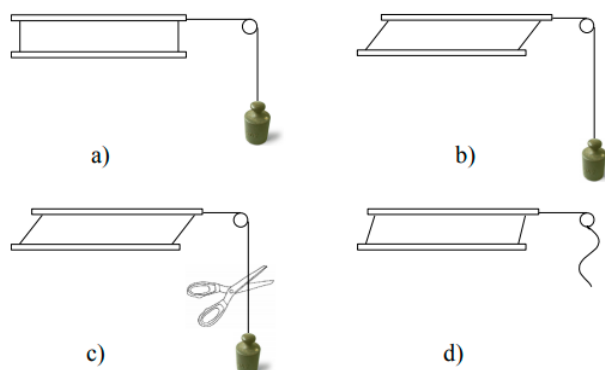
Questa è una caratteristica tipica dei fusi polimerici, cioè quello di “ricordare” parzialmente la forma che avevano precedentemente; si parla in questo caso di “memoria obsolescente”, ma che sono in grado di “dimenticarla” dopo che è trascorso un certo lasso di tempo a causa dello sciogliersi dei legami fisici nella struttura molecolare. Al contrario, i polimeri reticolati hanno un’ottima memoria di forma in quanto la caratteristica del loro legame chimico gli permette di recuperare velocemente la configurazione precedente.



Differenza tra fluido viscoso e fluido viscoelastico all’uscita da una matrice

Si consideri il seguente semplice esperimento su di un polimero fuso confinato tra due piani paralleli. Applicando una forza tangenziale ad uno dei piatti, in modo da metterlo in movimento. Ad esempio, questo può essere realizzato applicando un peso in modo tale che una forza verticale costante venga trasferita al piatto (Figura a). Il polimero tra i piatti viene quindi sottoposto ad un flusso di scorrimento e si determina una progressiva deformazione (Figura b). Dopo un certo tempo, si elimina istantaneamente la forza, determinando così una situazione di sforzo nullo sul piatto (Figura c).

Si osserverà, in misura maggiore o minore a seconda del tipo di materiale e delle condizioni sperimentali, un parziale recupero della deformazione imposta, che si manifesta con il fatto che il piatto precedentemente in movimento ritorna parzialmente indietro (Figura d). Questo recupero elastico della deformazione è del tutto assente in un materiale puramente viscoso, e costituisce un esempio del comportamento viscoelastico del fuso polimerico.



Esperimento di creep recovery

Un fluido si dice viscoelastico quando è in grado di immagazzinare, per azione del flusso, una certa quantità di energia elastica. Il materiale, quindi, presenta allo stesso tempo caratteristiche di comportamento viscoso ed elastico. La descrizione del comportamento viscoelastico dei polimeri fusi e l'origine microstrutturale di tale comportamento verranno discusse in dettaglio in capitoli successivi. In questa sezione ci si propone di illustrare gli aspetti generali di tale comportamento e i metodi sperimentali con i quali esso può essere evidenziato e misurato.

Nella pratica, la viscoelasticità è un modello matematico, necessario per descrivere il comportamento di un materiale quando si trova in uno stato intermedio tra fluido e stato solido. Un tipico materiale di studio, ed anche uno dei più semplici materiali viscoelastici da studiare, è il **fluido alla Boger**, caratterizzato dalla viscosità costante.

Solo misurando la variazione della viscosità η in funzione della velocità di deformazione, è possibile individuare il comportamento viscoelastico di un materiale. Per un fluido puramente viscoso, la viscosità dipende esclusivamente dalla temperatura, ma per un fluido viscoelastico, la viscosità dipende sia dalla temperatura che dalla velocità di deformazione.

Per quanto riguarda i materiali caratterizzati dalla viscoelasticità, viene intesa la viscosità come la costante di proporzionalità tra lo sforzo e la velocità di deformazione del fluido; in quanto dipendente dalla velocità di deformazione essa è anche dipendente dal tempo.

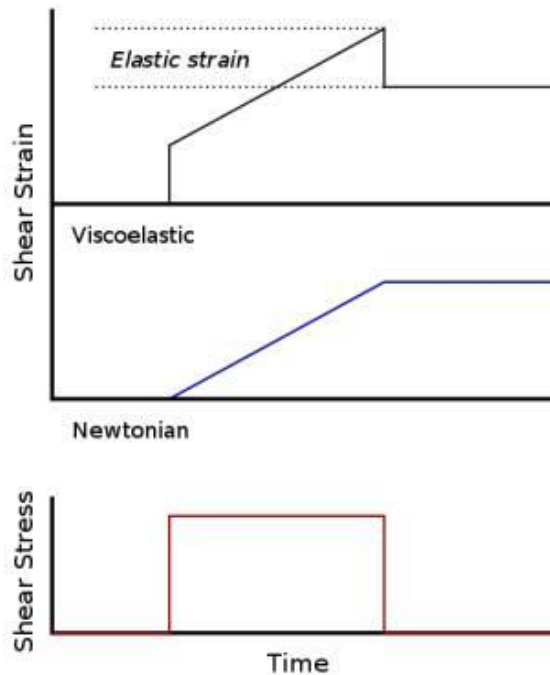


Diagramma dello sforzo di taglio e della deformazione

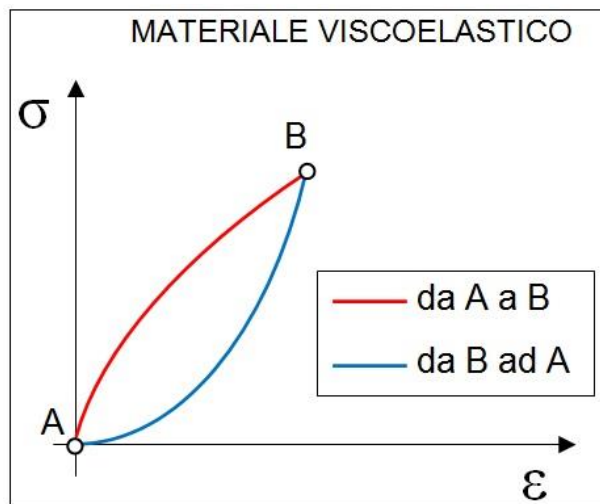
In un materiale viscoelastico, la viscosità è composta da due elementi:

- la viscosità propriamente detta (shearviscosity), che è il rapporto tra gli sforzi tangenziali e la velocità di deformazione;
- la viscosità elongazionale (extensionalviscosity o elongationalviscosity), che è il rapporto tra gli sforzi normali e la velocità di deformazione.

I materiali viscoelastici sono caratterizzati da alcune proprietà:

- se lo sforzo si mantiene costante, la deformazione cresce con il tempo; questo fenomeno è detto "scorrimento viscoso" (detto "creep");
- se si mantiene costante la deformazione, lo sforzo decresce con il tempo; questo fenomeno è detto "rilassamento degli sforzi";
- la rigidità del materiale dipende dalla velocità di applicazione del carico;

Se viene applicato un carico ciclico, avviene un'isteresi (cioè un ritardo periodico), con una conseguente dissipazione di energia meccanica sotto forma di calore. rappresentando il ciclo di carico in un diagramma sforzo-deformazione, la perdita di energia meccanica è pari all'area del percorso che rappresenta il ciclo di carico; tale perdita di energia meccanica non avviene invece nei materiali elastici, i quali riassumono la loro forma originaria una volta che il carico è rimosso.



Ciclo di isteresi di un materiale viscoelastico sottoposto ad un carico ciclico

Nella realtà, anche se alcuni materiali seguono abbastanza bene la legge di Newton o la legge di Hooke, quasi tutti i materiali esistenti presentano una deviazione significativa sia dal comportamento puramente elastico e sia da quello puramente viscoso; pertanto, nella realtà quasi tutti i materiali sono viscoelastici.

Generalmente i metalli e le leghe metalliche (acciaio, alluminio ecc..) ed il quarzo (a temperatura ambiente e per piccole deformazioni) presentano un comportamento puramente elastico; mentre i polimeri amorfi e semicristallini, i biopolimeri, i materiali bituminosi, il legno, i tessuti umani ed i metalli ad alte temperature, hanno un comportamento viscoelastico significativo.

La funzione della viscoelasticità lineare, è un'equazione differenziale ordinaria che può essere scritta in riferimento alla risposta allo scorrimento viscoso, oppure in riferimento al carico applicato. I modelli viscoelastici lineari vengono rappresentati dall'equazione di **Volterra**, che mette in relazione lo sforzo e la deformazione:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_{inst,creep}} + \int_0^t K(t-t')\dot{\sigma}(t')dt'$$

oppure:

$$\sigma(t) = E_{inst,relax}\varepsilon(t) + \int_0^t F(t-t')\dot{\varepsilon}(t')dt'$$

dove:

- t è il tempo;
- $\delta(t)$ è lo sforzo;
- $\varepsilon(t)$ è la deformazione;

- $E_{inst, creep}$ è il modulo elastico istantaneo misurato nella prova di scorrimento viscoso;
- $E_{inst, relax}$ è il modulo elastico istantaneo misurato nella prova di rilassamento degli sforzi;
- $K(t)$ è la funzione di scorrimento viscoso;
- $F(t)$ è la funzione di rilassamento degli sforzi.

La viscoelasticità lineare è applicabile solitamente ed esclusivamente nel caso di piccole deformazioni. La viscoelasticità non lineare, invece, si ha quando la funzione non è separabile; questo fenomeno accade quando le deformazioni sono grandi oppure se cambiano le proprietà del materiale durante la deformazione.

Il Melt Index

Il Melt Flow Index (MFI) o Melt Index è l'indice di fluidità dei materiali polimerici e fornisce informazioni molto importanti sulla "facilità" con cui un materiale plastico fuso fluisce attraverso un capillare. Esso è un indice che caratterizza la viscosità allo stato fuso dei polimeri termoplastici ed è fortemente dipendente dal peso molecolare medio del polimero; viene determinato tramite la misura della quantità di polimero fuso, che viene estruso attraverso un ugello calibrato, in condizioni controllate.

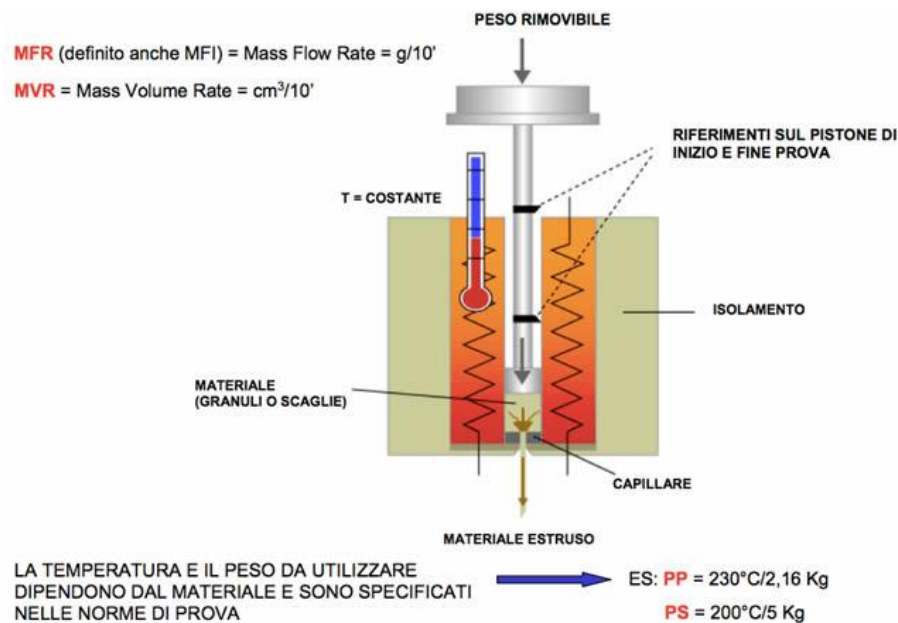
Il Melt Index è un valore correlato alla viscosità ed indica la resistenza che un fluido oppone allo scorrimento. Tanto maggiore è la massa di materiale fuoriuscito, tanto maggiore è il Melt Flow Index e minore la viscosità del polimero.

La misura del Melt Index è un test indispensabile nell'ambito delle attività di Ricerca e Sviluppo (R&D) e di Controllo della Qualità (QC) per l'accettazione del granulo polimerico sia in ingresso che in uscita dal reparto di produzione.

La sua misura si effettua caricando il polimero in un cilindro riscaldato e portato a fusione a una determinata temperatura stabilita dalle norme, a cui è fissato un cilindretto calibrato (diametro 2,095 mm e lunghezza 8 mm), che esercita una forza costante e fa fluire il polimero attraverso un capillare; la massa (espressa in grammi) di polimero fuoriuscito in 10 minuti corrisponde al valore del Melt Flow Index.

L'esecuzione di prove ripetute consente, inoltre, di ricavare informazioni rilevanti sul comportamento fluidodinamico dei materiali nelle condizioni di prova; ad esempio, la stabilità termica di un polimero, che è un valore fondamentale per alcune fasi di lavorazione (stampaggio, l'estrusione, ecc.) e per la messa a punto delle condizioni di processo.

Esistono due differenti metodologie per effettuare il test che sono rispettivamente il metodo gravimetrico ed il metodo volumetrico.



Schema del test per la misurazione del Melt Flow Index (MFI)

Il metodo gravimetrico

Per misurare il Melt Flow Index si procede a caricare il polimero fuso ad una determinata temperatura in un cilindro riscaldato, su cui viene esercitata una forza costante che fa fluire il polimero attraverso un ugello calibrato; la massa (espressa in grammi) di materiale fuoriuscito in dieci (10) minuti corrisponde al valore di viscosità. La temperatura di esercizio ed il peso da utilizzare dipendono dal materiale e sono specificati nelle norme di prova.

Il metodo volumetrico

A differenza del metodo gravimetrico, in questo caso lo strumento è dotato anche di un encoder di posizione grazie al quale è possibile definire i cm³ di materiale che fluiscono attraverso l'ugello calibrato in un determinato intervallo di tempo. In questo caso quindi il Melt Index viene calcolato come il volume di polimero che fluisce ad una data temperatura attraverso un ugello calibrato, sotto il peso di un pistone caricato con una massa nota, nel tempo di dieci (10) minuti. Questo metodo permette una stima del peso molecolare medio, fornendo un'indicazione sulla scorrevolezza attraverso filiere ed ugelli.

Normative di riferimento e metodi di misura

Normative di riferimento: ISO 1133, ASTM D1238

Metodo di prova: gravimetrico / MFR (Melt Flow Rate)

Metodo di prova: volumetrico / MVR (Melt Volume Rate)

Il comportamento reologico dei polimeri

La **reologia** è la scienza che studia le proprietà di flusso e di deformazione della materia. In generale, per quanto riguarda i polimeri puri o additivati, la reologia risulta essere complessa, le proprietà reologiche si discostano notevolmente dal comportamento ideale e dipendono da numerose variabili, come lo shear rate, il peso molecolare, la struttura della catena macromolecolare, il tipo e la concentrazione degli additivi, la temperatura, la pressione e il tempo.

Lo studio della reologia è di fondamentale importanza per i materiali a base macromolecolare per due ragioni:

1. durante la produzione di materiale plastico la reologia del fuso e delle polveri determina gli sforzi durante tutte le operazioni di trasformazione, come l'estrusione, la calandratura, la soffiatura, la filatura, la spalmatura, lo stampaggio, etc.
2. le proprietà reologiche influenzano il comportamento meccanico dei prodotti, incidendo sul tenore degli sforzi residui nei materiali, in particolare dove è presente orientazione, volumi liberi (ad es. per i materiali espansi), etc.

Come già accennato, la reologia delle polveri riveste anch'essa grande importanza, ad esempio nel mixing e durante le prime parti di un estrusore o di una pressa ad iniezione. Per meglio decidere quale strumento di misura è più indicato per le nostre esigenze, la prima cosa da fare è quella di considerare quali sono le condizioni del processo di lavorazione ed in particolare le velocità di deformazione cui è sottoposto il materiale.

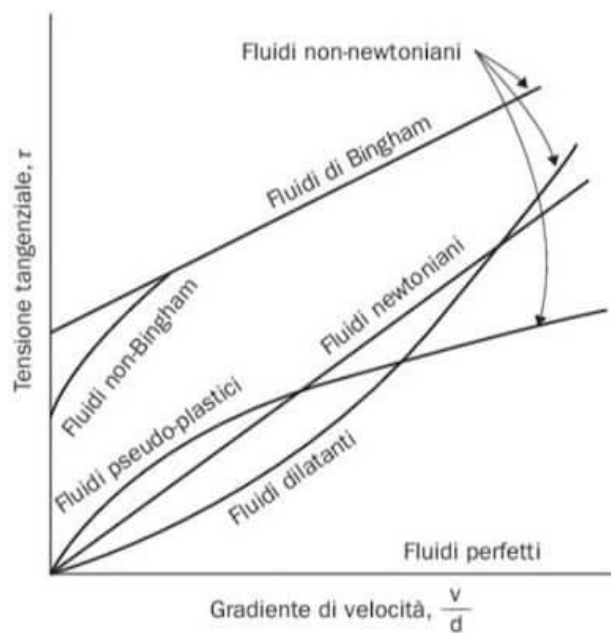
Non dimentichiamo che la conoscenza del comportamento reologico dei materiali è di fondamentale importanza anche in geologia e meteorologia, con importantissime implicazioni pratiche nello studio e nella prevenzione di eventi catastrofici come i terremoti o gli uragani.

Rimanendo nell'ambito dei materiali sottoposti a lavorazione meccanica, tutti questi materiali possono scorrere, fluire, all'interno di contenitori, con modalità, pressioni, velocità, temperature e condizioni ambientali diverse. Studiare la loro reologia può essere di importanza fondamentale per lo sviluppo del materiale stesso e dell'impiantistica ad esso relativa.

Ad esempio, quando un materiale, in particolare un materiale termoplastico, viene formato, scorre nello stato fluido-viscoso all'interno della macchina di trasformazione e viene successivamente raffreddato assumendo la sua forma finale. La conoscenza della nostra macchina e di cosa dobbiamo fare per ottenere un prodotto migliore deriva dall'esperienza insostituibile di chi la segue, di chi la fa funzionare e di chi la progetta.

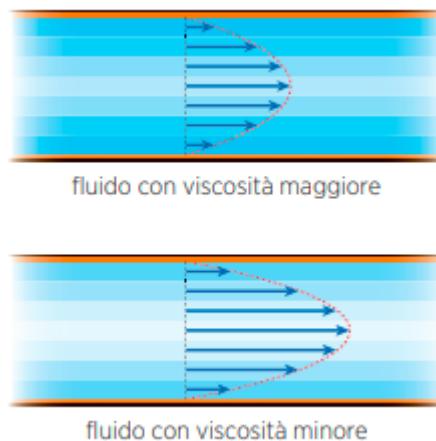
Tutta questa esperienza si basa sul comportamento del materiale durante la lavorazione, alle condizioni di temperatura, sforzo e pressioni decise in fase preliminare. Conoscere il comportamento del materiale in tali condizioni è l'obiettivo delle misure reologiche.

Curve reologiche di un fluido newtoniano e non newtoniano



Curve reologiche dei fluidi newtoniani e non newtoniani

La teoria dell'aderenza, valida per tutti i fluidi, spiega che le particelle a diretto contatto con le pareti dei condotti, non scorrono rispetto ad essi, sia che il fluido bagni la parete o meno. Pertanto, la velocità del fluido è nulla per le particelle a contatto con la parete per poi crescere gradualmente spostandosi normalmente al piano fino a raggiungere il valore di velocità che ha il corpo in corrispondenza dell'asse mediano del condotto.



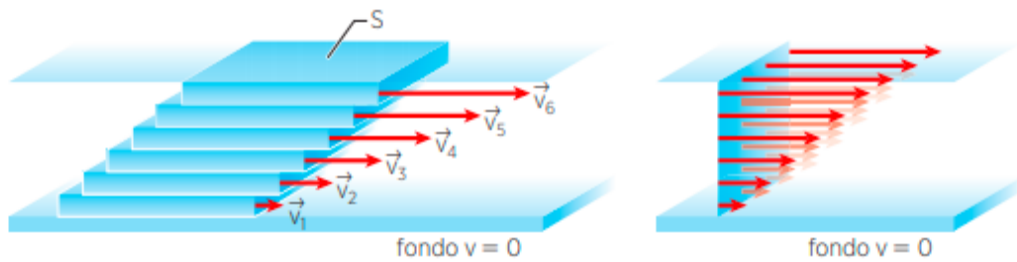
Schema della teoria dell'aderenza per fluidi con viscosità differente

Da questo fenomeno si evidenzia l'esistenza di una forza interna al fluido che si oppone allo scorrimento tra le particelle ed è proporzionale al gradiente di velocità $\partial u/\partial y$ in

direzione ortogonale al moto del fluido. Indicando con τ_{xy} la tensione esercitata nella direzione x sulla superficie normale a y, si ha la seguente relazione:

$$\tau_{xy} = -\frac{dF}{dS} = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

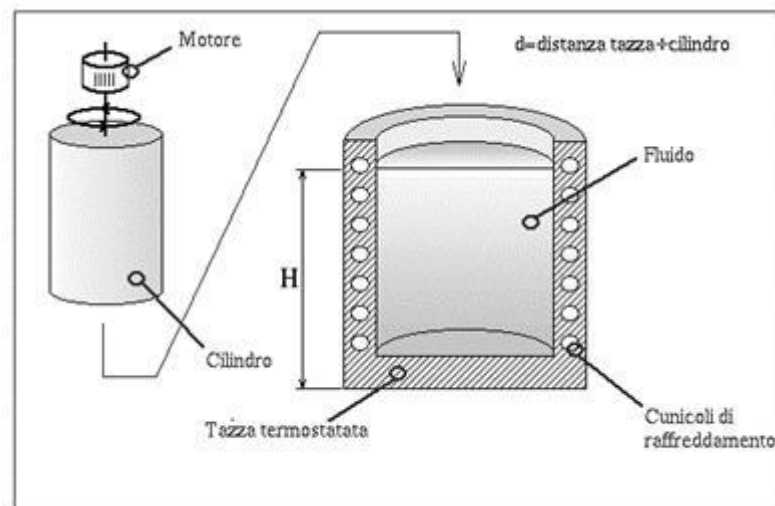
In cui μ è il coefficiente di viscosità del fluido.



Velocità tangenziale degli strati fluidi

Questa relazione è la **Legge di Newton**; tutti quei fluidi il cui comportamento risponde a questa legge sono detti fluidi newtoniani. Analizzare un fluido per determinare se sia newtoniano o no, richiede l'utilizzo del reometro a rotazione, detto anche viscosimetro; questo strumento è composto da un cilindro cavo termoregolato.

Esso contiene il fluido da analizzare ed in cui viene immerso un secondo cilindro, detto rotore, che viene posto in rotazione da un motore elettrico. La presenza di un termostato mantiene il fluido a temperatura costante in modo che possa mantenere costanti anche le sue proprietà fisiche.



Schema di un Viscosimetro o Reometro a rotazione

Il sistema funziona così; si mette in rotazione il rotore con una velocità costante, vengono misurati in ogni istante la coppia erogata M (Nm) e la velocità (giri/min.) per poi calcolare η e $\partial u / \partial y$: $M = \tau \cdot 2\pi r L R \cdot \omega$ e $\omega = \frac{v}{R}$ dove L è la porzione di rotore immersa nel fluido, R il raggio del rotore e η lo spessore dello strato di fluido.

Il computer che equipaggia il reometro, calcola tutti questi valori per ogni istante della prova e traccia tutti i punti sul piano del diagramma $T - (\partial u / \partial y)$: se la curva reometrica di migliore approssimazione ha un andamento lineare, il fluido è di tipo newtoniano e la pendenza della curva rappresenta il coefficiente di viscosità η . Nei fluidi newtoniani, la legge di Newton rappresenta la legge fisica dove η dipende unicamente dalla natura del fluido e dal suo stato fisico; per molti altri fluidi invece, esso è legato anche ad altre grandezze come il tempo e lo sforzo tangenziale τ .

Il gradiente di velocità dipende dal tipo di fluido non newtoniano in esame, possiamo distinguerli in fluidi pseudo plastici e fluidi dilatanti; per i primi il valore di τ diminuisce con l'aumentare del gradiente di velocità, mentre con i secondi, accade l'inverso.

Per analizzare matematicamente il comportamento di questi fluidi in movimento, bisogna determinare in maniera sperimentale la relazione che lega lo sforzo tangenziale con il gradiente di velocità, la formula che fino ad ora ha dato i migliori risultati è la **legge della potenza**:

$$\tau_{xy} = -m \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n$$

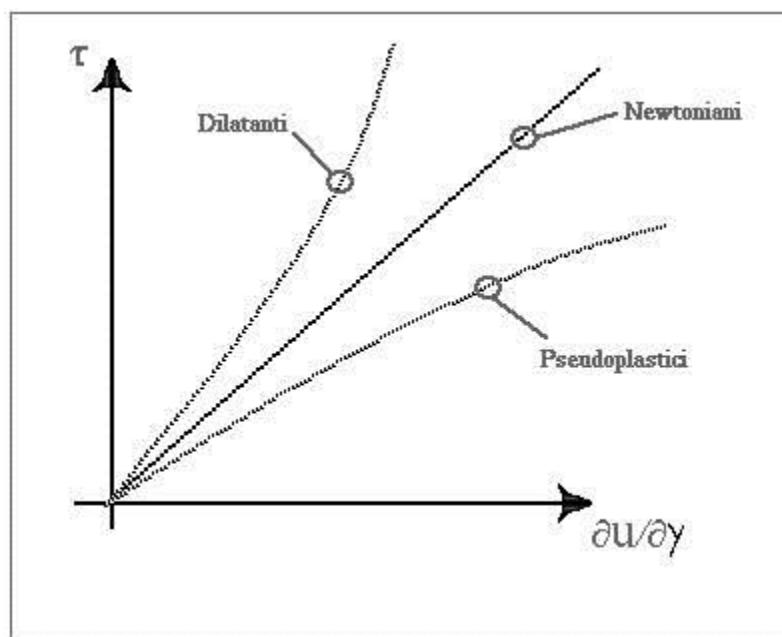
in cui m è definito "fattore di consistenza" ed n è l'indice di comportamento. In particolare, si ottiene per:

- $n=1$ si ottiene la legge di Newton
- $n>1$ i fluidi sono a comportamento dilatante
- $n<1$ i fluidi sono a comportamento pseudo plastico

$$\tau_{xy} = -m \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n + \tau_0$$

- τ_0 è la costante di Bingham, chiamato anche *valore limite di scorrimento* o (yield stress). Questo parametro caratterizza i fluidi di Bingham (per cui in un fluido di Bingham, questo valore non è nullo).

L'unità di misura del fattore di consistenza, essendo un valore elevato a esponente n , non è una grandezza fisica vera e propria.



Curve reologiche per fluidi dilatanti, newtoniani e pseudoplastici

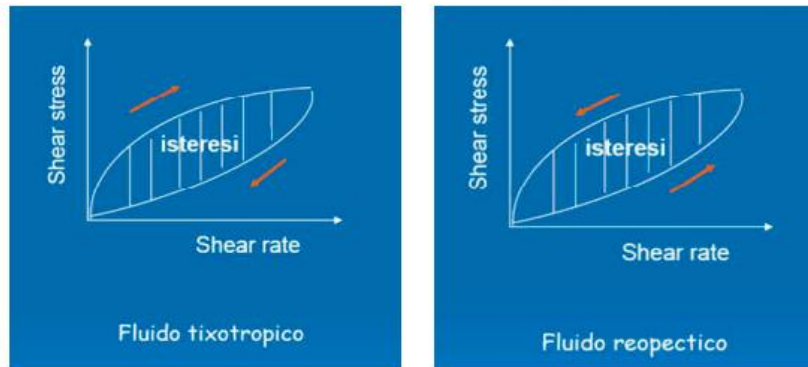
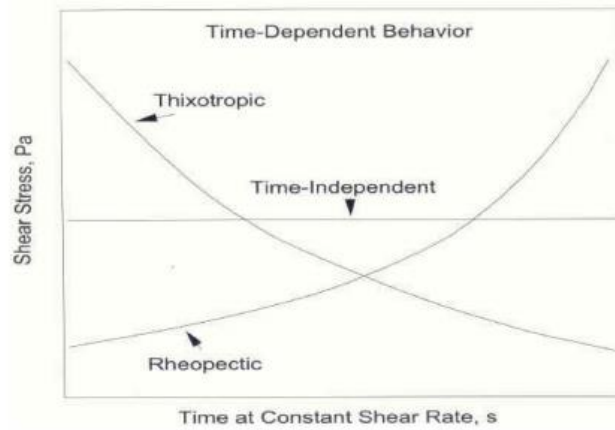
Anche il tempo ha una grande influenza sui fluidi ed il loro comportamento, quelli le cui proprietà dipendono dal tempo sono i fluidi tixotropici ed i fluidi reopectici.

I fluidi tixotropici hanno una struttura molecolare che lentamente, sotto l'effetto di uno sforzo tangenziale, si disgrega. Essi presentano una diminuzione di μ nel tempo e se questi fluidi vengono sottoposti a sforzi di taglio, essi aumentano il loro grado di fluidità passando da uno stato pastoso ad uno stato liquido.

Il comportamento è reversibile e la struttura si ricostruisce con gradualità se il fluido viene mantenuto in condizioni di riposo, la caratteristica è una curva reologica caratterizzata da un ciclo di isteresi.

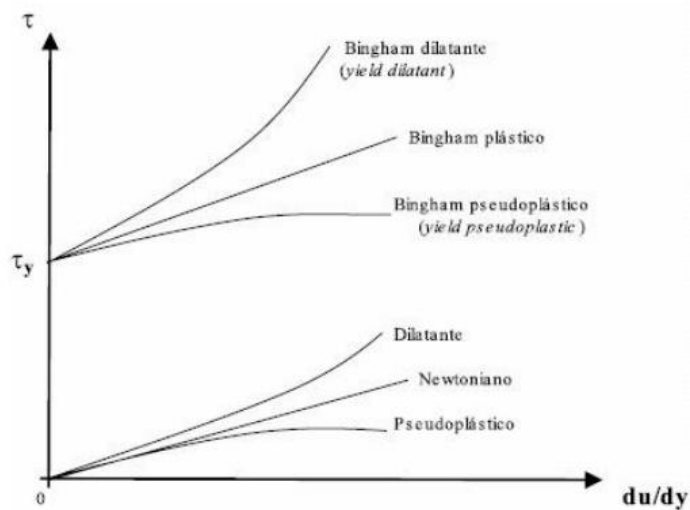
I fluidi reopectici invece, hanno un comportamento che è l'opposto rispetto ai tixotropici. In essi, se sottoposti ad uno sforzo tangenziale applicato in maniera non troppo rapida si verifica una graduale formazione di una struttura molecolare e quindi si verifica un aumento di μ . Anche in questo caso il comportamento è reversibile, se il fluido viene lasciato a riposo per un certo tempo, la struttura formatasi scompare; anche in questo caso la caratteristica curva reologica è un ciclo di isteresi.

Il ciclo di isteresi che caratterizza questi due fluidi, dal comportamento antitetico tra loro, è un fenomeno che possiamo considerare trascurabile qualora lo scostamento massimo tra le curve non superi il valore del 10%.



Curve reologiche dei fluidi tixotropico e reopectico, e relativi cicli di isteresi.

I fluidi di Bingham sono un'altra categoria di fluidi a comportamento plastico; in maniera differente rispetto ai fluidi newtoniani che possiedono uno scorrimento anche se vengono sollecitati da forze modeste, i fluidi di Bingham iniziano a scorrere solo quando la forza che li sollecita, supera un certo valore di soglia τ_0 detto anche *valore limite di scorrimento* (yeld stress). Quando si supera questo valore, il comportamento della curva reologica può seguire quella dei fluidi newtoniani, dilatanti o pseudoplastici (a seconda del valore dell'esponente n).



Curve reologiche per un fluido di Bingham

Mettere in correlazione la pressione e la portata di un fluido che si muove in un condotto, consente di poter calcolare la portata ad una determinata pressione, qualunque sia la geometria del condotto.

Per questo motivo è necessario disporre di due grandezze che siano in relazione tra loro attraverso le caratteristiche reologiche del fluido, della pressione, della portata e della geometria del condotto.

Queste grandezze sono lo **sforzo di taglio** τ (che è in relazione con la pressione) e la **velocità di taglio** γ (che è in relazione con la portata); se immaginiamo un condotto in cui scorre un fluido, la forza che frena il flusso sulla superficie interna del condotto è lo sforzo di taglio τ .

L'equilibrio tra azione e reazione e cioè tra spinta e frenata del fluido, è rappresentata dall'equazione:

$$\tau 2\pi r L = P \pi r^2$$

Da questa equazione possiamo ricavare le correlazioni tra sforzo di taglio e pressione:

$$\tau = P/2 (L/r)$$

$$P = 2 \tau (L/r)$$

Da queste equazioni, si vede chiaramente che lo sforzo di taglio (espresso in pascal, bar, oppure in kg/cm²) è un valore direttamente dipendente dalla pressione e dalla dimensione del condotto.

La velocità di taglio γ si manifesta tra le pareti del cilindro di fluido che scorre nella parete interna del condotto:

$$\gamma = \Delta v / \Delta r = (v_1 - v_2) / (r_1 - r_2)$$

dove v_1 e v_2 sono le velocità degli strati ai rispettivi raggi r_1 e r_2 . Risolvendo questa equazione differenziale arriviamo alla correlazione tra portata Q e la velocità di taglio:

$$\gamma = 4Q / \pi R^3$$

$$Q = \gamma \pi R^3 / 4$$

La velocità di taglio ha come unità di misura il reciproco del secondo (1/sec) infatti:

$$\Delta v \text{ (m/sec)} / \Delta r \text{ (m)} = \gamma \text{ (m/sec)} / \text{m} = \gamma \text{ (1/sec)}$$

Per un fluido non newtoniano come i polimeri, la viscosità diminuisce all'aumentare della velocità di taglio. La curva reologica che si ottiene con un reometro, a diverse pressioni si ottengono le corrispondenti portate e per ogni coppia di punti si riportano i valori nel diagramma $\tau - \dot{\gamma}$. Per ogni coppia si può ricavare la viscosità $\eta = \tau / \dot{\gamma}$.

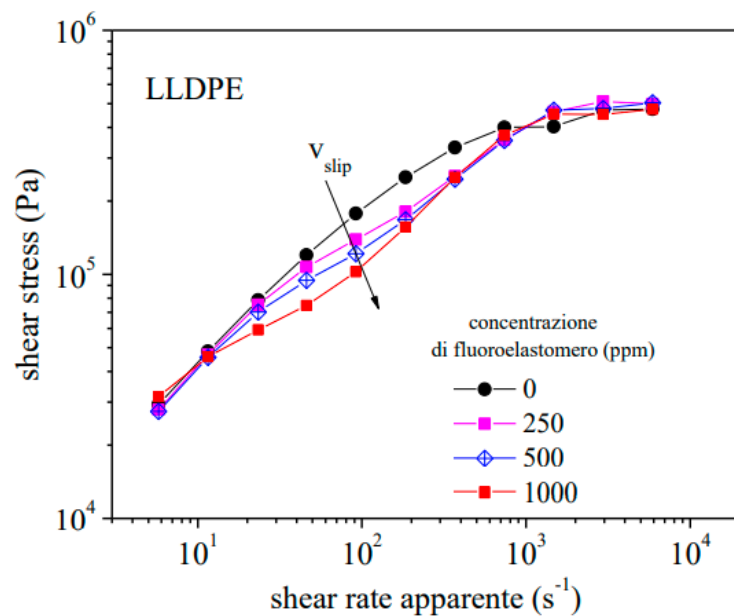
L'equazione che meglio rappresenta il tratto di curva tracciato sul diagramma è chiamata **legge di potenza** che si può scrivere nella forma seguente:

$$\tau = K (\dot{\gamma})^n \quad \text{oppure} \quad \dot{\gamma} = A (\tau)^a \quad \text{dove } a=1/n \text{ e } A = (1/K)^{1/n}$$

trasformando in forma logaritmica diventa:

$$\log \tau = n \log \dot{\gamma} + \log K \quad \text{e} \quad \log \dot{\gamma} = v \log \tau + \log A$$

Per i polimeri allo stato fuso, $n < 1$ e $v > 1$, ma se la velocità di taglio è estremamente bassa ($n=v=1$), il fuso si comporta come un fluido newtoniano.



Curva logaritmica $\tau - \dot{\gamma}$ per LLDPE

Le perdite di carico nei condotti

Per poter calcolare le perdite di carico, quando una certa quantità Q_i di polimero fluisce in un condotto ed effettua un certo percorso, è necessario operare nel seguente modo. Bisogna suddividere il percorso in tratti elementari di lunghezza L_i a sezione costante; queste sezioni vengono assimilate a cerchi di raggio R_i o a rettangoli di larghezza W_i e di

altezza H_i dove $W_i \gg H_i$. Nel caso di un condotto di forma quadrata, sarà assimilato ad un condotto di forma circolare.

Definita la sezione di passaggio, è possibile calcolare la velocità di taglio γ_i che sarà:

$$\begin{aligned}\gamma_i &= 4Q_i / \pi R_i^3 && \text{per i condotti a sezione circolare} \\ \gamma_i &= 6Q_i / W_i H_i^2 && \text{per i condotti a sezione rettangolare}\end{aligned}$$

Se è noto lo sforzo di taglio τ_i , è possibile determinare le perdite di carico ΔP_i che sarà:

$$\begin{aligned}\Delta P_i &= 2\tau_i (L_i / R_i) && \text{per i condotti a sezione circolare} \\ \Delta P_i &= 2\tau_i (L_i / H_i) && \text{per i condotti a sezione rettangolare}\end{aligned}$$

La perdita di carico totale, sul condotto, sarà la somma di tutte le perdite di carico ΔP_i di ogni singola sezione.

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots + \Delta P_n$$

Nel caso che i condotti in cui calcolare le perdite di carico siano divergenti o convergenti, è possibile operare il calcolo nel seguente modo:

Se R_{\max} ed R_{\min} sono le dimensioni agli estremi di un condotto a sezione circolare, la perdita di carico ΔP è uguale a quella di un condotto di pari lunghezza ed avente raggio R tale che

$$R = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) / 3$$

Se H_{\max} ed H_{\min} sono le dimensioni agli estremi di un condotto a sezione rettangolare, la perdita di carico ΔP è uguale a quella di un condotto di pari lunghezza ed avente H tale che:

$$H = H_{\min} + (H_{\max} - H_{\min}) / 3$$

Un altro metodo per analizzare il comportamento dei fluidi è tramite l'utilizzo di un tubo capillare: in un tubo di dimensioni note, si fa scorrere il fluido da analizzare e da cui ricavo il valore delle perdite di carico.

Per il calcolo delle perdite di carico nel caso di moto turbolento per un fluido newtoniano generalmente viene usato il diagramma di Moody. Vi è un diagramma analogo per i fluidi non newtoniani: è il diagramma di "Dodge and Metzner" anche se nella realtà esso viene molto poco usato.

STRUMENTAZIONI E METODI

Introduzione

Per caratterizzare il comportamento di materie prime e prodotti finali, il laboratorio di analisi usa l'indispensabile strumentazione reologica e le relative misurazioni. Con esse è possibile monitorare le condizioni del processo di estrusione e predire le performance finali del prodotto. Ormai le misure reologiche mediante tecniche strumentali sono comunemente accettate per la caratterizzazione di sistemi complessi, nella biologia fino alle transizioni di fase, questo permette di adattare la strumentazione e le tecniche di analisi per la caratterizzazione dei materiali nelle più svariate condizioni operative. Il comportamento dei greggi petroliferi, per esempio, esibisce il comportamento di un fluido newtoniano alle alte temperature ma, presentano un comportamento decisamente non newtoniano alle basse temperature.

Questo comportamento ambivalente è causato dal fatto che il greggio è una miscela molto complessa di vari idrocarburi che contengono diversi gruppi funzionali come le paraffine, gruppi aromatici, resine nafteniche e asfalteni. In queste condizioni, le frazioni ad alto peso molecolare dei componenti sono quelle responsabili delle caratteristiche di flusso. Alle temperature più alte, tra i 70 °C ed i 150 °C, le frazioni ad alto peso molecolare hanno una solubilità sufficiente per mantenerli disciolti nella miscela ma quando le temperature diventano più basse, la solubilità diminuisce in maniera importante, soprattutto se in presenza di elevate pressioni.

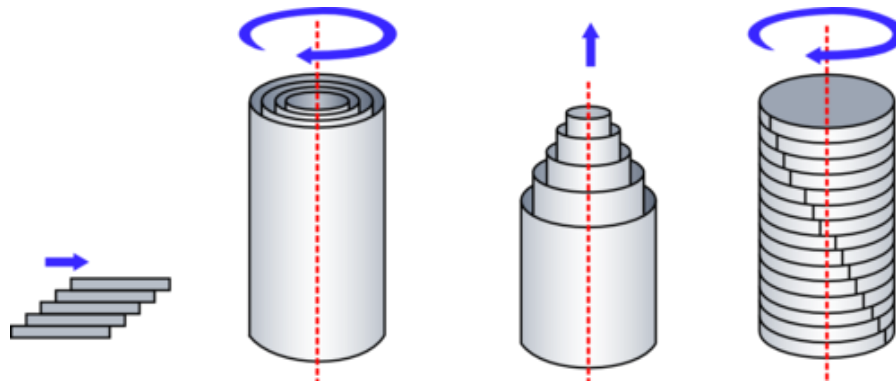
Reometro

Il **reometro** è un dispositivo da laboratorio utilizzato per analizzare un fluido o una sospensione e misurare in che modo fluisce in risposta a delle forze applicate. Si utilizza per analizzare quei fluidi che non si possono definire con un singolo valore di viscosità ma richiedono più parametri da impostare e misurare rispetto a quanto avviene per un viscosimetro.

Ci sono due tipi di reometri che sono completamente differenti tra loro. I reometri che calcolano la tensione tangenziale applicata al fluido, tale tensione genera una deformazione al fluido stesso, questi sono chiamati reometri rotazionali o reometri a taglio. Vi sono poi i reometri che applicano uno stress estensionale, detto anche forza di deformazione estensionale, essi sono chiamati reometri estensionali. I reometri del tipo rotazionali o del tipo a taglio sono progettati e costruiti sia come uno strumento per calcolare la deformazione (applicazione della forza di taglio definita dall'utente e verifica della tensione tangenziale risultante) che, come strumento per calcolare lo stress applicato, (applicazione dello stress di taglio definito dall'utente e controllo della deformazione di taglio risultante).

La parola **reometro** deriva dal greco e significa **dispositivo per la misurazione del flusso principale**. Nel XIX secolo è stato comunemente usato per i dispositivi per misurare l'intensità della corrente elettrica, fino a quando la parola è stata soppiantata nell'uso da quelle di galvanometro ed amperometro. Il reometro è stato utilizzato anche per la misurazione del flusso dei liquidi, nella pratica medica (flusso di sangue) e in ingegneria civile (flusso d'acqua). Quest'ultimo uso persisteva ancora nella seconda metà del XX secolo in alcune aree. Seguendo la coniazione del termine reologia, esso venne ad essere applicato alla misura di apparecchiature atte a misurare il carattere anziché la quantità di flusso e tutti gli altri significati sono divenuti obsoleti.

Tipi di reometro a taglio



Schemi di geometrie di taglio

Per misurare le proprietà reologiche di un fluido, possono essere usati dei diversi piani di taglio. L'immagine, da sinistra a destra, mostra: un flusso di trascinamento piano di tipo Couette, un flusso cilindrico, un flusso di tipo Poiseuille in un tubo ed un flusso di tipo piastra-piastra.

Sono quattro i piani di taglio di base che possono essere definiti in base alla loro geometria,

- flusso a piastra di trascinamento Couette
- flusso cilindrico
- flusso di Poiseuille in un tubo
- flusso piastra-piastra

I vari tipi di reometri a taglio, quindi, vengono costruiti per utilizzare una o più combinazioni di queste geometrie.

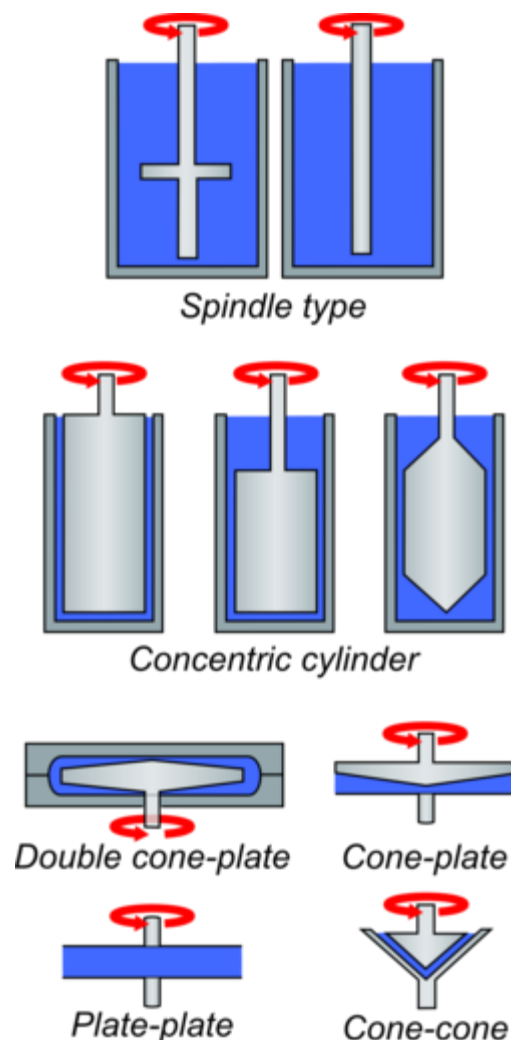
Reometro a taglio lineare

Il reometro Goodyear è un tipico esempio di reometro a taglio lineare e viene utilizzato per analizzare le formulazioni di creme cosmetiche e nella la ricerca medica per quantificare le proprietà elastiche del tessuto umano. Questo reometro viene anche chiamato **Linear SkinRheometer** o **LSR**. Questo dispositivo funziona applicando alla superficie del tessuto da esaminare, una sonda lineare. Applicando una forza ciclica controllata, si misura la forza di taglio risultante mediante una cella di carico.

Tramite un trasduttore induttivo lineare, viene misurato lo spostamento in modo che i parametri base dello sforzo-deformazione, vengano rilevati ed analizzati per ricavarne la costante dinamica elastica del tessuto sottoposto al test.

Reometro a tubo capillare

Questo tipo di reometro utilizza un tubo capillare, da cui deve il nome, dove viene forzato il fluido da analizzare in condizioni di flusso laminare. Questo tubo capillare ha una sezione trasversale costante e di dimensioni note e pertanto la portata misurata, può essere convertita nel valore della velocità di taglio ed il valore della caduta di pressione nel valore della sollecitazione al taglio. Eseguendo dei test a pressione o portata differenti, si riesce a costruire su di un diagramma, la curva di flusso. Se la portata di materiale è limitata per la caratterizzazione reometrica, è possibile utilizzare un reometro micro-fluidico con dei sensori di pressione integrati, in grado di misurare la caduta di pressione con un a portata molto limitata.



Geometrie di rotazione di differenti tipi di tagli reometri

Reometro a taglio dinamico

Un reometro a taglio dinamico detto DSR, viene utilizzato per il controllo qualità e la ricerca e sviluppo di una vasta gamma di materiali. I reometri a taglio dinamici sono stati utilizzati sin dal 1993, quando è stato usato per caratterizzare e comprendere le proprietà reologiche a temperatura elevata dei leganti bituminosi sia allo stato fuso che allo stato solido ed è fondamentale per formulare la chimica e prevederne le prestazioni finali nell'utilizzo di questi materiali.

Reometro a cilindro in rotazione

In questo tipo di reometro, il fluido da analizzare viene inserito all'interno di un cilindro posto all'interno di un altro cilindro. Il cilindro interno, quello contenente il fluido, viene posto in rotazione ad una determinata velocità. Questo genera una velocità di taglio nel fluido all'interno del cilindro in rotazione. Il fluido tende a trascinare in rotazione contraria il cilindro e la forza che essa esercita su entrambe i cilindri è il momento torcente (coppia) che viene misurata e che può essere convertita in una sollecitazione di taglio. Un modello di questo reometro è il **Fann VG** viscosimetro, che funziona a due velocità, (300 e 600 rpm), pertanto può dare soltanto due punti sulla curva di flusso. Comunque è più che sufficiente per definire un modello di polimero Bingham, esso viene ampiamente utilizzato nel settore petrolifero per determinare il carattere di flusso dei fluidi di perforazione. Negli ultimi anni, sono stati realizzati ed utilizzati dei reometri con più velocità di rotazione (600, 300, 200, 100, 6 e 3 giri/minuto). Questo permette di analizzare più modelli di fluidi complessi come i fluidi non-newtoniani **Herschel-Bulkley**. Alcuni modelli di reometri permettono di variare la velocità di rotazione da costantemente aumentata e diminuita in modo programmato, questo ciclo consente la misurazione delle proprietà dipendenti dal tempo.

Reometro a cono e piastra

In questo tipo di reometro, il fluido viene posto sulla superficie tra un piatto orizzontale ed un cono posto sopra di esso. La superficie del cono e la piastra hanno un angolo di circa 1-2 gradi, ma può variare a seconda del tipo di test da eseguire. Di solito è la piastra che viene posta in rotazione e viene misurata la coppia torcente sul cono. Il Reo goniometro Weissenberg è il modello più noto, dove al movimento del cono si oppone una striscia metallica molto sottile dalle caratteristiche note e che opera da barra di torsione.

La risposta della barra di torsione ed il grado angolare di torsione ottenuto, conferiscono il valore della sollecitazione al taglio, le dimensioni e la velocità di rotazione del cono, invece, danno la velocità di taglio. Il Reo goniometro Weissenberg è un dispositivo di misurazione assoluto, purché il test sia impostato correttamente.

Altri dispositivi che funzionano su questo principio, sono molto più facili da usare, ma richiedono una calibrazione con un fluido noto. Cono e piastra dei reometri possono anche essere utilizzati in una modalità oscillatoria per misurare proprietà elastiche, oppure in modalità di rotazione e di oscillazione combinata.

Reometro estensionale

I reometri estensionali hanno avuto uno sviluppo molto più lento rispetto ai reometri a taglio, a causa delle sfide associate nel riuscire a generare un flusso estensionale omogeneo. Innanzitutto, le interazioni del fluido di prova o del solido in fusione, si tradurrà in un componente del flusso di taglio, che compromettere i risultati. Secondariamente, la storia dell'origine di tutti i materiali da analizzare deve essere conosciuta e verificata. Per ultimo, la velocità ed il livello di deformazione, deve essere abbastanza elevata da riuscire ad allungare le catene polimeriche oltre il loro normale raggio di inerzia, per ottenere questo è necessaria una strumentazione con una vasta gamma di velocità di deformazione ed un'ampia lunghezza disponibile da percorrere.

I reometri estensionali disponibili in commercio sono classificati in base alla loro applicabilità ai vari campi di viscosità. I materiali con una gamma di viscosità da circa 0,01 a 1 Pa.s. (la maggior parte delle soluzioni polimeriche) sono meglio caratterizzati con reometri a capillare di scioglimento, dispositivi a getto, o sistemi a contrazione di flusso. I materiali con una gamma di viscosità da circa 1 a 1000 Pa.s. sono utilizzati in reometri ad allungamento ad incandescenza. I materiali con una elevata viscosità > 1000 Pa.s., come le masse fuse di polimeri, sono meglio caratterizzati da dispositivi a lunghezza costante.

La reometria estensionale si effettua comunemente su materiali che vengono soggetti a trazione. Questa deformazione può verificarsi tipicamente durante la lavorazione come lo stampaggio ad iniezione, la filatura di fibre tessili, estrusione, soffiaggio, estrusione per rivestimento di cavi. Si può anche verificare durante la de-coesione di adesivi, il pompaggio di saponi e la manipolazione di prodotti alimentari liquidi.

Dinamometro

Nell'ambito delle discipline della Fisica e della Meccanica, il dinamometro è uno strumento utilizzato per misurare l'intensità di una forza. Disponibile in molte varianti, viene spesso utilizzato anche in campo medico, industriale e domestico. I modelli più datati sono quelli più diffusi e sono equipaggiati di una molla contenuta all'interno di un tubo metallico e di una scala graduata. La molla, realizzata in bronzo o in acciaio armonico, sottoposta a sollecitazioni, è in grado di subire delle deformazioni reversibili

Il dinamometro presenta nella parte inferiore un gancio in acciaio inossidabile su cui viene attaccato un qualsiasi oggetto per determinarne il peso. La forza di gravità esercita la sua attrazione, attirando l'oggetto verso il basso e deformando la molla, allungandola fino ad un valore che verrà riportato su di una scala graduata. Bisogna prestare attenzione a non confondere questo valore riportato sulla scala graduata con la massa, cioè con la quantità di materia costituente l'oggetto in esame.

I dinamometri costruiti per un uso professionale, che siano digitali o meccanici, si distinguono per funzionalità, praticità e portata; vengono assemblati e tarati secondo dei

rigidi standard di fabbricazione. Per poter misurare il peso di un corpo senza possibilità di errore, lo strumento deve essere appeso ad un supporto rigido, mantenuto fermo ed in posizione verticale durante la lettura. Se viene utilizzato in posizione inclinata, la lettura del valore sarà errata. I dinamometri meccanici più vecchi hanno una molla con la scala graduata che indica valori in chilogrammi peso, Newton o dyne. Gli strumenti più moderni hanno un display digitale e l'intensità della forza viene calcolata sfruttando il medesimo principio ma il valore viene visualizzato direttamente sul display.

Tutti i dinamometri, meccanici o digitali, si basano sulla legge di Hooke, in cui l'allungamento di un corpo elastico dovuto alla forza di attrazione gravitazionale, è direttamente proporzionale alla forza che vi è applicata. Pertanto, più si esercita una tensione sulla molla e maggiore sarà la sua deformazione. Questo strumento di misurazione permette di realizzare due diverse prove meccaniche; la prova di trazione e la prova di flessione. Il dinamometro è costituito da due colonne verticali che sorreggono una robusta traversa orizzontale fissa. Tra le colonne scorre una traversa orizzontale mobile su cui si aggancia il provino del materiale da analizzare.

La prova di trazione viene eseguita secondo la norma ISO 527 ed il provino, fissato con dei morsetti in posizione verticale tra la traversa fissa e quella mobile, viene sollecitato da una forza di trazione esercitata dalla traversa mobile che si sposta ad una velocità prestabilita e si ottiene un grafico che rappresenta la curva sforzo/deformazione. Il materiale da testare, viene sottoposto ad una deformazione costante nel tempo fino all'inevitabile rottura, oppure fino a che l'allungamento raggiunge un valore prestabilito.

La prova di flessione viene eseguita secondo la norma ISO 178. Il provino da testare viene appoggiato alla traversa inferiore tramite un supporto adatto e viene sottoposto ad un carico nella parte centrale fino a che non si rompe o fintanto che la deformazione non raggiunge un valore predeterminato.



Dinamometro per prove di trazione ISO 527

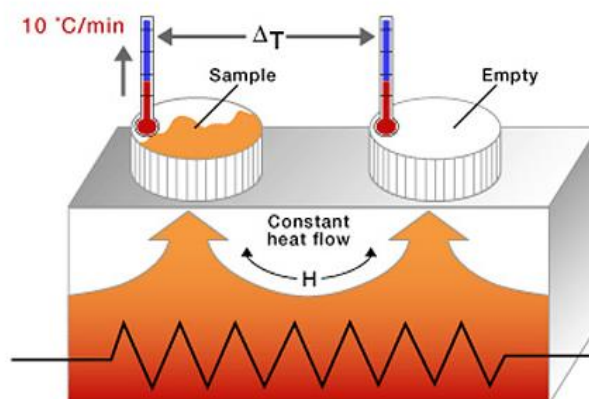
Calorimetria Differenziale a Scansione DSC

La calorimetria differenziale a scansione, nota anche con l'acronimo **DSC** (dall'inglese Differential Scanning Calorimetry) è una tecnica di analisi termica. Viene utilizzata per determinare la temperatura ed il flusso di calore associato alle transizioni che avvengono durante l'analisi di un campione di materiale. Esso può essere entalpie di fusione, transizioni vetrose e cinetiche di cristallizzazione dei polimeri. La tecnica di base che ci permette di ricavare queste informazioni sul materiale da analizzare è quella di sottoporlo a riscaldamento o a raffreddamento in modo controllato.



Calorimetro DSC

La calorimetria differenziale a scansione si basa come principio di funzionamento, sulla misura della differenza del flusso termico tra il campione di materiale in esame ed uno di riferimento, mentre entrambi sono vincolati da una temperatura variabile e definita da un programma prestabilito. Il dispositivo viene preparato mettendo sugli alloggiamenti di cui è equipaggiata, due crogiuoli identici di materiale resistente alle temperature di prova senza che possa interagire con il materiale sotto esame. Uno dei due crogiuoli resta vuoto in quanto è il riferimento per la misura differenziale.

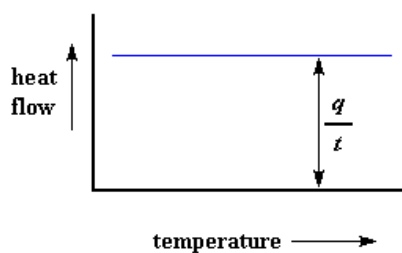


Principio di funzionamento del Calorimetro DSC

Si isola l'ambiente di prova con l'ambiente esterno chiudendo ermeticamente la fornace e si avvia il programma di ciclo termico del calorimetro. Si crea all'interno un'atmosfera inerte con un flusso continuo ed uniforme di Azoto che permette una distribuzione uniforme di calore tra il campione in esame e quello di riferimento.

Per tutta la durata dell'esperimento, un sistema di termocoppie raccoglie i dati delle temperature rilevate ed invia i valori ad un computer che mediante un apposito software, li elabora per generare i risultati.

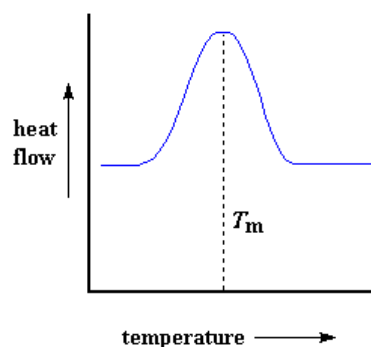
A questo punto si analizza il termogramma:



Nota: sulle ordinate c'è il flusso di calore, sulle ascisse la temperatura.

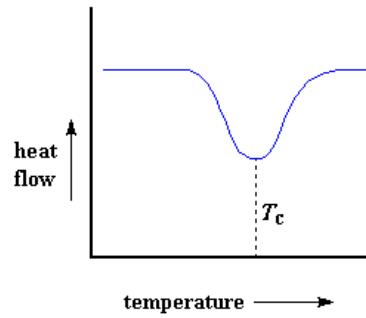
Termogramma con flusso di calore a temperatura costante

Si può operare in “end-up” o in “end-down”; nel caso si operi in “end-up”, per la fusione (fenomeno endotermico), sul termogramma osserveremo un picco rivolto verso l'alto che corrisponde all'aumento del flusso di calore in quanto, oltre una certa temperatura T_m , l'agitazione molecolare è talmente elevata da vincere le forze di coesione molecolare nei cristalli, i quali si rompono (fondono) assorbendo calore.



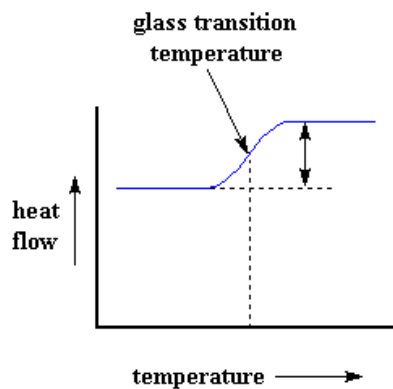
Termogramma per fenomeno endotermico (fusione)

Per la cristallizzazione (fenomeno esotermico), osserveremo un picco rivolto verso il basso che corrisponde alla diminuzione del flusso di calore in quanto il composto, ricristallizzandosi, cede calore.



Termogramma per fenomeno esotermico (cristallizzazione)

L'area sottesa al picco (ΔH) corrisponde alla quantità di calore assorbita o ceduta dal campione nell'intervallo considerato. Possiamo osservare anche la temperatura di transizione vetrosa (T_g) di un polimero, che rappresenta il valore di temperatura al di sotto della quale, un materiale amorfo si comporta da solido vetroso. Superando una certa temperatura, otteniamo un maggiore flusso di calore ed anche un aumento del calore specifico del polimero e il nostro grafico salirà verso l'alto improvvisamente.



**Sulle ordinate c'è il flusso di calore;
sulle ascisse, la temperatura. La freccia
in alto indica la temperatura di
transizione vetrosa**

Termogramma della zona di transizione vetrosa

Terminata la prova, un dispositivo di raffreddamento della fornace permette all'operatore di aprire la macchina e rimuovere i crogioli.

Naturalmente la deflessione della cristallizzazione e il picco di fusione si verificheranno solo per quei polimeri che sono in grado di formare dei cristalli. I polimeri completamente amorfi, invece, non mostreranno alcuna cristallizzazione né alcuna fusione. Comunque, tutti i polimeri, sia quelli cristallini che quelli amorfi, avranno tutte le caratteristiche rappresentate nel grafico.

Nel grafico DSC si nota chiaramente una differenza importante tra la transizione vetrosa e le altre due transizioni termiche di cristallizzazione e di fusione. Nella transizione

vetrosa non v'è flessione n'è un picco, in quanto il polimero non rilascia né assorbe il calore latente durante la transizione.

Alla temperatura di transizione vetrosa, si vede che avviene un cambiamento di calore specifico del polimero. Questo cambiamento non coinvolge il calore latente con la transizione vetrosa; essa stessa viene definita transizione di secondo ordine. Le transizioni come la fusione e la cristallizzazione, in cui è presente il calore latente, vengono definite transizioni del primo ordine.

Livello di Cristallinità

Grazie alla DSC, è possibile rilevare quanto un polimero sia cristallino e quanto è amorfo. Nella realtà, sono molti i polimeri che sono costituiti sia materiale amorfo che cristallino. Ma quanto di uno e dell'altro? La DSC può rivelarcelo. Se è noto il calore latente di fusione, ΔH_m , possiamo ottenere la risposta.

Per prima cosa, bisogna misurare l'area del grafico sottostante la curva del picco che si ottiene con la fusione del polimero. Il grafico precedente si riferisce al flusso di calore per ogni grammo di materiale rapportato alla temperatura. Il valore del flusso di calore è quello rilasciato in ogni secondo; quindi, l'area di picco è data da:
unità di calore x temperatura x tempo⁻¹ x massa⁻¹. Normalmente si misura in joules x kelvins x (secondi)⁻¹ x (grammi)⁻¹.

$$\text{area} = (\text{calore} \times \text{temperatura}) / (\text{tempo} \times \text{massa}) = (\text{JK}) / (\text{sg})$$

Se ora dividiamo il valore dell'area ottenuta con la velocità di riscaldamento del nostro esperimento DSC, otteniamo una semplificazione dell'espressione. La velocità di riscaldamento è espressa in unità di K/s.

$$\text{area} / \text{velocità di riscaldamento} = [(\text{J K}) / (\text{s g})] / (\text{K s}) = \text{J} / \text{g}$$

Si ottiene così un valore in joules per grammo. Dato che conosciamo già la massa del campione, possiamo ulteriormente semplificare. Questo valore lo moltiplichiamo per quello della massa del campione.

Ora possiamo calcolare il calore totale che viene rilasciato quando il polimero fonde. Se eseguiamo il medesimo calcolo sulla flessione della curva sul grafico DSC relativo alla cristallizzazione del polimero, si ricava il calore totale assorbito durante la fase di cristallizzazione. Il calore viene definito come il calore totale rilasciato durante la fusione $H_{m,\text{totale}}$ e viene definito calore di cristallizzazione $H_{c,\text{totale}}$

Ora eseguiamo una sottrazione:

$$H_{m,\text{totale}} - H_{c,\text{totale}} = H'$$

Il risultato H' è il calore rilasciato da quella parte del campione di polimero in esame che si trova già nello stato cristallino prima di riscaldarlo oltre la temperatura di cristallizzazione T_c .

Il motivo per cui sottraiamo il calore rilasciato al momento della cristallizzazione è perché a noi serve sapere la quantità di polimero che si trovava allo stato cristallino prima di portare dell'altro polimero a diventare anch'esso allo stato cristallino. Grazie al valore ottenuto di H' , si può ottenere la percentuale di cristallinità.

Il calore specifico di fusione è la quantità di calore rilasciato da un grammo di polimero; H' è misurato in joules, ed il calore specifico di fusione viene calcolato normalmente in joules per grammo. Dividendo il valore H' per il calore specifico di fusione H^*_m avremo un risultato in grammi.

$$H' / H^*_m = m_c J / (J/gr) = gr$$

Questo valore in grammi è la quantità totale di polimero che si trovava allo stato cristallino al di sotto della temperatura T_c . Dividendo questo valore per il peso del campione in esame, otteniamo la frazione del campione che era cristallino e cioè la percentuale di cristallinità.

$$m_c / m_{totale} = \text{frazione cristallina}$$

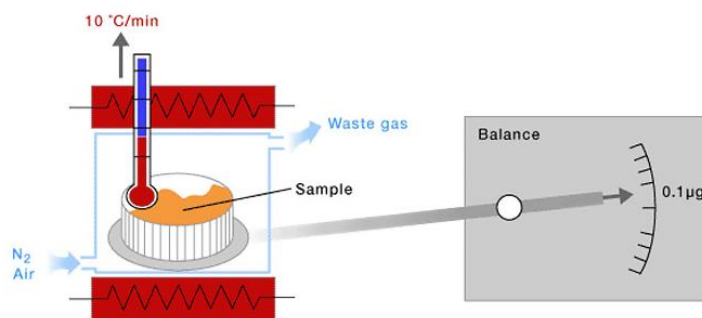
frazione cristallina x 100 = % di cristallinità

Analisi Termogravimetrica TGA

Una tecnica sperimentale di caratterizzazione dei materiali tra le più usate e rientrante nell'ampia famiglia dell'analisi termica è la **termogravimetria (TG)** o **analisi termogravimetrica (TGA)**. Questa tecnica di analisi termica, si basa sulla misurazione continua per un certo periodo di tempo, della variazione della massa di un campione di materiale in funzione del tempo o della temperatura, con il campione posto in atmosfera controllata e inerte.

Il risultato di questa analisi è un diagramma chiamato **Termogramma o Curva di decomposizione termica**, la cui curva caratteristica riporta la variazione di peso sull'asse Y, in valore assoluto o in percentuale, in funzione del tempo posto sull'asse X.

Questo metodo di analisi termica consente di valutare le variazioni di peso del campione di materiale in funzione della temperatura e del tempo. L'analisi TGA deve essere eseguita sempre in condizioni atmosferiche definite per poter analizzare la riduzione di peso di un campione di materiale plastico sottoposto a variazioni della temperatura.



Principio di funzionamento di una TGA

Per eseguire questo tipo di analisi termica, sono necessari i seguenti componenti fondamentali:

- **Bilancia termica o Termobilancia:** questo componente è indispensabile, serve per monitorare la variazione di peso del materiale in esame. Solitamente il sistema si basa sulla tecnologia di monitoraggio mediante l'uso di fotodiodi che rilevano in continuo la posizione dei bracci della termobilancia. Un braccio è inserito nella fornace contenente il campione di materiale, mentre il secondo braccio ha un porta-campione vuoto di riferimento. La variazione di massa del campione posto nella fornace produce un movimento del braccio della bilancia che intercetta i fotodiodi. La variazione di corrente emessa dal fotodiodo viene amplificata e trasformata in un segnale che tramite il sistema di elaborazione, viene trasformato in un valore di massa o di perdita di massa.
- **Fornace:** è il componente atto a garantire il raggiungimento di temperature elevate senza incorrere nel rischio di danneggiare il materiale. Viene costruita con materiale refrattario (in quarzo per temperature di fusione superiori ai 1700 °C o in allumina per temperature di fusione superiori ai 2000 °C).
- **Crogioli:** sono dei contenitori realizzati in materiale inerte, i più comuni sono realizzati in acciaio (per applicazioni con temperature inferiori ai 600-650°C), oppure in platino o allumina per le temperature superiori. Servono a contenere il campione di materiale da analizzare ma anche come contrappeso di riferimento.
- **Sistema di controllo temperatura:** è fondamentale per riuscire a garantire la realizzazione di diversi programmi di analisi termica in modo corretto quali il mantenimento costante della temperatura (prova isoterma) e test con azioni concatenate di riscaldamento e raffreddamento (prova rampa di temperatura), salti termici ed alti test. Delle termocoppie rilevano in continuo la temperatura, sono sonde realizzate di platino rivestito in materiale ceramico e vengono poste all'interno della fornace vicino al campione da analizzare.
- **Sistema di ventilazione e ricircolo dei gas:** necessario per condizionare e mantenere sotto controllo l'atmosfera interna alla fornace, serve anche per espellere eventuali gas formati a seguito della degradazione del materiale analizzato.

- **Sistema di registrazione in continuo del peso del campione:** la termobilancia tramite degli appositi trasduttori, rileva il peso del campione in modo continuo e lo trasforma in un segnale elettrico che viene inviato ad un elaboratore che registra la variazione di peso del campione nel tempo.

Tutti questi componenti elencati, sono ormai incorporati in un unico dispositivo di analisi. La registrazione dei dati viene eseguita direttamente all'interno della macchina stessa o grazie ad un computer collegato ad essa che viene anche usato successivamente per l'elaborazione dei dati.



Macchina TGA da laboratorio

Attualmente, le termobilance disponibili in commercio, permettono di analizzare delle quantità di materiale in piccole quantità, siamo nell'ordine dai 5 fino a 20 milligrammi per le applicazioni standard ma si può arrivare fino ad 1 grammo di materiale. Nel settore industriale del controllo qualità, si utilizzano delle speciali termobilance che permettono di analizzare quantità di materiale di alcune centinaia di grammi.

La precisione e la sensibilità di questi dispositivi, che è data dalla tecnologia dei fotodiodi, è nell'ordine dei microgrammi cioè mille volte inferiore alla quantità media del materiale che viene analizzato.

La tecnologia odierna e le proprietà dei materiali utilizzati nella costruzione di questi dispositivi standard come l'allumina ed il quarzo, consentono di analizzare i campioni di materiale in un campo di temperature che va da quella ambientale (20-25 °C) fino ai 1000-1200 °C. L'impiego di materiali altamente resistenti alle temperature più elevate come il tungsteno, carburo di tungsteno o la grafite, e la tecnologia di lavorazione relativa, ha permesso di realizzare fornaci in grado di analizzare i materiali alle temperature più elevate, dai 1500 °C ad oltre i 2400 °C.

Il tipo di fornace utilizzata condiziona anche le velocità di riscaldamento utilizzabili in quanto il parametro è strettamente correlato alle proprietà termiche dei materiali utilizzati nella costruzione della fornace e dei crogiuoli, in particolare il calore specifico (c_p) e la conducibilità termica (λ). I campi di temperatura possibili vanno dagli 0 °C minimo ai 100 °C per i modelli standard e fino a 1000 °C per quegli strumenti di ultima generazione.

Negli ultimi 15 anni sono stati posti in commercio, grazie allo sviluppo della tecnologia nel campo dell'elettronica, dei dispositivi in grado di eseguire dei cicli termici molto complessi; in questi programmi si sovrappone al segnale termico proveniente dalle termobilance, un segnale sinusoidale di ampiezza arbitraria selezionabile in funzione dell'applicazione. Questa configurazione viene chiamata **termogravimetria modulata** o ad alta risoluzione.

Questo tipo di analisi termica, permette di distinguere i funzione del tempo o della temperatura, dei fenomeni che non sono del tutto o in parte separabili mediante un'analisi termo gravimetrica tradizionale.

L'atmosfera all'interno della fornace è strettamente controllata, i gas che più vengono usati per il condizionamento dell'aria sono divisibili in due categorie:

- Gas Inerti: comunemente si utilizzano azoto, elio e argon con differenti gradi di purezza
- Gas Reattivi: in questo caso si utilizzano ossigeno, anidride carbonica, monossido d'azoto e molti altri. Spesso si utilizzano anche delle miscele in proporzioni differenti a seconda della specifica applicazione.

Bisogna sempre considerare che la termogravimetria, ed in generale tutte le tecniche di analisi termica dei materiali, a differenza di altre tecniche e metodi di caratterizzazione dei materiali come le tecniche spettroscopiche (IR, FTIR, etc.), non forniscono una indicazione diretta del materiale responsabile del risultato ottenuto (la cosiddetta **impronta digitale** del materiale).

Dato che l'analisi termogravimetrica si effettua, solitamente, su dei campioni di materiale che vengono sottoposti ad elevate o elevatissime temperature, bisogna sempre tenere in considerazione che la strumentazione di analisi subisce comunque uno stress termico; pertanto bisogna prevedere periodicamente delle verifiche su tutti i componenti critici (fornace, crogiuoli, termobilancia, fotodiodi, sistema di ventilazione, ecc..) che siano in buone condizioni ed esenti da rotture, che la strumentazione e tutte le componenti siano adeguatamente calibrati mediante l'uso di standard differenti. Di solito, ogni componente viene tarato e calibrato separatamente, se necessario.

Di questi componenti, certamente la termobilancia è il componente più sensibile e delicato della strumentazione. Ne viene prevista una verifica periodica ogni 2 o 3 mesi, valutando il corretto funzionamento mediante l'ausilio di pesi standard certificati in numero variabile a seconda del fondoscala della strumentazione e dei futuri campi applicativi delle analisi condotte.

La scala delle temperature misurate viene calibrata e regolata dal sistema di controllo del dispositivo e viene effettuato sfruttando un noto fenomeno fisico, caratteristico di alcuni materiali metallici e di alcune leghe, verificando il punto di Curie (o temperatura di Curie).

Questa particolare tecnica di taratura, si esegue applicando un campo magnetico alla fornace e si porta il riscaldamento ad una velocità predefinita e mantenuta uguale per tutti gli standard analizzati. Solitamente si seleziona una velocità di riscaldamento che sia

una media tra tutte quelle utilizzate nelle analisi su materiali metallici e leghe certificate (punto di Curie noto).

Si osserverà all'aumentare della temperatura, una diminuzione di peso del campione di materiale sottoposto al campo magnetico, questo accade non per un fenomeno di degradazione del materiale ma per il raggiungimento del punto di Curie che è il punto in cui il materiale non manifesta più proprietà elettromagnetiche.

L'uso di vari standard e le relative temperature di Curie, dipendono dall'ampiezza coperta durante le analisi sui campioni non noti a priori; è una buona norma che ogni standard sia diverso dal precedente, come temperatura di Curie, di circa 150 – 200 °C.

Durante l'analisi, devono essere utilizzati dei gas che siano verificati in termini di purezza e selezionati per la specifica analisi e di volume di flusso alla fornace. Di solito un gas inerte come l'azoto o l'elio, viene utilizzato durante le fasi di calibrazione dello strumento; i flussi vengono controllati e regolati con un flussimetro indipendente da quello presente, eventualmente, nel dispositivo.

Indipendentemente dalla macchina, la purezza del gas può sempre essere accertata mediante un prelievo di un campione di gas ed una sua analisi effettuata grazie ad un **gascromatografo** o direttamente nel macchinario realizzando una scansione dalla minima alla massima temperatura richiesta dal normale utilizzo, utilizzando come campione un materiale particolarmente sensibile all'ossidazione (generalmente il rame).

Nel caso che si verifichino degli incrementi di peso durante l'analisi, può essere correlata al livello di impurità del gas inerte selezionato. Alcune applicazioni richiedono un grado di purezza assoluto, pertanto vengono inserite sulla linea di ventilazione, delle "trappole" ad alto rendimento in grado di intercettare ed eliminare i residui di impurità.

Vi sono dei fattori che influenzano il risultato di una analisi e che dovrebbero essere mantenuti costanti una volta che sono stati selezionati e ottimizzati per una specifica applicazione. Questo permette di ottenere dei risultati comparabili tra loro, come il confronto tra la stabilità termica tra materiali differenti o ad una individuazione corretta di differenti materiali contenuti all'interno dei campioni analizzati e la proporzione rispetto alla massa iniziale. Questi parametri dipendono per la maggior parte dai componenti della strumentazione d'analisi, in particolare:

- La quantità di materiale analizzato: teoricamente è identica per tutte le analisi condotte nella medesima sessione di prove su di uno specifico materiale o in materiali differenti da confrontare.
- Il programma termico utilizzato: questo in particolare, influisce in modo significativo la velocità di riscaldamento.
- La tipologia di crogiolo: bisogna tenere in debita considerazione anche il materiale con cui viene realizzato il crogiolo il quale, anche se di materiale adatto per resistere alle alte temperature, possiede una propria inerzia termica.
- L'entità dei flussi di gas nella fornace: questo parametro è in grado di influire in modo significativo sull'esito dell'analisi, l'esistenza di moti turbolenti o di vortici

che possono generarsi all'interno della fornace, alterano il valore di peso registrato in continuo dalla termobilancia. Oltre a questo vi è anche da tenere in considerazione l'effetto Buoyancy.

- La pulizia della fornace: questa operazione da effettuarsi manualmente con l'uso di un solvente appropriato o mantenendo la fornace alla massima temperatura raggiungibile (circa 900 – 1000°C) per un determinato tempo in atmosfera ossidante.

Prima di effettuare un'analisi su di un campione di materiale prescelto, è preferibile effettuare un'analisi preliminare, senza alcun campione nei crogioli ma impostando i parametri di processo per le future prove e registrando il segnale base della strumentazione; questo segnale sarà la diretta indicazione dello stato di buon funzionamento dell'apparecchiatura.

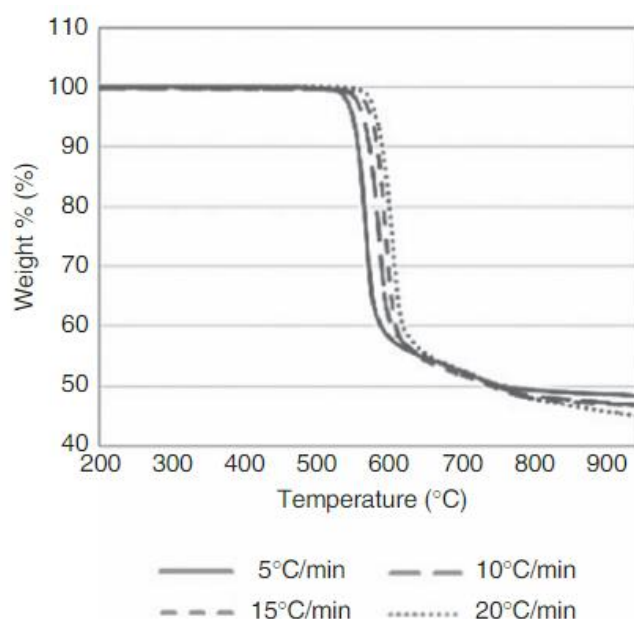


Diagramma TGA ottenuto per il polimero PEEK con diversi incrementi di temperatura.

Analisi agli infrarossi (spettroscopia FT-IR)

La spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR) è largamente impiegata sin dalla fine degli anni 80 del secolo passato, per la caratterizzazione dei materiali polimerici. La spettroscopia infrarossa convenzionale è stata utilizzata per la caratterizzazione qualitativa e quantitativa dei polimeri con l'uso di spettrometri convenzionali. Era una tecnica spettroscopica molto utilizzata per determinare dei gruppi terminali e del grado di ramificazione oltre che per l'identificazione degli additivi, delle impurezze ed altri componenti.

Questa tecnica è stata anche impiegata per la determinazione quantitativa della stereoregolarità nell'isomeria cis-trans e nello studio della conformazione dei materiali polimerici. Nello specifico sono stati condotti molti studi per la determinazione e

l'assegnazione delle vibrazioni corrispondenti alle conformazioni ad elica dei polimeri semicristallini come il polipropilene o il polistirene.

Dall'anno 2010 in poi, grazie all'importante sviluppo della spettroscopia di risonanza magnetica nucleare, le applicazioni della spettroscopia FT-IR sugli studi conformazionali o sui polimeri stereospecifici sono state progressivamente abbandonate, mentre l'uso analitico di questa tecnica spettroscopica, per le analisi semiquantitative e non-distruttive sui polimeri, ha avuto un'evoluzione costante, continua e crescente.

Anche le tecniche di riflettanza attenuata hanno avuto degli sviluppi interessanti grazie all'impiego di nuovi materiali con particolari proprietà ottiche, come l'uso di celle a diamante, così come la spettroscopia nel vicino infrarosso (FT-NIR) ha avuto uno sviluppo interessante.

Tra tutte le tecniche spettrografiche, la spettrografia nel vicino infrarosso (FT-NIR) è quella che ha avuto negli ultimi anni il maggior sviluppo ed il maggior successo. Questa tecnica può essere applicata molto facilmente, con opportune modifiche agli strumenti disponibili in commercio, grazie alla sua versatilità, per l'analisi di campioni aventi uno spessore variabile tra 1 e i 10 cm, in ambito di controllo di qualità e dei processi industriali in tempo reale, grazie a fibre ottiche a basso costo.

Questa spettroscopia FT-NIR si basa sull'utilizzo di bande vibrazionali assegnate alla combinazione o alla risonanza dei nodi molecolari fondamentali che vengono osservati nella regione dello spettro del medio infrarosso ($4000-400\text{ cm}^{-1}$).

La spettroscopia agli infrarosso FT-IR viene oggi impiegata con successo nelle analisi semiquantitative e non-distruttive sui materiali polimerici solidi, in polvere, in soluzione in emulsione ed anche depositati su superfici metalliche.

Nel corso degli anni vi è stata un'evoluzione delle metodologie analitiche applicate anche alla spettroscopia FT-IR, queste sono aumentate con la diffusione di componenti commerciali a costi contenuti per la determinazione degli spettri in riflettanza totale attenuata (ATR), diffusa (DR) e speculare (RS). Le stesse metodologie di riflettanza sono state combinate con la microscopia ottica per ottenere la determinazione degli spettri FT-IR dei materiali polimerici a spessore sottile.

Al giorno d'oggi, con le misure di riflettanza, vengono eseguite la maggior parte delle analisi non distruttive sui materiali polimerici.

Probabilmente è questo il motivo del successo dell'analisi FT-IT, per cui la spettroscopia Raman in trasformata di Fourier (R-FT) non è riuscita ad assicurarsi un largo impiego nella caratterizzazione dei materiali polimerici. La spettroscopia R-FT, purtroppo, non permette della analisi quantitative ed è stata utilizzata con un buon successo soltanto sui materiali polimerici luminescenti.

Varie combinazioni tra la spettroscopia FT-IR e le altre tecniche analitiche di caratterizzazione dei polimeri, sono state proposte nel corso del tempo come la calorimetria differenziale a scansione (FTIR-DSC) o la gascromatografia (FTIR-GC), la termo gravimetria (FTIR-TGA) e la cromatografia a permeazione di gel (FTIR-GPC).

La FT-IR prevede il passaggio di una luce agli infrarossi attraverso un campione di materiale polimerico. Durante il passaggio del fascio di luce nel materiale campione, la luce cede una parte della sua energia provocando la vibrazione e la torsione o l'allungamento delle strutture molecolari del campione di polimero. La luce risultante viene poi confrontata con un fascio di luce di riferimento e la differenza di intensità è il risultato che viene rappresentato in un grafico con dei picchi. Con questa tecnica si possono analizzare con estrema precisione i materiali, per l'analisi dei guasti e per lo sviluppo di compound polimerici.

La tecnica spettroscopica infrarossa o spettroscopia IR, è una tecnica “di assorbimento” ed è normalmente usata nel campo della caratterizzazione dei materiali e per lo studio dei legami chimici. Infatti quando un fotone infrarosso viene assorbito da una molecola del materiale in esame, la molecola passa dal suo stato vibrazionale fondamentale ad uno stato di vibrazione eccitato. In un grafico di un tipico spettro infrarosso, metteremo in ascissa il numero d'onda del fotone incidente e nell'ordinata, il valore della trasmittanza.

Lo stiramento del legame chimico (stretching) e la deformazione dell'angolo di legame chimico (bending) sono le due sole possibili vibrazioni molecolari; nello spettro a infrarosso si possono distinguere due zone:

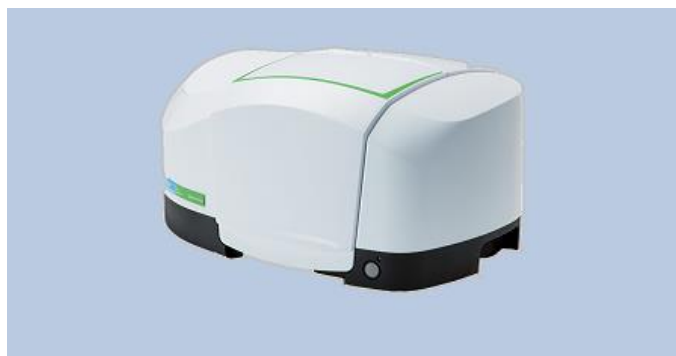
La zona dei gruppi funzionali, che si estende in un campo di lunghezze d'onda che va dai 3800 ai 1300 cm^{-1} e comprende gruppi dovuti a stiramenti che a deformazioni di gruppi funzionali, per esempio legami N-H, O-H, C-H, C=C, C=O, ecc...

La zona “finger print”, che si estende in un campo di lunghezze d'onda che va dai 1300 ai 650 cm^{-1} e deve il suo nome alla presenza di bande molto caratteristiche di ciascuna molecola in quanto originata dalle vibrazioni della struttura molecolare.

La spettroscopia IR a trasformata di Fourier o **FT-IR**, si esegue con un interferometro che consente di scansionare tutte le frequenze delle lunghezze d'onda presenti nella radiazione a infrarosso generata dalla sorgente. La scansione viene eseguita con l'uso di uno specchio mobile che, spostandosi, modifica la lunghezza di cammino ottico. Questa differenza di lunghezza crea un'interferenza con il raggio riflesso da uno specchio fisso.

In questo modo, convertendo il segnale in un grafico, si ottiene un interferogramma che indica la rappresentazione dell'intensità nel dominio del tempo. Applicando la trasformata di Fourier, otteniamo lo spettro dell'infrarosso, cioè la rappresentazione dell'intensità nel dominio della frequenza.

Uno dei più grandi vantaggi della spettroscopia FT-IR è che garantisce delle prestazioni molto elevate, con un'alta disponibilità di energia che si può tradurre in un rapporto segnale/rumore nettamente migliore rispetto alla spettroscopi infrarossa classica. Ne consegue che i tempi di analisi risultano estremamente ridotti.



Spettrofotometro FT-IR

PEPT-Flow Visualisation Technology

Si tratta di un programma di ricerca sperimentale triennale iniziato il 1° gennaio del 2006 e terminato il 30 aprile del 2009, finanziato da un programma di ricerca dell'Unione Europea e composto da un consorzio di cui facevano parte aziende costruttrici, centri di ricerca universitari e associazioni di categoria.

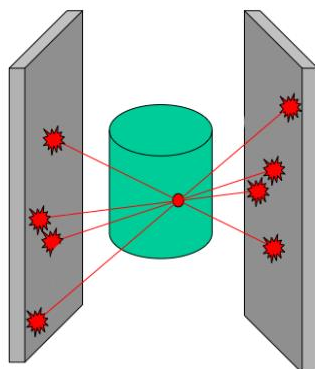
La metodologia è stata applicata per la prima volta per l'analisi del flusso del melt e della sua visualizzazione durante il processo di estrusione all'interno di un estrusore bivite. Lo scopo del progetto non era solo la ricerca e la sperimentazione, ma anche il riuscire ad individuare delle ricadute tecnologiche a livello industriale.

Lo scopo del progetto PEPT-Flow è fondamentalmente quello di analizzare il flusso del polimero e determinare l'efficienza di miscelazione di ogni elemento della vite: elementi di trasporto, dischi "impastatori" e settori di miscelazione. I risultati e l'impatto del progetto riguardano l'intera filiera della plastica e possono migliorare la competitività delle PMI europee. Un vero impatto sulla produzione di plastica e polimeri ed una rivoluzione tecnologica nel campo delle tecniche di analisi.

Determinare l'influenza del design bivite sul flusso del polimero e sul comportamento del materiale è fondamentale per ottimizzare il processo. Infatti, l'ottimizzazione del processo di estrusione porta a migliorare le proprietà del materiale (miglioramento della solidità di una plastica grazie ad una miscelazione dispersiva controllata delle cariche come esempio) e la produzione (maggiore produttività, riduzioni energetiche, ecc ...).

PEPT-Flow si occupa dell'applicazione di PEPT (Positron Emission Particle Tracking) al flusso del polimero nell'estrusione bivate. La PEPT è una tecnica sperimentale non intrusiva unica nel suo genere, essa utilizza delle particelle traccianti radioattive per misurare il flusso all'interno dell'elaborazione reale attrezzature. Il metodo è stato sfruttato prevalentemente in sistemi alimentati a granuli ma anche in sistemi con liquidi.

Il set-up sperimentale era basato su un estrusore a doppia vite Leistritz Micro 27 mm che è stato modificato dai partner ICT Fraunhofer ed Extricom per fornire una finestra per il dispositivo emettitore di positroni.

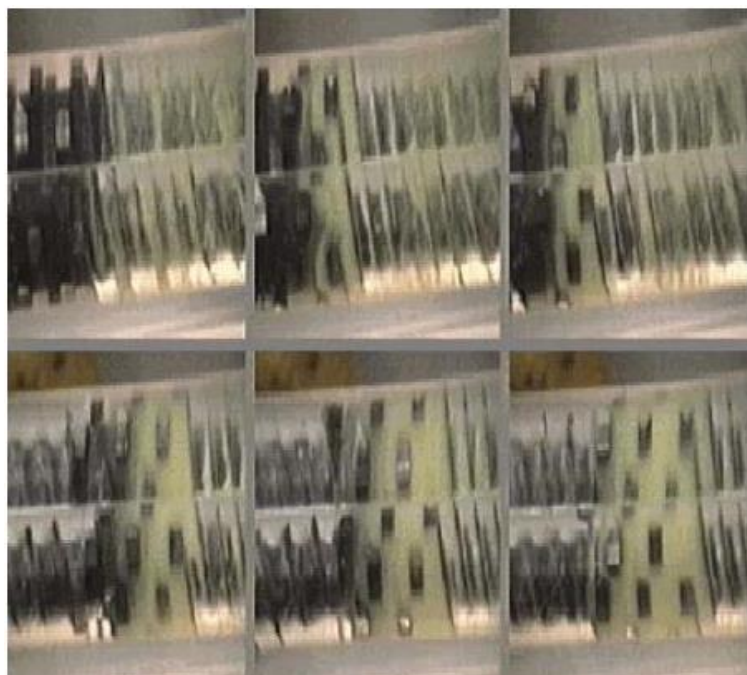


Schema di tracciamento di una particella del melt mediante raggi γ

Gli studi hanno dimostrato che l'acciaio spesso del cilindro dell'estrusore era efficacemente impenetrabile ai fotoni dei raggi γ (gamma). Affinché il PEPT potesse funzionare, quindi, era necessaria una sezione della canna con una parete di massa ridotta. Questa era realizzata da un inserto in alluminio temprato in superficie con parete nominale dello spessore di 25 mm. La lunghezza della sezione in alluminio a vista era di 110 mm ed ha fornito un campo visivo di circa 90 mm.

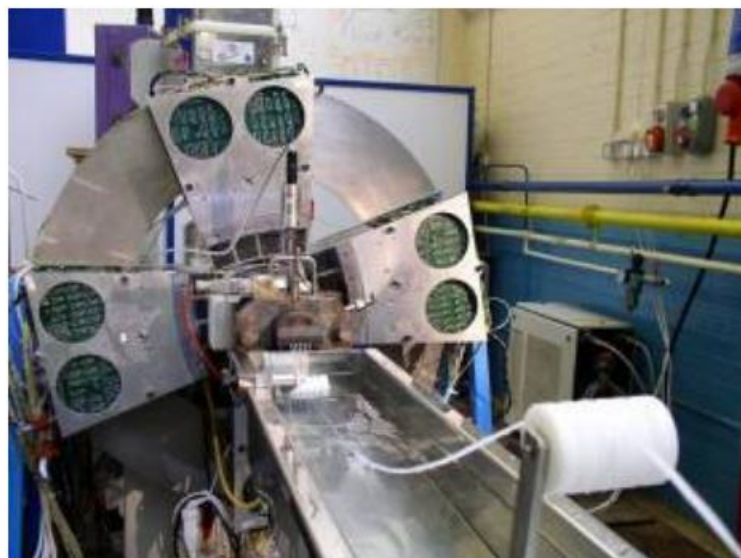
Quest'ultimo richiede una parete di un certo spessore per ridurre al minimo la dispersione dei fotoni mentre, un campo visivo maggiore, richiede uno spessore di parete superiore per resistere alla coppia di torsione erogate dalle viti. Sono stati considerati e testati, anche altri materiali di costruzione (es. come la ceramica) ma non sono stati ritenuti idonei.

Il tracciamento delle particelle di emissione di positroni, inizialmente genera i dati delle traiettorie come un elenco di coordinate dei fotoni gamma accoppiati, rilevati come un tracciante che si sposta nel campo visivo. Alcuni circuiti elettronici all'interno della camera, chiamati "schede di coincidenza", accoppiano i fotoni secondo il tempo di rilevamento. Ciascuna coppia rilevata viene definita come "evento" e la linea di collegamento è definita come una linea di risposta (LOR).



Sezione del cilindro di estrusione con finestra in vetro trasparente.

Gli eventi sono generati con frequenze fino a 106 Hz (1 MHz) e le posizioni delle particelle sono ottenute dalla triangolazione delle linee di risposta raccolte su un periodo di pochi millisecondi. I dati, tuttavia, comprendono una combinazione di 24 eventi tra veri ed i cosiddetti "corrotti". Questi ultimi derivano dal fotone in dispersione o in accoppiamento non valido e questo ridurrà l'esattezza della misurazione della posizione.



Estrusore PEPTFlowcon applicata la camera PEPT modulare

Non è possibile determinare a priori quali coppie siano vere e quali sono quelle corrotte (sebbene una parte dei fotoni siano sufficientemente dispersi da poter essere eliminati perché la conseguente perdita di energia è rilevabile e misurata dalla telecamera). Un algoritmo statistico viene quindi utilizzato per poter ottenere il massimo punto di convergenza delle linee, rimuovendo ripetutamente i valori anomali.

Questo richiede la selezione dei parametri come il numero di eventi da utilizzare per ogni posizione e quanti invece sono da scartare durante l'iterazione.

Dopo l'elaborazione dei dati, che elimina principalmente i valori anomali e il rumore, questa posizione del tracciante nel tempo può essere quindi tradotta in grafici 3D, mostrando la traiettoria individuale di questo passaggio. Sebbene questo grafico non sia realmente adatto per dei confronti quantitativi, può essere molto utile per determinare condizioni di flusso "particolari". In questa corsa individuale la particella del polimero è rimasta "bloccata" per un bel po' di tempo su una delle viti di estrusione.

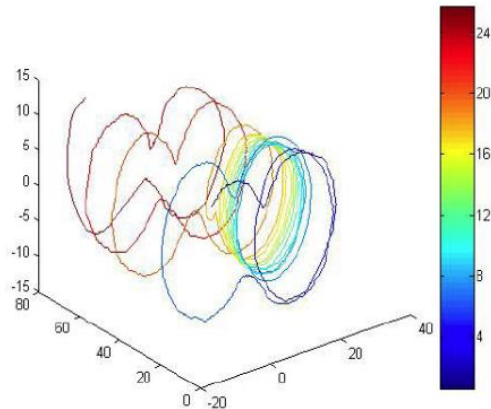
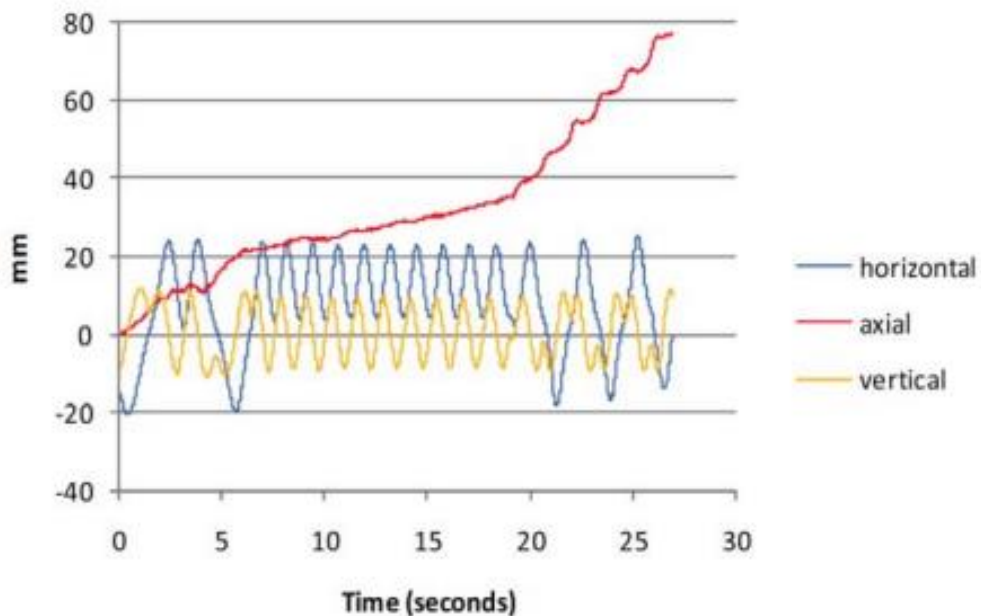


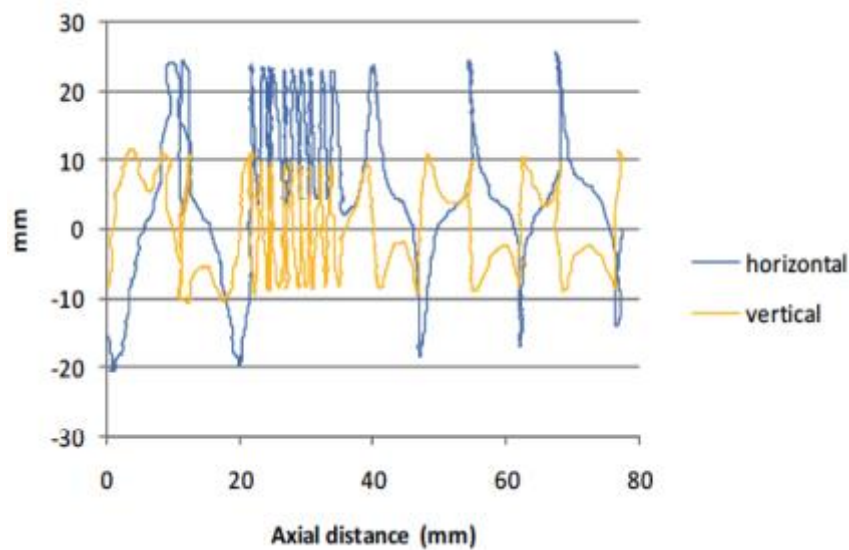
Grafico 3D del tracciamento della posizione della particella nell'estrusore

La stampa del medesimo grafico in coordinate X-Y-Z ci consente di valutare il movimento della particella di polimero da un altro punto di vista.



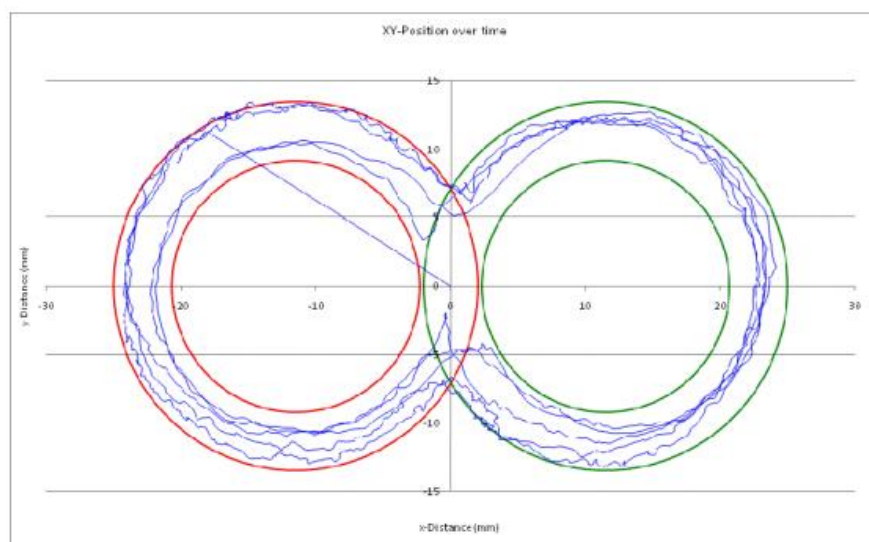
Tracciamento della particella sulle coordinate X-Y-Z rispetto al tempo

Tracciare le coordinate XY rispetto alla distanza Z, ci fornisce un'immagine realistica della proiezione del movimento della particella tracciata, che mostra in particolare le aree di movimento sia veloce che lento.



Tracciamento della particella lungo l'asse dell'estrusore rispetto alle coordinate X-Y

Tracciare le coordinate XY in un diagramma, ci fornisce la proiezione assiale del percorso del flusso, esso può fornire delle informazioni preziose su dove si trovava la particella per un certo periodo di tempo, se è passata tra le viti o è rimasta attaccata al cilindro di estrusione o ad una vite.



Tracciamento della particella attorno alle viti rispetto alle coordinate X-Y

Usando un semplice foglio di calcolo in Excel, la velocità della particella può essere illustrata con la sua velocità rispetto all'asse Z del grafico.

Questo grafico ci mostra le differenze nella velocità delle particelle che possono essere collegate in qualche modo alle capacità di miscelazione della sezione della vite.

Inoltre, mostra i chiari segni del movimento della particella, ad esempio il grafico scelto mostra che la particella si sta muovendo gradualmente nella direzione dell'asse Z mentre la sua velocità cambia costantemente.

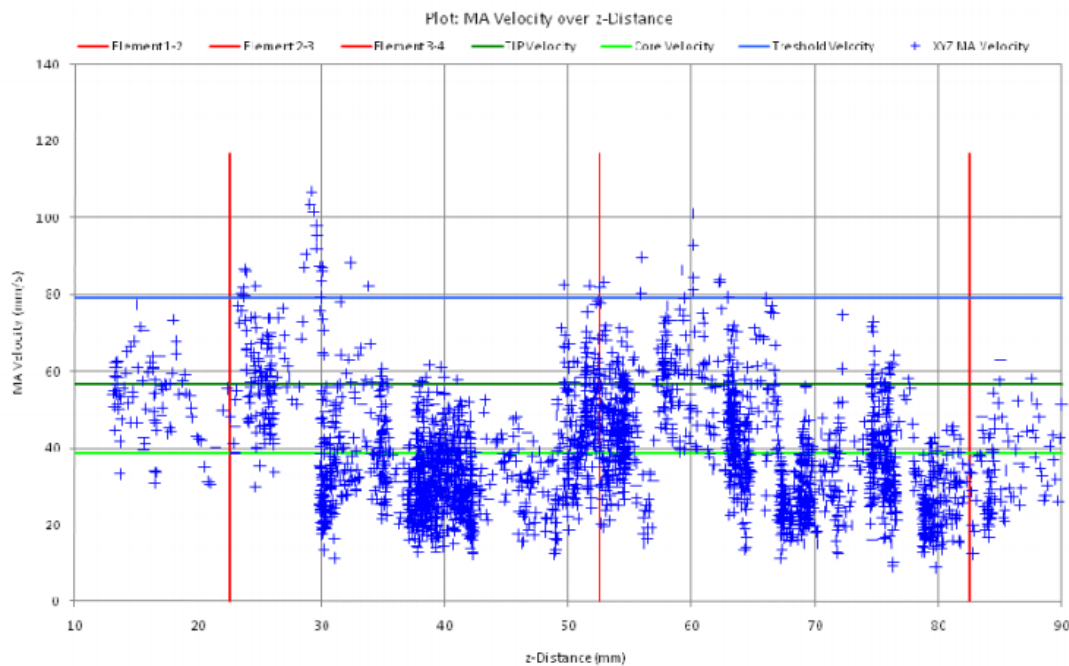


Grafico della velocità media della particella tracciata lungo l'asse Z

L'analisi dei dati ricavati dalla tecnica del PEPT-Flow non termina qui, vi sono anche altre informazioni importanti che possono essere ricavate quali:

- Tempo di residenza dell'insieme delle particelle tracciate
- Tempo di residenza di ogni singola particella tracciata
- Tempo totale di attraversamento della sezione delle viti impiegato dalla particella
- Traiettoria del flusso
- Velocità nello spazio 3D della particella lungo gli assi X-Y-Z
- Numero relativo di eventi, per esempio dove si trova la velocità spaziale 3D maggiore della velocità della particella
- Numero relativo di eventi in cui la particella è molto vicina alla superficie della parete interna del cilindro di estrusione.

Questa nuova tecnica sperimentale però ha anche dei limiti evidenti, che per ora sono:

- Limitazione sulla frequenza di posizione e levigatura dei componenti necessaria per evitare i rumori eccessivi, è attualmente possibile monitorare la velocità delle viti fino a 300 giri / min. massimi.

- Solo una particella può essere tracciata in ogni singola prova, sono solamente 50 o 60 le tracce che possono essere rilevate in un giorno lavorativo.
- Attualmente, il campo visivo è limitato ad una lunghezza delle viti di 2,5-3 D.

SICUREZZA DELL'ESTRUSORE

Introduzione

Esiste da molti anni la norma Europea armonizzata che definisce i requisiti di sicurezza, è la EN 1114-1:1998 e che ha per titolo: *Macchine per materie plastiche e gomma - Estrusori e linee di estrusione - Parte 1: Requisiti di sicurezza per estrusori.*

Essa è una norma armonizzata cioè una norma valida in tutti i paesi dell'Unione europea, sono delle norme europee che vengono adottate dagli organismi europei preposti alla normazione (CEN, CENELEC, ETSI), sono preparate in base agli orientamenti della Commissione Europea e sono preparate su mandato della medesima, previa una consultazione con gli stati membri.

Quando vengono pubblicati i riferimenti nelle Gazzette Ufficiali dei paesi appartenenti alla Comunità europea, le norme armonizzate conferiscono la presunzione di conformità i requisiti essenziali delle Direttive di Prodotto. Infatti, una norma nazionale che traspone una norma armonizzata di cui sono stati pubblicati i riferimenti normativi, conferisce automaticamente la presunzione di conformità ai requisiti essenziali delle direttive applicabili e disciplinati da tale norma.

La pubblicazione nella Gazzetta ufficiale delle Comunità europee dei riferimenti alle norme serve a fissare la prima data utile in cui la presunzione di conformità ha effetto. L'applicazione delle norme armonizzate, che conferisce presunzione di conformità, rimane tuttavia volontaria nell'ambito delle direttive di nuovo approccio: un prodotto può pertanto essere fabbricato direttamente sulla base dei requisiti essenziali delle Direttive di Prodotto.

La conformità ad una norma nazionale che traspone una norma armonizzata di cui sono stati pubblicati i riferimenti normativi conferisce presunzione di conformità ai requisiti essenziali delle direttive di nuovo approccio applicabili disciplinati da tale norma.

In questo documento troviamo elencati tutti i possibili pericoli esistenti nella macchina. Riassumendo brevemente, i pericoli esistenti sono di varia natura, soprattutto di tipo meccanico, termico, elettrico e acustico.

Pericoli associati all'estrusione

L'estrusore bivate è una macchina sofisticata che consente una lavorazione intrinsecamente pericolosa. L'estrusore per plastificare il polimero con cui viene alimentato, ha la necessità di riscaldarlo a temperature comprese tra i 150°C ed i 250°C ed anche oltre, a seconda del polimero.

La macchina deve processare il polimero con una coppia di viti, che sono azionate da un riduttore ed un motore elettrico con una trasmissione diretta tramite un giunto di sicurezza o con delle pulegge e cinghie di trasmissione.

Vi sono quindi una serie di pericoli quali il trascinarsi ed il taglio da organi in movimento, il pericolo di folgorazione da alimentazione elettrica, il pericolo di ustioni causati dalle elevate temperature della macchina in molte delle sue parti e dal polimero stesso in uscita dall'estrusore, il pericolo per la salute degli operatori a causa della formazione di gas pericolosi (cloro, monomero di pet, ecc...) che fuoriescono dall'estrusore se non sono adeguatamente convogliati in un dispositivo estrazione (caminetto di degasaggio) a tenuta stagna ed equipaggiato con un abbattitore.

Come già anticipato, il processo di estrusione è relativo alla trasformazione dei polimeri partendo dal materiale di base allo stadio di granuli o di polveri, per arrivare a dei semilavorati o dei manufatti della forma e del colore desiderato. In particolare, il processo di estrusione prevede:

- l'approvvigionamento di materia prima (granulati plastici o polveri) mediante l'aspirazione da contenitori posizionati sulle linee produttive vicino agli estrusori;
- la miscelazione con altri prodotti (es. coloranti, stabilizzanti, cariche rinforzanti) all'interno della tramoggia;
- l'estrusione a caldo (150° - 250° C), con o senza sagomatura;
- la calibrazione e l'inserimento di altri componenti accoppiati (es. in cavità di filo metallico per tirafili, tele di rinforzo, film di diverso polimero, ecc);
- il raffreddamento
- il traino, che è costituito da organi di trazione come calandra a rulli gommati o traino a cingolo e che serve a dare continuità all'estrusione;
- l'avvolgimento del materiale (film, foglia, tubi, filo) in bobine o rocchetti, che vengono trasferiti in magazzino prima della spedizione;
- l'impilamento di lastre o profili, che vengono trasferite nelle zone di stoccaggio;
- il taglio del materiale alla lunghezza predeterminata viene effettuato con una apposita apparecchiatura (taglierina a lama rotante, a ghigliottina, a lama fissa);
- la marcatura del materiale, se richiesta (es. dei tubi, con il laser o altri meccanismi);

Stoccaggio delle materie prime.

Lo stoccaggio delle materie prime avviene usando vari tipi di contenitori quali big bag, sacchi da 25 kg ed involucri di cartone chiamati octabin, di varie misure. L'elevata produttività degli impianti industriali, richiede che le materie prime siano immagazzinate in un ambiente separato dal reparto produttivo. Da questo magazzino vengono prelevate mediante carrelli elevatori, traspallet o sistemi pneumatici di convogliamento fino alla linea di estrusione. Aziende con linee di estrusione di alta capacità produttiva, optano per dei silos verticali esterni all'edificio in cui il materiale, granuli o polveri, vengono scaricati direttamente dai camion provenienti dal produttore e qui vengono stoccati prima dell'utilizzo.

Caricamento e miscelazione.

I contenitori delle materie prime vengono svuotati con l'uso di un paranco o carroponte che li solleva da terra, all'interno della struttura depositandoli a terra e successivamente ad essi vengono collegati dei tubi pneumatici di aspirazione per l'alimentazione degli estrusori.

Nel caso dei sacchi da kg.25, questi vengono portati tramite pallet trasportati dai carrelli elevatori nei pressi della linea di estrusione e svuotati in un grande contenitore. Grazie a tubi aspiratori pneumatici, il materiale viene aspirato e scaricato all'interno delle tramogge o dei dosatori gravimetrici posti sopra gli estrusori.

Può anche avvenire che all'interno delle tramogge, il polimero venga miscelato con additivi, pigmenti granulati per la colorazione del materiale o con altre sostanze a seconda delle caratteristiche che si vogliono ottenere dal prodotto finito. Nel caso di grandi lotti di produzione di prodotti di qualità omogenea, gli additivi vengono addizionati direttamente all'origine dai fornitori del polimero, secondo i parametri richiesti dall'azienda utilizzatrice.

Estrusione, calibrazione e raffreddamento.

Il materiale composto da polimero, coloranti e additivi, viene caricato nell'estrusore, riscaldato alla temperatura di fusione, compresso e plastificato per poi passare attraverso una testa di sagomatura. Da qui il materiale assume la struttura voluta che può essere di diverso tipo e forma quali film, foglia, lastra, lastra espansa, lastra alveolare, profilo sagomato, tubo, tubo corrugato, filo, ecc...

Di seguito alla testa di estrusione è posizionato il dispositivo di calibrazione che può essere l'anello di raffreddamento per un film estruso in bolla, oppure un chill roll con lama d'aria per l'estrusione di film mediante impianto cast, una calandra a cilindri termoregolati per l'estrusione di foglia e lastra, un banco di calibrazione a vuoto per le lastre alveolari, una vasca di raffreddamento ad acqua per il tubo od il filo ed altri dispositivi. Ovviamente ci fermiamo alla descrizione dei pericoli inerenti all'estrusore, ma la linea di produzione non finisce con la macchina "estrusore bivate" ma seguono numerosi altri dispositivi ed attrezzature accessorie che non andremo a trattare ma che sono fonte di pericolo anche esse e che meriterebbero una trattazione approfondita dedicata.

I fattori di rischio ergonomico

Nonostante l'uso di carrelli elevatori e di carriponte, i rischi di natura ergonomica sono presenti nel ciclo lavorativo. L'unica normativa di riferimento è di fatto il D.Lgs. 626/94 e solo in relazione alla movimentazione manuale dei carichi. Il titolo V del Decreto fa riferimento alle operazioni di trasporto, sostegno dei carichi da parte di uno o più operatori, comprese le azioni di sollevamento, di spostamento, di spinta, di traino.

Nell'allegato VI del Decreto vengono invece presi in considerazione aspetti quali: le caratteristiche del carico (il cui peso deve essere inferiore a 30 Kg per gli uomini e 20 Kg per le donne sopra i 18 anni); lo sforzo fisico richiesto al personale; le caratteristiche ambientali del luogo di lavoro; le esigenze connesse all'attività; i fattori individuali di rischio. Per i problemi riconducibili alle posture sfavorevoli ed al sovraccarico biomeccanico degli arti superiori (movimenti ripetitivi) l'unico riferimento nel D.Lgs 626/94 è all'art. 3 sulle misure generali di tutela; alla lettera "f" genericamente si parla di "rispetto dei principi ergonomici nella concezione dei posti di lavoro, delle attrezzature, nella definizione di metodi di lavoro e produzione".

Movimentazione manuale dei carichi

L'uso della forza per il sollevamento e spostamento di pesi può causare disturbi quali: dolori a carico della colonna vertebrale, soprattutto lombare, con possibile irradiazione agli arti inferiori; limitazione funzionale del rachide; alla base dei danni suddetti ci sono: lo schiacciamento del disco intervertebrale con deficit di apporto nutritivo e conseguenti fenomeni degenerativi, le microlesioni a carico delle strutture tendinee e ligamentose del rachide lombosacrale. Posture incongrue. Anche l'assunzione ripetuta e protratta di posizioni scorrette può determinare una degenerazione del disco intervertebrale, anche in questo caso legata ad un alterato apporto nutritivo dovuto a compressione prolungata.

Tutto questo si manifesta con dolore della colonna vertebrale nel tratto lombo sacrale, possono essere coinvolti anche il tratto dorsale e cervicale, sia pure in modo più sfumato. Tali disturbi sono reversibili, purché le condizioni che li determinano vengano eliminate o ridotte ed i tempi di recupero sono piuttosto lunghi. Sovraccarico biomeccanico degli arti superiori. La necessità di effettuare movimenti ripetitivi con uso di forza e l'assunzione di posture sfavorevoli prolungate, come nell'utilizzo della motosega, possono determinare danni alle strutture articolari muscolari e tendinee degli arti superiori. Tali affezioni sono caratterizzate nel loro complesso da: affaticamento, impaccio, disabilità, riduzione della forza, dolore, disturbi della sensibilità tattile (riduzione e/o alterazioni della sensibilità e/o formicolii).

Con riferimento alle fasi di lavorazione e alle mansioni del personale, si possono indicare le seguenti operazioni che comportano un rischio per l'incolumità degli addetti. Trasversale a tutto il ciclo di lavorazione è il rischio dato dagli ingombri nell'ambiente di lavoro, per la presenza di linee di produzione vicine, materie prime stoccate in capo alla linea, prodotti finiti non ancora depositati in magazzino, presenza di numerose macchine per le quali sono necessari vari interventi sulla linea stessa.

Stoccaggio delle materie prime. Operatore: Carrellista.

I vari contenitori (sacchi e involucri di cartone di varia dimensione) vengono movimentati tramite l'utilizzo di carrelli elevatori ad esclusione dei sacchi (del peso di 25kg) che vengono movimentati a mano. Può avvenire che l'operatore sia portato a trasportare manualmente più di un sacco per volta, con assunzione di posture non

ergonomiche, che possono provocare eventi acuti (lombalgie acute da sforzo) o produrre microtraumi rachidei.

La guida di carrelli elevatori di vecchia concezione costringe il carrellista all'uso di sedili non ergonomici, con conseguenti danni al rachide dorso lombare per una postura incongrua se mantenuta a lungo e con microtraumi.

Alimentazione dell'estrusione. Operatore: Addetto alla linea di produzione.

L'operazione di svuotamento dei contenitori delle materie prime all'interno di appositi contenitori metallici per l'alimentazione degli estrusori avviene tramite l'uso di carrelli elevatori, carroponte o paranchi. Nei casi in cui si utilizzano i sacchetti, l'operazione prevede un notevole sforzo degli arti superiori e del tronco per il sollevamento del carico dal bancale al contenitore metallico. Successivamente i granuli, dall'interno dei contenitori mediante condotte sotto aspirazione, vengono inviati nelle tramogge poste sopra ogni impianto di estrusione all'interno delle quali può avvenire la miscelazione con pigmenti granulati per la colorazione dei tubi. In questa fase l'operatore è sottoposto al rischio fisico di scivolamento (le particelle plastiche eventualmente fuoriuscite dai sacchi in fase di caricamento risultano, benché non sferiche, molto pericolose per lo scivolamento).

Lavorazione. Operatore: Addetto alla linea di produzione.

La lavorazione del polimero avviene sia internamente all'estrusore per quanto riguarda la plastificazione, che esternamente ad esso, dove viene data la forma definitiva del manufatto attraverso la filiera della testa e le macchine che seguono quali i gruppi di traino, di taglio longitudinale e trasversale, calibratori, ecc...

La complessità e la vastità delle macchine poste a valle dell'estrusore dipendono dal tipo di prodotto finale che bisogna ottenere, la cui descrizione esula dalla nostra trattazione che è circoscritta al solo estrusore bivate. Ognuna di queste macchine ha comunque dei pericoli che possono coinvolgere l'operatore in infortuni, anche con ferite gravi, se non ci si attiene scrupolosamente alle norme di sicurezza che ogni costruttore di macchine deve descrivere nei propri manuali di uso e manutenzione.

Aspetti organizzativi. Il sollevamento dei pesi.

Gli interventi per la prevenzione dei danni da movimentazione dei carichi, da posture incongrue e da sovraccarico meccanico degli arti superiori possono riguardare aspetti di tipo organizzativo, di tipo educativo (informazione, formazione, addestramento), ed aspetti accessori legati alla strumentazione di cui si fa uso.

Dove è possibile, occorre introdurre la meccanizzazione e l'automazione dei processi lavorativi fisicamente più faticosi, altrimenti è necessario ricorrere ad interventi organizzativi. Non si devono mai sollevare manualmente pesi che vanno dai 30 Kg in su, qualora se ne presenti la necessità l'operazione di movimentazione manuale deve

essere eseguita da almeno due lavoratori. La ripetitività e la frequenza dello sforzo fisico nel tempo: Si devono prevedere frequenze più basse allorché le attività sono più pesanti.

Per lavori più dispendiosi che comportano affaticamento muscolare, in particolare per la movimentazione di grossi carichi, ingombranti e che prevedano l'assunzione di posizioni incongrue, si deve prevedere la turnazione degli operatori, nell'ambito della medesima giornata lavorativa. Pause e tempi di recupero devono essere previsti nell'ambito della stessa giornata lavorativa per bilanciare i periodi in cui l'operatore svolge operazioni particolarmente faticose, sia per la frequenza che per lo sforzo fisico applicato.

Aspetti educativi

Gli operatori devono essere formati su: i rischi legati alla movimentazione di carichi e all'assunzione di posture incongrue del corpo e degli arti; le procedure di lavoro più opportune da attuare; la corretta modalità di uso delle attrezzature di lavoro.

Rischio di incendio

La presenza delle materie plastiche è connessa con l'attività, pertanto l'analisi non può che riguardare le modalità di riduzione dei pericoli d'incendio, riduzione dei pericoli causati da sorgenti di calore e l'adeguatezza delle misure di sicurezza.

Tra le modalità di riduzione dei pericoli d'incendio si possono evidenziare:

- l'immagazzinamento dei materiali infiammabili in locali realizzati con strutture resistenti al fuoco, e dove praticabile, la conservazione della scorta per l'uso giornalieri in contenitori appositi;
- la rimozione o la sostituzione dei materiali di rivestimento che favoriscono la propagazione dell'incendio;
- il miglioramento del controllo dei luoghi di lavoro ed i provvedimenti atti all'eliminazione dei rifiuti e degli scarti. Tra le misure per la riduzione dei pericoli causati da sorgenti di calore si possono evidenziare:
 - il controllo dell'utilizzo dei generatori di calore secondo le istruzioni;
 - lo schermaggio delle sorgenti di calore valutate pericolose tramite elementi resistenti al fuoco;
 - l'installazione ed il mantenimento in efficienza dei dispositivi di protezione;
 - il controllo della conformità degli impianti elettrici alle normative tecniche vigenti;
 - la pulizia e la riparazione dei condotti di ventilazione e canne fumarie;
 - l'adozione di un sistema di concessioni per lavori da effettuarsi a fiamma libera nei confronti degli addetti alla manutenzione ed aziende in appalto. L'adeguatezza delle misure di sicurezza è riferita in base a quattro argomenti fondamentali:

- a) vie di fuga;
- b) mezzi ed impianti di spegnimento;
- c) rilevazione ed allarme antincendio;
- d) informazione e formazione degli addetti.

Deve essere predisposto e aggiornato il piano di emergenza in tutti quei luoghi di lavoro in cui ricorre l'obbligo dell'art.5 citato nel Decreto Ministeriale; tale piano deve contenere:

- le azioni da porre in atto da parte dei lavoratori in caso di incendio;
- le procedure per l'evacuazione dei lavoratori e delle altre persone presenti devono essere attuate;
- la procedura per chiedere l'intervento dei vigili del fuoco e per fornire le necessarie informazioni al loro arrivo. Per luoghi di lavoro estesi o complessi, il piano deve includere anche una planimetria nella quale sono riportati:
 - a) le caratteristiche logistiche del luogo, in particolare la destinazione delle varie aree presenti, le vie di esodo e la compartimentazione antincendio;
 - b) il tipo, il numero e l'ubicazione delle attrezzature antincendio;
 - c) l'ubicazione della centrale di controllo e degli allarmi;
 - d) l'ubicazione dell'interruttore generale dell'alimentazione elettrica, delle valvole di intercettazione delle prese idriche, del gas e di altri fluidi combustibile.

Rischio di esposizione al rumore

La valutazione dell'esposizione professionale non può prescindere dall'analisi degli ambienti di lavoro e dalla dislocazione delle macchine all'interno degli stessi. L'attività normalmente si svolge all'interno di un unico capannone nel quale sono dislocate più linee di produzione. L'indagine riguarda in particolare la fase due delle lavorazioni. Per ogni linea di estrusione è presente un addetto il quale svolge le seguenti operazioni:

- carico della materia prima nelle tramogge di alimentazione con carrello elevatore, carroponte o manualmente;
- controllo della linea di estrusione;
- controllo dell'apparecchiatura a valle (avvolgitore, taglierina, traino, impilatore, ecc...);
- controllo delle bobine o lastre e loro impaccamento.

Quindi in sostanza l'operatore non ha una postazione fissa di lavoro ma si muove lungo la linea di estrusione. Esistono, inoltre, due tipologie di impianto tecnologico utilizzate nella produzione: - i compressori dell'aria, i quali sono normalmente alloggiati in locali appositi, separati dalla produzione, ciò anche al fine di ridurre la rumorosità a cui sono soggetti gli operatori; - i tritatori, utilizzati per il recupero della materia prima. Tali impianti sono talvolta posti all'interno dei locali di lavoro, in quanto l'impianto o gli impianti di produzione sono collocati all'interno di un unico volume; considerata l'alta rumorosità prodotta devono essere posti in locale separato.

Generalmente il valore di Lep.D (livello professionale di esposizione quotidiana a rumore) calcolato per gli addetti alla produzione si trova nell'intervallo 80-85 dB(A) con valori crescenti: all'aumentare del numero degli impianti presenti all'interno di uno specifico locale; al ridursi delle dimensioni del locale e delle caratteristiche fonoassorbenti delle finiture superficiali delle pareti e della copertura del locale stesso.

Gli interventi per la riduzione dell'esposizione al rumore sono generalmente riferibili a:

- a) sostituzione dei macchinari con macchinari meno rumorosi;
- b) riduzione della concentrazione delle macchine all'interno dell'ambiente rumoroso;
- c) chiusura con cabine isolanti delle macchine e delle parti meccaniche più rumorose;
- d) separazione degli impianti o isolamento con barriere acustiche delle lavorazioni a più alto rischio;
- e) rivestimento delle pareti e dei soffitti con materiale fonoassorbente;
- f) uso di dispositivi di protezione individuale.

Gli interventi che si ritengono di sicura efficacia per la riduzione dell'esposizione sono quelli indicati ai punti: c) in particolare per il confinamento dell'impianto di triturazione; d) la separazione degli impianti (in particolare i compressori).

La pubblicazione della Direttiva 2003/10/CE ed il conseguente necessario recepimento a livello nazionale entro il 2006, obbliga ad approfondire le tematiche dell'esposizione professionale a rumore avendo presente come si modificherà la normativa a breve tempo. Le principali novità della Direttiva sono: Valore limite di esposizione e valori di esposizione superiore e inferiore che fanno scattare l'azione.

Lex, 8hPpeak

Valori limite di esposizione	87 dB(A) 200 Pa.....	140 dB(A)
Valori superiori di esposizione	85 dB(A) 140 Pa.....	137 dB(A)
Valori inferiori di esposizione	80 dB(A) 112 Pa.....	135 dB(A)

La nuova direttiva stabilisce un valore limite di esposizione: 87 dB(A) precisando che in nessun caso l'esposizione del lavoratore può superare i valori limite di esposizione. Nell'applicare questi valori limite comunque, la determinazione dell'effettiva esposizione del lavoratore tiene anche conto dall'attenuazione prodotta dai DPI o dispositivi di protezione individuali (dell'udito come tappi o cuffie) indossati dal lavoratore.

Se si evidenziano delle esposizioni superiori ai valori limite, nonostante le misure adottate, il datore di lavoro deve:

- a) adottare delle misure immediate per riportare l'esposizione del lavoratore al di sotto dei valori limite di esposizione;
- b) individuare le cause dell'eccessiva esposizione;
- c) modificare o aggiornare le misure di protezione e di prevenzione per evitare il ripetersi della situazione di esposizione eccessiva;

Sono evidenziati due valori di esposizione che fanno scattare l'obbligo dell'azione correttiva: 80 e 85 dB(A). Questi valori di esposizione fanno scattare l'azione correttiva e non tengono conto dell'effetto dei suddetti dispositivi di protezione acustica.

Per delle esposizioni superiori agli 80 dB(A), la direttiva stabilisce che sono validi i seguenti obblighi:

Valutazione Esposizione (art. 4): Il datore di lavoro valuta e, se del caso, misura i livelli di rumore. La valutazione e la misurazione sono programmate ed effettuate da servizi competenti ad intervalli idonei. Si aggiorna periodicamente e in caso di notevoli mutamenti o quando lo renda necessario il risultato del controllo sanitario. I dati del livello di esposizione al rumore sono conservati in forma idonea per consentirne la successiva consultazione.

Il datore di lavoro, nella valutazione dei rischi, deve prestare attenzione anche a:

- livello, tipo e durata dell'esposizione (anche impulsivo);
- effetti sulla salute e la sicurezza derivanti dalle interazioni fra il rumore e delle sostanze ototossiche e fra il rumore e delle vibrazioni;
- effetti indiretti sulla salute e sulla sicurezza risultanti dall'interazione tra rumore e segnali di avvertimento.

Dispositivi di protezione individuale (art.6): Il datore di lavoro mette a disposizione dei lavoratori i D.P.I. per l'udito. Il datore di lavoro:

- deve fare tutto il possibile per assicurare che i D.P.I. siano indossati
- è tenuto alla verifica dell'efficacia delle misure adottate in applicazione del presente articolo. L'uso dei D.P.I. è obbligatorio per esposizioni superiori a 85 dB(A).

Informazione e formazione (art.8): Il datore di lavoro garantisce informazione e formazione in relazione al rischio:

- sulla natura di rischi;
- sulle misure adottate per eliminare o ridurre l'esposizione;
- sui valori limite di esposizione;
- uso corretto dei D.P.I.;
- utilità e mezzi per individuare e segnalare sintomi di danni all'udito;
- diritto al controllo sanitario e suo scopo;
- procedure di lavoro sicure per ridurre l'esposizione.

Controllo sanitario (art.10): I controlli hanno per obiettivo la diagnosi precoce di ogni diminuzione dell'udito. Dei controlli deve essere tenuta una documentazione medica individuale, che ne consenta la successiva consultazione nel rispetto del segreto medico. Test audiometrici preventivi sono disponibili per i lavoratori la cui esposizione supera i valori inferiori di esposizione nel caso in cui la valutazione e la misurazione rivelino un rischio per la salute.

Quando il valore supera gli 85 dB(A) il controllo dell'udito effettuato da un medico o da una persona debitamente qualificata sotto la responsabilità di un medico. Nel caso in cui dal controllo risulti un danno all'udito identificabile il medico valuta se tale danno deriva dall'esposizione professionale.

Se l'esito della valutazione è positivo:

- a) il lavoratore viene informato dal medico;
- b) il datore di lavoro riesamina la valutazione e misure di contenimento;
- c) il datore di lavoro tiene conto del parere del medico nell'attuazione delle misure, compresa la possibilità di spostare il lavoratore ad attività alternative che non comportino ulteriore esposizione;
- d) il datore di lavoro effettua un controllo sistematico e riesamina lo stato di salute di tutti i lavoratori con una esposizione simile.

Consultazione e partecipazione dei lavoratori (art.9): La consultazione e la partecipazione dei lavoratori e/o dei loro rappresentanti hanno luogo in conformità della direttiva 89/391/CEE sulle materie della presente direttiva, in particolare:

- la valutazione dei rischi e la definizione delle misure da adottare previste all'art.4;
- le disposizioni che sono volte ad eliminare o a ridurre i rischi derivanti dall'esposizione al rumore, previste all'art.5;
- la scelta dei dispositivi individuali di protezione dell'udito, previsti all'art.6.

Rischio chimico e biologico

La lavorazione dei polimeri mediante l'estrusione, si caratterizza per le diverse tipologie di materie plastiche utilizzate; infatti, in ragione del polimero o della miscela di polimeri utilizzati, vi possono essere delle diverse caratteristiche di lavorazioni ma anche diversi tipi di additivi possono essere utilizzati per conferire al prodotto delle particolari proprietà.

Nell'estrusione, i polimeri utilizzati si differenziano per la presenza di agenti di processo ed additivi che possono essere i più svariati e, in linea generale, sono classificati in base alle caratteristiche che riescono a conferire al polimero od al processo lavorativo, essi generalmente sono i seguenti:

Stabilizzanti: necessari a conferire una stabilità strutturale al reticolo polimerico ritardando o impedendo modifiche strutturali indotte dall'azione di agenti come la luce, il calore e l'ossigeno atmosferico.

Plastificanti: in genere sono costituiti da ftalati (esteri dell'acido ftalico) e servono a migliorare la flessibilità della plastica rendendola più facile da lavorare e meno fragile.

Lubrificanti: necessari per facilitare la lavorabilità del polimero, sono costituiti da stearati.

Rinforzanti: le cariche di rinforzo aumentano le performance del prodotto finito rispetto alle sollecitazioni termiche, chimiche e meccaniche. Oppure possono modificare le proprietà di comportamento facilitandone la lavorazione; possono essere fibre di vetro, carbonio, polveri metalliche, silice, carbonati, nerofumo, ecc...

Cariche: costituite generalmente da polveri inerti, si usano in percentuali ben determinate come riempitivi per abbassare il costo di produzione del manufatto senza inficiarne la qualità.

Coloranti: si usano ovviamente per colorare la plastica o per conferirle degli effetti particolari, possono essere forniti in forma di liquidi, di paste, polveri o granuli e possono essere solubili o meno nel polimero impiegato.

Espandenti: si usano per la produzione degli articoli in plastica espansa, generalmente sono dei gas quali il propano, il butano, CO₂ ed altri gas più o meno infiammabili.

Agenti ausiliari: sono quegli additivi che possono conferire al prodotto delle particolari qualità, per esempio: reticolanti, non reticolanti, ritardanti di fiamma, ecc...

Solventi e co-solventi: si utilizzano per rendere più solubili i coloranti e gli additivi o per agevolare la pulizia dei macchinari al termine del lotto di produzione.

L'esposizione a queste sostanze, anche solo per brevi periodi, può essere causa di malattie professionali, anche gravi.

Esposizione a rischi ambientali

La presenza nell'ambiente di lavoro di numerose macchine, la cui temperatura di lavoro è di circa 200°C, può determinare condizioni microclimatiche di lavoro non confortevoli, specialmente nella stagione estiva. Anche se in misura minore, sono rilevabili disagi nella stagione invernale, per la permanente apertura dei portoni onde consentire il transito dei carrelli di approvvigionamento delle linee e il trasporto in deposito dei prodotti finiti.

In questo modo gli addetti alla lavorazione possono facilmente essere esposti a sbalzi termici durante il transito nelle varie aree dell'ambiente di lavoro. L'umidità è notevole in ogni fase di lavorazione per la presenza delle vasche di raffreddamento contenenti acqua. Vapori e nebbie d'acqua sono sollevati nell'aria ambiente per l'evaporazione dovuta al riscaldamento che il materiale estruso produce nell'ambiente.

Per valutare il microclima occorre premettere una serie di considerazioni relative allo scambio termico esistente tra uomo e ambiente, vi sono da tenere in considerazione il complesso dei parametri ambientali. Si può considerare il corpo umano, per le sue caratteristiche fisiche e termiche, come una macchina termica che viene alimentata da combustibile sotto forma di alimenti, i quali vengono trasformati dal metabolismo, parte in lavoro (10/20 %) e parte in calore (80/90%). Questo ne consegue che l'uomo deve essere in grado di dissipare nell'ambiente il calore metabolico in quanto è "costretto" a mantenere la sua temperatura corporea interna attorno ai 36,5 – 37 °C per poter mantenere in efficienza i suoi organi più importanti quali il sistema nervoso centrale, cuore, polmoni, visceri, ecc...

La dissipazione di questo calore avviene attraverso scambi termici tra uomo ed ambiente (bilancio termico) secondo diverse modalità, sia fisiche (convezione, conduzione, irraggiamento), che fisiologiche (produzione ed evaporazione del sudore).

In un organismo, la situazione termica può essere analizzata in modo razionale nel modo seguente: considerando il corpo umano come un sistema termico che viene interessato da flussi di energia in entrata ed in uscita dal corpo medesimo attraverso la superficie ed anche come generatore di energia dal suo interno; risulta che quando l'effetto termico complessivo di tali flussi non è nullo, nel sistema si osserverà un aumento o una diminuzione del contenuto termico. Grazie all'equazione di bilancio termico (BT) si può scrivere la stessa nella sua formula semplificata:

$$BT = M + C + R - E \text{ (tutte le grandezze sono espresse in } W/m^2 \text{)}$$

Il calore metabolico prodotto dall'organismo M può essere distinto in due componenti: metabolismo basale e dispendio energetico associato alla specifica attività lavorativa; C è la quantità di calore scambiata per convezione; R è la quantità di calore scambiata per irraggiamento; E è la quantità di calore dissipata attraverso l'evaporazione del sudore. Teniamo conto che il calore metabolico M è sempre positivo, il calore di evaporazione E è sempre negativo, il calore di convezione C e di irraggiamento R possono essere sia positivi o negativi alternativamente, a seconda che gli scambi termici siano dal corpo umano all'ambiente o viceversa. Di solito se la superficie di contatto con gli oggetti solidi è piccola, la quantità di calore scambiata per conduzione si può considerare trascurabile.

Procedura di pulizia allo spegnimento dell'impianto

Non esiste un procedimento universale per lo spegnimento degli estrusori ma possiamo dare una indicazione generica che può risultare utile a chi non ha esperienza in tale procedura.

I trasformatori di plastica spesso puliscono le viti in modo errato, causando danni gravi e costosi. Uno strumento comune utilizzato come parte della procedura di pulizia è una torcia ad acetilene che sfortunatamente influisce sulle proprietà metallurgiche del metallo di base della vite e sulle tolleranze della vite strettamente lavorate. Durante la produzione di viti in acciaio per utensili, il metallo di base viene trattato termicamente per aumentarne la durezza.

Se si utilizza il calore di un cannello ad acetilene per rimuovere la plastica dalla radice della vite, si annulla la ricottura del metallo di base, si riduce la resistenza allo snervamento dell'acciaio in quel punto e si aumenta la probabilità che la vite si rompa a causa della coppia trasmessa dal riduttore. Se l'area in cui è stata applicata la torcia diventa blu permanente, significa che il calore ha causato modifiche metallurgiche al metallo di base e ha ridotto la resistenza all'usura in quell'area della vite.

Occasionalmente, la sfiammatura ha causato la delaminazione del rivestimento metallico antiusura dall'acciaio di base della vite. Il calore di una torcia ad acetilene provoca anche l'espansione del metallo sul lato della vite in cui è applicato, il che a sua volta fa piegare la vite. Un'altra grande fonte di danni alle viti durante la pulizia è l'uso di cacciaviti in acciaio, raschietti o barre di leva per rimuovere la plastica. Gli strumenti e i materiali di pulizia per la pulizia delle viti e del cilindro estrusore sono pochi e semplici: guanti ad alta temperatura, occhiali di sicurezza, una spatola di ottone, una spazzola di filo di ottone, una garza di rame, scaglie di acido stearico, un trapano elettrico, stracci di cotone, una spazzola metallica rotonda in ottone sull'ingresso del cilindro che viene montata su un'asta lunga quanto la canna.

Un'alternativa più efficiente alla fiamma per soffriaggio consiste nello spurgare e pulire le viti immediatamente dopo l'uso, mentre è ancora uniformemente riscaldata dalla produzione. In applicazioni ad alta pressione come fili e cavi e film in bolla, è possibile utilizzare composti di spurgo commerciali. Nelle applicazioni a bassa pressione, un HDPE a fusione frazionata (0,35 MI) può essere invece sufficiente come materiale di spurgo. Per estrusori più grandi, può essere più pratico ed economico utilizzare un purging compound commerciale per i cambi di prodotto, senza estrarre le viti.

Il primo passo per spurgare le viti è chiudere il flusso del polimero in lavorazione, chiudendo la saracinesca sul fondo della tramoggia. La velocità delle viti deve essere ridotta a 15-25 giri/min e mantenere questa velocità fino a quando il materiale fuso smette di scorrere dall'estremità della testa. Tutte le zone della canna devono essere impostate a circa 200°C. Una volta che le zone del cilindro hanno raggiunto tale temperatura, si può iniziare lo spurgo.

A seconda del tipo di processo di estrusione, potrebbe essere necessario rimuovere la filiera o l'attrezzatura della testa per ridurre il rischio di sovra-pressurizzazione dell'estremità dell'estrusore. La vite dovrebbe girare a 15-20 giri/min. In un'applicazione con filiera a bassa pressione, la filiera può rimanere sull'estrusore durante lo spurgo fino a quando non si verifica un cambiamento completo dal materiale di lavorazione al materiale di spurgo. Una volta che la testa è stata completamente spurgata, si fanno fermare le viti in modo che la flangia anteriore possa essere rimossa e l'estremità della vite esposta.

Una volta rimossa la testa, è possibile riavviare le viti e farle funzionare a circa dieci giri/min per consentire il pompaggio del materiale di spurgo rimanente. Una volta che il materiale di spurgo ha smesso di estrudere dalle viti, le viti possono essere rimosse dalla macchina.

Usando l'estrattore per viti, le viti possono essere spinte in avanti fino a che non sono visibili 4 o 5 giri della vite per la pulizia. Pulire il materiale di spurgo dai canali delle viti utilizzando la spatola in ottone e la spazzola metallica in ottone. Quando il materiale di spurgo è stato rimosso dalla parte esposta delle viti, spingere in avanti di altri 4-5 giri della vite utilizzando l'estrattore per viti e continuare il processo di pulizia.

Quando le grandi quantità di spurgo o HDPE sono state rimosse con la spatola in ottone e la spazzola metallica, è necessario spruzzare scaglie di acido stearico sulla radice della vite calda.

La garza di rame deve essere utilizzata per rimuovere ogni residuo. Dopo che l'intera vite è stata lucidata con una garza di rame, è necessario eseguire una pulizia finale in condizioni "immacolate" utilizzando uno straccio di cotone morbido per garantire che non vi siano contaminazioni nel ciclo di produzione successivo.

Una volta che la vite è stata ripulita completamente, può essere messa da parte fino a quando anche il cilindro non è stato pulito o posizionato su una rastrelliera per viti. Se la vite fosse ben conservata, dovrebbe essere spruzzata e pulita con olio leggero, come WD-40 o PB Blaster per prevenire la ruggine.

Le viti cromate hanno meno probabilità di arrugginire durante lo stoccaggio e non necessitano di lubrificazione. La pulizia del cilindro è molto più semplice della pulizia della vite, ma è altrettanto importante. Con la temperatura del cilindro ancora fissata a 200°C, il cilindro di estrusione è pronto per la pulizia. Una spazzola metallica deve essere avvolta con una garza di rame. Prima di inserire il gruppo spazzola e garza nel foro del cilindro, versare una manciata di acido stearico.

L'acido stearico può essere spruzzato sulla garza di rame prima di spingere il gruppo spazzola/garza nel cilindro. Una volta che il gruppo spazzola/garza è all'interno del cilindro, il trapano elettrico può essere azionato mentre lo si sposta dentro e fuori fino a quando non si muove facilmente. Potrebbe essere necessario aggiungere altro acido stearico prima di pulire completamente la sede delle viti.

Quando il gruppo spazzola/garza viene rimosso dal cilindro, spingere avanti e indietro un fascio di stracci di cotone all'interno della lunghezza del cilindro per rimuovere eventuali residui di spurgo o acido stearico. Quando gli stracci sono stati passati più volte in avanti e indietro e sono tornati completamente puliti, si può considerare la pulizia del cilindro completa. L'intero gruppo vite e cilindro sono puliti e pronti per una nuova produzione. Molti materiali di spurgo sono disponibili in commercio.

È compito del processore identificare lo spurgo appropriato da utilizzare con la resina in lavorazione. I materiali di spurgo funzionano con uno dei quattro meccanismi:

- Spurgo meccanico
- Materiale abrasivo caricato minerale
- Spurgo chimico per abbattere resine e contaminanti
- Resina dura riempita con tensioattivi

Gli spurghi meccanici sono materiali rigidi, normalmente a base di polietilene (PE), contenenti agenti detergenti e distaccanti. Il polietilene ad alta densità (HDPE) a flusso fuso frazionato funziona molto bene come materiale di spurgo in un ampio intervallo di temperature.

I materiali minerali abrasivi a bassa viscosità o caricati con vetro espelleranno la maggior parte delle resine da un estrusore mentre puliscono la vite, il cilindro e la filiera.

L'acrilico colato è uno spurgo abrasivo, poiché non si scioglie completamente nell'estrusore. A causa dell'elevata viscosità del fuso dell'acrilico colato, è meglio rimuovere la testa, prima di spurgare la vite. Le quantità tipiche richieste sono da 1 a 2 kg/cm di diametro della vite. Una volta che l'acrilico colato è nel cilindro, deve essere spurgato o la vite estratta e pulita meccanicamente.

Il terzo materiale di spurgo utilizza un tensioattivo che penetra e scioglie i residui sulla vite, sul cilindro e sulla filiera, disperdendoli nella massa fusa. Il tensioattivo viene miscelato con una resina fluida che è da 0,1 a 0,3 volte quella della massa fusa originale per fornire la massima efficacia di spurgo.

Il quarto materiale è uno spurgo chimico che attacca il materiale rimasto nel cilindro. Ciò può avvenire attraverso la plastificazione della resina nel cilindro, riducendo la viscosità e rendendo più facile l'espulsione dal cilindro, oppure l'additivo può effettivamente causare la depolimerizzazione del polimero in componenti a peso molecolare inferiore.

Per lo spurgo meccanico, si utilizza comunemente un HDPE a flusso di fusione frazionario. Il materiale rigido spinge la resina che viene eliminata davanti all'HDPE. L'HDPE a flusso di fusione frazionato è economico, funziona bene e ha un ampio intervallo di temperature di lavorazione. Dopo che la resina da spurgare è fuori dall'estrusore, è possibile abbassare le temperature del cilindro e aggiungere altro HDPE per rimuovere il materiale di spurgo precedente.

Quando la vite viene estratta dall'estrusore, qualsiasi residuo di HDPE può essere rimosso dalla vite con una spazzola metallica in ottone. In alternativa, per la pulizia è possibile utilizzare una spazzola metallica in ottone elettrica o pneumatica. Diversi materiali disponibili in commercio sono prodotti come composti di spurgo basati sullo spurgo meccanico.

Gli estrusori bivate da laboratorio o comunque di piccola taglia, spesso sono equipaggiati con un cilindro estrusore apribile in due parti, rendendo l'operazione di pulizia estremamente più semplice da eseguire.



Estrusore bivate da laboratorio con cilindro apribile in due parti

Addestramento del personale

Risulta di fondamentale importanza che il personale addetto al funzionamento dell'estrusore sia adeguatamente formato sui pericoli esistenti nell'uso della macchina, sul funzionamento della stessa e sui componenti principali a cui prestare maggiore attenzione. Ogni costruttore prevede dei giorni di training specifici per il tipo di macchina, è buona norma che tali corsi vengano seguiti scrupolosamente dagli operatori.

L'addestramento verte sui seguenti argomenti:

- Sicurezza sul posto di lavoro
- Pericoli della macchina
- Ispezione di preavviamento
- Avviamento della macchina e avvio della produzione
- Conduzione della produzione
- Arresto della macchina in condizioni normali e di emergenza
- Pulizia della macchina
- Estrazione delle viti e loro reinserimento nel cilindro
- Soluzione a piccoli problemi ed inconvenienti durante il funzionamento
- Interfaccia uomo-macchina, impostazione dei parametri e corretto uso
- Controllo della qualità del prodotto in uscita
- Regolazione dei bulloni della filiera per l'ottenimento dello spessore corretto

Bisogna comunque distinguere tra il personale addetto al funzionamento e quello che si occupa della manutenzione. Questi ultimi necessitano di una formazione specifica per poter operare con sicurezza le riparazioni e le operazioni di manutenzione senza danneggiare la macchina ma ripristinandola correttamente in maniera ottimale.



Manutenzione su di un estrusore bivate(Clextral)

Ispezione prima dell'accensione

Una buona regola è l'ispezione della macchina prima dell'accensione e dell'inizio della produzione, questa semplice operazione serve ad evitare guai peggiori nella fase di accensione dell'estrusore.

- assicurarsi della pulizia del luogo, il pavimento deve essere pulito senza granuli o polvere di polimero che può facilmente rendere sdruciolevole il suolo
- verificare che le sonde di temperatura e di pressione siano fissate nelle proprie sedi
- verificare che i gruppi di riscaldamento del cilindro siano ben fissati e non vi siano perdite di olio diatermico e le spine delle resistenze siano ben collegate
- verificare che l'acqua di raffreddamento circoli (aprire il rubinetto) e che la pompa sia funzionante
- verificare che nella tramoggia di alimentazione non vi siano corpi estranei
- verificare che la piastra del cambio filtro sia nella posizione corretta
- verificare la presenza di energia elettrica nel quadro elettrico principale e che non vi siano dispersioni
- verificare il livello di olio dei riduttori
- verificare che i giunti sul codolo delle viti siano ben fissati
- verificare che il limitatore di coppia nel giunto del motore non sia innestato
- assicurarsi di avere il polimero e gli additivi corretti per la produzione prevista

Queste semplici regole devono essere osservate ogni volta che la macchina è stata fermata per un cambio di produzione, per la riparazione di un guasto, per un'operazione di manutenzione che ha comportato lo smontaggio ed il montaggio di vari componenti.

CONCLUSIONI

Questo studio ha cercato di rispondere alla domanda: *“Qual è lo stato dell’arte degli estrusori bivate e quali sono le prospettive di sviluppo in futuro della macchina, alla luce delle conoscenze tecniche attuali?”*. Per cercare di rispondere al quesito, si è condotta una ricerca sull’evoluzione delle macchine, delle soluzioni tecniche adottate nel corso del tempo dalle varie case costruttrici, sulle differenze sostanziali esistenti tra le varie tipologie di macchine e sulle caratteristiche di miscelazione del polimero all’interno del complesso viti-cilindro.

Gli estrusori bivate consentono un processo di estrusione caratterizzato da un’elevata modularità. Questa peculiarità consente di configurare in maniera ottimale gli estrusori bivate, così da poter ottimizzare al meglio il loro impiego in funzione delle particolari applicazioni di destinazione. Modularità significa anche flessibilità ed estrema precisione, caratteristiche che permettono agli impianti di estrudere una estesa tipologia di polimeri.

La capacità dimostrata di elaborare un numero elevato di tipologie di polimeri e di miscele, la rende una macchina polivalente, una risorsa importante nel mondo della produzione per estrusione che sia di polimeri, colle, vernici e di altri materiali.

Questa estrema flessibilità della macchina compensa sia il costo superiore rispetto ad un estrusore monovite di pari capacità produttiva e sia la sua complessità meccanica, in termini di utilizzo, manutenzione e ricambistica.

Nondimeno la sua versatilità e le infinite combinazioni possibili di viti a settori modulari, cilindri componibili, con uno o più forzatori laterali, corotante o controrotante, con o senza compenetrazione delle viti (intermeshing), ed altro ancora, rende la sua analisi fisica e matematica estremamente complessa e per molti versi ancora inesplorata.

Questa ricerca rispecchia lo stato dell’arte della tecnologia dell’estrusione dei polimeri effettuata con gli estrusori bivate ai nostri giorni, fondato su tipologie di macchine consolidate e con prestazioni ormai standardizzate ma di cui si intravedono le possibili evoluzioni; l’integrazione del controllo del processo di estrusione, la capacità di estrudere polimeri tecnici (a temperature molto elevate 350-400 °C) o di biopolimeri (estremamente sensibili al tempo di permanenza ed alla temperatura).

Il presente studio integra la letteratura già esistente riguardante anche le nuove tecnologie ma cerca anche di dare alcuni spunti per possibili future evoluzioni sia nelle tecniche di analisi che nello sviluppo delle macchine di nuova generazione.

SOFTWARE PER LA PROGETTAZIONE E LA SIMULAZIONE DEI PROCESSI D'ESTRUSIONE

Negli ultimi 25 anni, l'importante sviluppo dell'informatica, è stato di fondamentale importanza per l'industria e sono stati sviluppati vari software di simulazione fluidodinamica dedicati all'estrusione.

Chiamati genericamente **CFD** (Computational Fluid Dynamics), essi sono un aiuto prezioso per il progettista in quanto, oltre a velocizzare il tempo dedicato al calcolo, possono eseguire una simulazione fluidodinamica del polimero allo stato fuso analizzandone il comportamento all'interno dell'estrusore. Oltremodo, la disponibilità di avere dei software su piattaforma Windows, ha permesso l'uso di economici personal computer al posto delle ben più costose workstation su sistema operativo Unix.

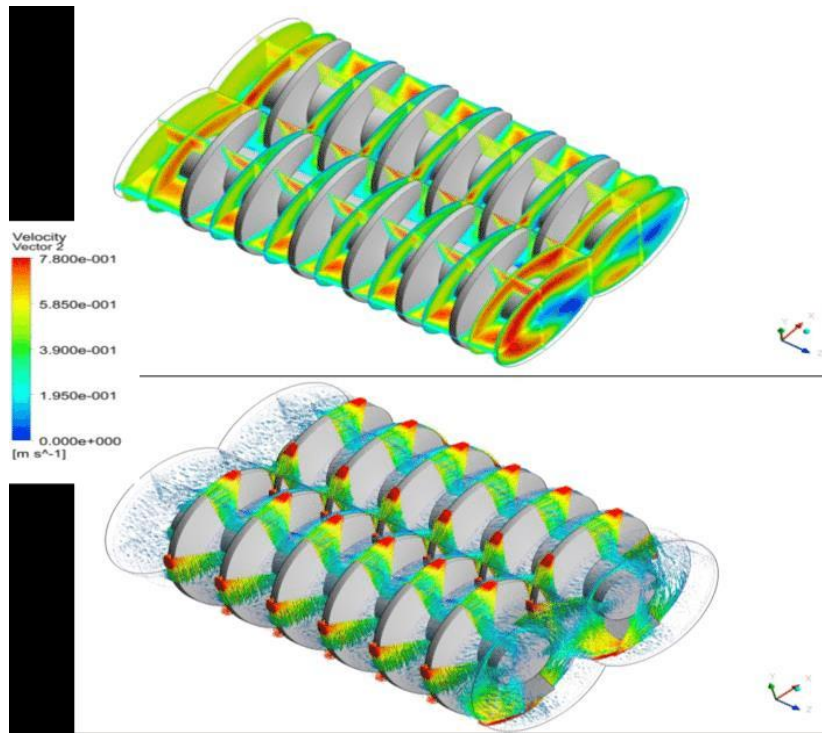
Vi sono due tipologie di software CFD, quelli sviluppati in modo autonomo e indipendente dai software di progettazione 3D e quelli sviluppati come derivati e aggregati ai software di progettazione 3D.

La differenza principale tra le due tipologie sono che i software sviluppati come derivati e aggregati ad un software di progettazione 3D sono meno performanti, di tipo generalista e non specifico per l'estrusione dei polimeri e sono decisamente molto semplificati per permetterne l'uso anche a chi non è specializzato in analisi fluidodinamica. Hanno comunque il grande vantaggio di un semplice utilizzo e di fornire dei valori realistici e coerenti se i dati che vengono inseriti sono corretti.

Due esempi di software CFD dedicati all'estrusione e sviluppati in modo autonomo sono, ad esempio, il noto Flow 2000 della società Compuplast ed il software Poliflow® della società Ansys.

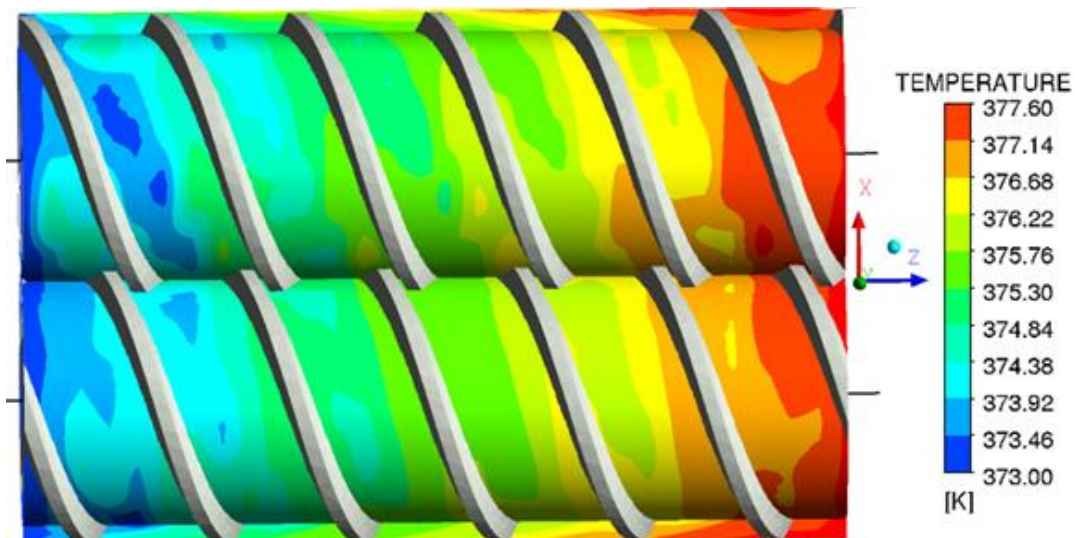
La società **Compuplast International** (Compuplast), venne fondata nel 1991, si è distinta principalmente e fornitura di strumenti per l'estrusione; sin dalla metà degli anni 90 dello scorso secolo, fu presentato il celebre **Flow2000**, già disponibile per il sistema operativo Windows, in grado di effettuare calcoli di un certo livello di difficoltà e delle semplici simulazioni. Fino all'anno 2002 i progettisti hanno utilizzato la progettazione assistita da computer (CAD) 2D, lo strumento prevalente all'epoca. Successivamente hanno sviluppato la modellazione 3D con l'utilizzo del software Solid Edge®.

Il software Flow 2000 è stato il programma per personal computer più utilizzato tra i costruttori di impianti per materie plastiche dalla metà degli anni 90 del secolo passato fino ai primi anni 2000.



Simulazione della distribuzione del melt sulle viti e della velocità relativa con Flow2000

La società **ANSYS, Inc.**, venne fondata nel 1970 a Canonsburg, in Pennsylvania (U.S.A.) è una società che sviluppa e commercializza software di simulazione ingegneristica in molti campi. Da sempre specializzati nel campo del software di simulazione virtuale e delle tecnologie indirizzate al processo di ottimizzazione, ha sviluppato **POLYFLOW®**, un software dedicato all'analisi delle elaborazioni polimeriche.



Simulazione di analisi termica del melt sulle viti realizzato con Polyflow®

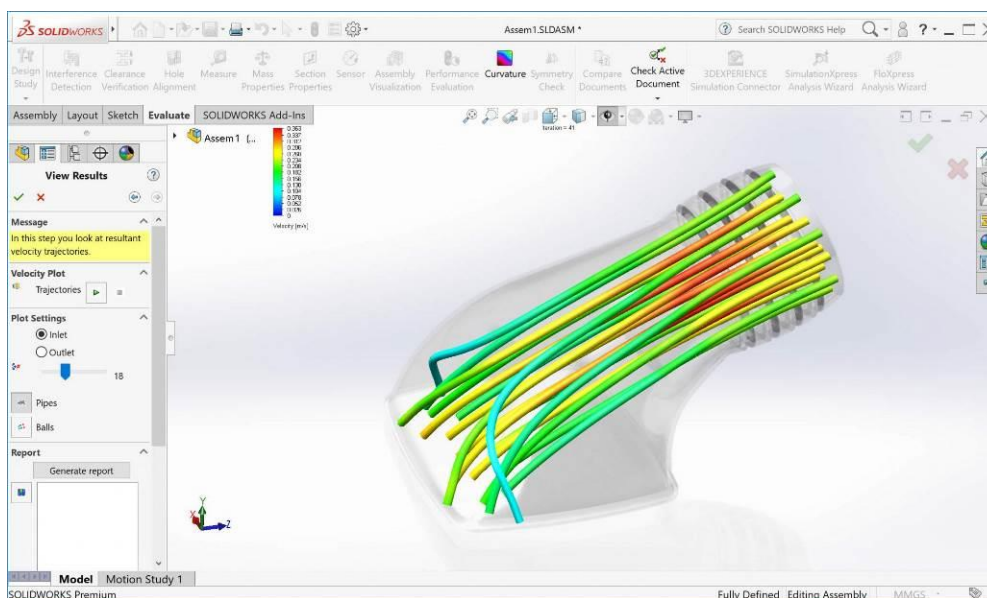
La **SolidWorks Corporation** fu fondata negli Stati Uniti a Waltham in Massachusetts nel dicembre 1993 da John Hirschtick, uno studente del MIT. Ingaggiò un team di tecnici per costruire un sistema CAD 3D facile da usare, economico e che utilizzasse Windows come sistema operativo. Nella sede di Concord, nella contea di Middlesex nello stato del Massachusetts, venne pubblicata nel 1995 la prima release, SolidWorks 95. Nel 1997 Dassault Systèmes, molto nota per il software di modellazione delle superfici di nome CATIA, acquisì l'azienda.

SolidWorks offre due applicativi CFD, uno semplificato e chiamato **SolidWorks FloXpress** ed uno molto più completo, venduto come un singolo programma a parte e di nome **Solidworks Flow Simulation**.

SolidWorks FloXpress è un'applicazione aggiuntiva di analisi fluidodinamica inclusa con SOLIDWORKS Premium, che calcola il modo in cui il fluido scorre attraverso i modelli di assieme. In base al campo di velocità calcolato, è possibile individuare le aree problematiche nel progetto e migliorarle prima di produrre qualsiasi parte.

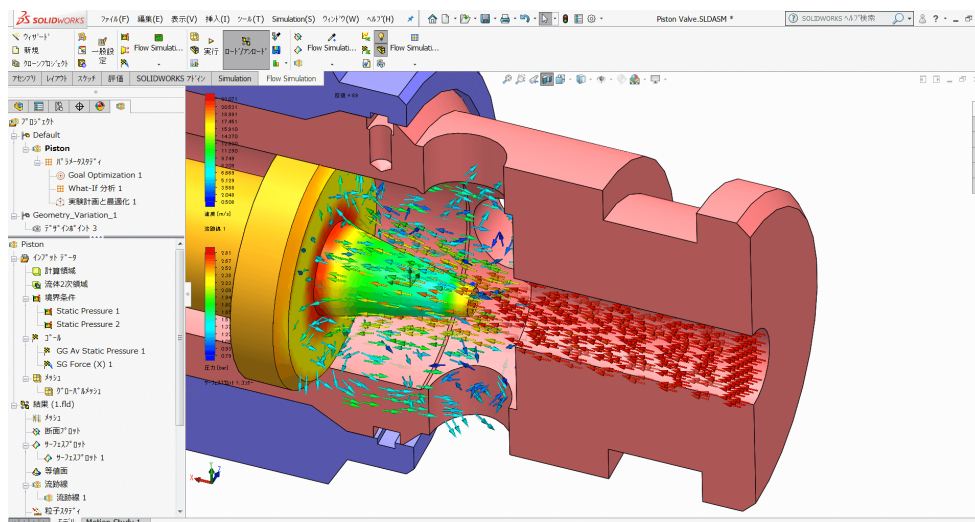
A differenza di SolidWorks Flow Simulation che è la versione completa, SolidWorks FloXpress è progettato esclusivamente per analizzare il flusso di un fluido in un volume completamente chiuso che include almeno un ingresso e un'uscita.

I vantaggi nell'uso di SolidWorks FloXpress sono la sua completa integrazione con SolidWorks in quanto completamente incorporato nell'ambiente nativo di Windows®, pertanto non è necessario modificare i progetti SolidWorks per l'analisi del flusso dei fluidi né eseguire delle conversioni di file.



Simulazione di analisi fluidodinamica realizzato con SolidWorks FloXpress

Per analisi dei fluidi più complesse, è necessario passare a **SolidWorks Flow Simulation**, che è il software per analisi fluidodinamica (CFD) e simulazione termica completo e integrato in ambiente SolidWorks. Consente una rapida creazione di simulazioni del flusso, del trasferimento termico e delle forze dei fluidi nei punti critici del modello. **SolidWorks Flow Simulation** permette un'analisi molto accurata e simulazioni complesse con vari fluidi, consentendo di simulare il flusso dei liquidi e dei gas in condizioni reali, eseguire vari scenari ipotetici ed analizzare in modo efficace gli effetti del flusso dei fluidi, del trasferimento di calore e delle forze correlate su componenti immersi o circostanti ed eseguire confronti e correlazioni tra vari tipi di fluidi.



Simulazione di analisi fluidodinamica realizzato con SolidWorks Flow Simulation

Interessante e più specifico per il nostro argomento è l'applicativo **SolidWorks Plastics**, che permette la simulazione dello stampaggio ad iniezione e consente di prevedere il flusso della massa plastica fusa durante il processo di stampaggio.

Grazie alla possibilità di simulare il flusso della massa di plastica fusa, è possibile prevedere gli eventuali difetti di progettazione e costruzione anche in componenti di impianti di estrusione (la pressa a iniezione è anch'essa un estrusore con una vite di plastificazione) e può essere applicato con alcuni accorgimenti anche al nostro caso.

Anche la ben nota società **Autodesk** che produce il software 3D Inventor, ha commercializzato il suo software CFD chiamandolo semplicemente **Autodesk CFD**. Basandosi sulla struttura di **Nastran**, noto software per l'analisi strutturale, ha realizzato un prodotto integrabile con vari software di progettazione 3D. Il software Autodesk CFD offre le seguenti caratteristiche; generazione di mesh automatiche per geometrie complesse, risoluzione ad elementi finiti avanzata, simulazione e analisi fluidodinamica e di scambio termico, interfacciamento con i più noti sistemi CAD 3D quali Autodesk Inventor, Autodesk Revit, PTC Pro/ENGINEER, PTC CoCreate, Siemens NX, Siemens Solid Edge, SolidWorks, SpaceClaim.

AZIENDE PRODUTTRICI, CENNI STORICI

Dal 1938 al 1960

Amut S.p.A. – anno di fondazione 1958

L'attività della società Amut risale al 1948, anno di fondazione della ditta Vinilplastica da parte del fondatore, il sig. Giovanni Milani, questa piccola azienda si è specializzata nell'estrusione di tubi in PVC per componentistica di cicli e motocicli quali i rivestimenti dei freni. Nel 1956 l'azienda divenne Milani Resine e si trasferì a Fagnano Olona in provincia di Varese. I fratelli e soci Giovanni e Giuseppe Milani crearono un reparto per la costruzione di teste e filiere di estrusione e questa attività si affiancò alla produzione di tubi e profili in PVC. Nel 1958, entrò in azienda prima come direttore e poi come socio il sig. Renzo Arbicò, il quale diede un nuovo impulso alla produzione di linee per l'estrusione di profili per tapparelle in PVC rigido. Alla Fiera Tecnica di Torino del 1958 fu presentata un impianto innovativo e che richiamò molta attenzione degli operatori del settore; la novità consisteva nelle apparecchiature di calibratura-traino-taglio riunite in un'unica macchina e che fu chiamato "Gruppo riunito". Dagli anni 50 lo sviluppo della Amut fu costante, grazie anche all'esperienza acquisita come produttore e trasformatore. Nel 1961 venne costruito il nuovo stabilimento, mentre il primo estrusore bivate fu prodotto nel 1969-70.

Bausano S.p.A.

La società Bausano fu fondata nel 1946 dal sig. Clemente Bausano con il nome di Costruzioni Meccaniche Clemente Bausano a Rivarolo Canavese in provincia di Torino. L'attività della società si concentrò sulla produzione di estrusori bivate con diametri da 30 a 130 mm per granulazioni (per il 60% della produzione) e per l'estrusione di tubi e profilati. Nel 1962 fu costruito l'attuale stabilimento e l'attività è proseguita con l'apporto dei figli Eraldo e Livio Bausano. Scomparsi i figli del fondatore, ora l'azienda è sotto la guida di Clemente Bausano, Vicepresidente e nipote omonimo del fondatore.

Clextral

L'azienda viene fondata nel 1956 a Firminy nei pressi di Saint Etienne, nel dipartimento della Loira della regione dell'Alvernia-Rodano-Alpi e vicino a Lione (Francia). Iniziano acquisendo una licenza per la produzione di estrusori bivate corotanti per l'industria delle materie plastiche e chimica ed iniziando la produzione di massa. Nel 1970 inizia la produzione di estrusori bivate per il settore alimentare e nel 1975 l'estrusore bivate viene applicato per la produzione cartaria. Nel 2002 inizia la produzione di estrusori per la produzione di pasta. Con il tempo hanno diversificato la produzione ed i campi di applicazione dell'estrusore bivate che oggi spaziano in molti campi differenti.

Coperion GmbH

La società multinazionale nata nella primavera dell'anno 2000, ha un'origine ben più lontana. Fondata nell'anno 1900 come azienda produttrice di macchine ed impianti per il trasporto dei materiali sfusi, come sistemi di trasporto pneumatico, scambiatori di calore solidi sfusi, filtri e separatori e detergenti per setacci e pellet, per l'industria di produzione dell'alluminio, dell'industria mineraria, chimica ed alimentare. Nell'anno 2000, con la fondazione della società Coperion K-Tron, inizia la produzione di sistemi di compounding e di impianti d'estrusione dei polimeri.

Icma San Giorgio S.p.A.

La società Icma San Giorgio è stata fondata nel 1945 dalla famiglia Colombo già attiva nel settore della fonderia dal 1908, ICMA ha iniziato la sua attività come produttore di macchinari industriali, inizialmente per il legno, in seguito, alcuni anni dopo la fabbricazione del polipropilene dal prof Giulio Natta, per impianti di estrusione di materie plastiche. Si specializza sugli estrusori bivate corotanti per compounding e masterbatch, estrusori per polimeri caricati con fibre vegetali, impianti per il riciclo ed estrusori per laboratori e di linee di estrusione per lastre.

Leistriz AG

La storia di successo di Leistriz iniziò nel 1905; Paul Leistriz produsse i suoi primi prodotti in una fabbrica di Norimberga: pale e profili per turbine a vapore. La società di Norimberga Leistriz AG è stata fondata nel 1937, e ciò che è iniziato in piccolo è diventato oggi un'azienda attiva a livello globale: il gruppo Leistriz con le sue unità di produzione per turbine, pompe, estrusione e tecnologie di produzione.

LMP Torino

La società LMP di Torino è stata fondata nel 1937 dall'ingegner Roberto Colombo e la sua attività era quella di trasformatore di resine termoindurenti per l'industria automobilistica. È stato il primo costruttore di estrusori bivate controrotanti nel 1938 e sono stati utilizzati all'inizio per la produzione di tubi in PVC rigido. Nel 1939 la società LMP vendette un primo lotto di estrusori bivate alla nota società tedesca IG Farben, questo permise alla società di farsi conoscere e di espandersi ulteriormente. Nel 1946, inizio una duplice attività su larga scala come costruttore di impianti di estrusione con bivate ed anche come trasformatore di tubi, lastre e profili. Questa esperienza di trasformatore fu di utilità nello sviluppo di estrusori sempre più potenti, con due e più viti compenetranti, corotanti, a passo e diametri crescenti e con una elevata potenza di mescolamento. Nel 1948 la società LMP concesse mole licenze di costruzione a varie società straniere che contribuirono all'espansione del mercato per gli estrusori bivate; tra queste società vi erano: il gruppo belga Herbosch-Polva, l'inglese Windsor, la francese Creusot-Loire (oggi Clextral), la giapponese Ikegai Iron Works e la svizzera Chemica. Alla Fiera campionaria di Milano del 1951 e 1952 vennero esposti dei tubi estrusi in PVC rigido, con un diametro massimo di 500 mm, fatto unico nel mondo in quanto era la prima volta che si raggiungevano tali dimensioni. Tra il 1950 ed il 1965 la società produsse oltre duemila estrusori bivate corotanti.

Luigi Bandera S.p.A.

In Italia, il precursore degli impianti di estrusione è stato certamente Luigi Bandera che nel 1943, dopo aver visto i primi estrusori monovite negli Stati Uniti, decide di fondare a Busto Arsizio in provincia di Varese, una piccola azienda meccanica a carattere familiare. Nel 1953 l'azienda diventa una SpA e si trasferì nell'attuale stabilimento in Corso Sempione a Busto Arsizio. Il primo estrusore porta la data del 1943, è un modello diametro 60 mm con un rapporto diametro-lunghezza $D/L = 8$, azionato da un motore in c.a. da 4 HP e fu utilizzato per la produzione di tubi e profilati in PVC; questo primo estrusore è ancora esistente presso lo stabilimento Bandera. Specializzatasi sulla fornitura di grandi impianti di estrusione quasi mai di serie, ha iniziato negli anni 70 del secolo scorso la costruzione degli estrusori bivate corotanti e controrotanti. Attualmente la gamma di estrusori bivate controrotanti per la lavorazione del PVC hanno diametri vite che va da 45 a 175 mm ed un rapporto $L/D = 28$, mentre gli estrusori bivate corotanti hanno un diametro vite che va da 55 a 170 mm e con rapporti L/D da 34 a 52.

Pagani & C S.a.S.

Fondata nel 1942 da Antonio Pagani come officina meccanica, si è convertita alla costruzione e vendita di impianti di estrusione completi con un'ampia gamma di estrusori monovite e bivate. Attualmente gestita dalla terza generazione, si trova nella città di Rescaldina in provincia di Milano.

Pomini S.p.A.

Nel 1886, l'imprenditore Luigi Pomini fonda la società Pomini come officina meccanica per la costruzione di componenti per organi di trasmissione. Ha iniziato la costruzione di riduttori ad alta velocità nel 1910 e nel 1948 ha cominciato a produrre i primi impianti per l'industria siderurgica e delle macchine per la lavorazione delle materie plastiche e della gomma acquisendo delle licenze di costruzione dalla Bridge Farrel e Mc Neil (estrusori per la gomma, mescolatori, presse autoclavi per la vulcanizzazione dei pneumatici). La gamma delle macchine per la lavorazione della gomma comprendeva estrusori alimentati a caldo in modo diretto dal mescolatore discontinuo con teste granulatrici e "roller die", estrusori alimentati a freddo Pin Extruder. Le linee e le macchine per la lavorazione delle materie plastiche si sono ampliate nel tempo comprendendo mescolatori, estrusori per l'industria petrolchimica (comprensivi di gruppi di taglio in testa), estrusori monovite, estrusori bivate corotanti per la granulazione con taglio in testa, ad anello liquido o ad aria e teste per spaghetti; questi ultimi utilizzati nella produzione di master e compound.

Reifenhäuser GmbH & Co. KG Maschinenfabrik

L'azienda fu fondata nel 1911 quando Anton Reifenhäuser aprì una piccola officina di fabbro a Troisdorf, vicino a Colonia. Negli anni, i figli di Anton hanno cominciato a nutrire il sogno di trasformare la Reifenhäuser in un'azienda di grande successo nel campo della costruzione di macchinari. Con la vendita del primo estrusore nel 1948, questo sogno divenne realtà. Inizia proprio in questo momento, la storia del grande successo internazionale della Reifenhäuser.

Nel 1958, Reifenhäuser inizia ad avere un'importanza globale: con 35 rappresentanti all'estero, la quota delle esportazioni supera il 54% della produzione totale. Nel 1973, inizia lo sviluppo della prima tecnologia spunbond, nel 1992 vi è un cambio generazionale: Klaus e Ulrich Reifenhäuser assumono la dirigenza dell'azienda.

Union Officine Meccaniche S.p.A.

Il 1955 è l'anno di nascita della Union Officine Meccaniche di S.Vittore Olona (MI), società fondata da Guglielmo Donadoni e Dante Gabba. In quell'anno iniziò la costruzione delle prime macchine per le materie plastiche, mentre già dal 1951 era disponibile una serie di macchine per la lavorazione del legno. Inizialmente furono fabbricati estrusori con diametro vite di 45 e 60 mm per altre società del settore; nel 1960, la Union intraprese l'attività in proprio, prima con impianti per profilati e tubi, poi di recupero e colorazione ed infine d'estrusione e foglia. Dante Gabba è scomparso nel 1986 mentre Guglielmo Donadoni, dopo aver portato avanti il successo dell'azienda, si è ritirato e ha venduto la proprietà nell'anno 2011 alla nuova proprietà; l'azienda esporta tra l'80% ed il 90% della sua produzione.

Krauss Maffei

Krauss-Maffei è un marchio storico dell'industria europea, dalle vicende complesse. Nel 1836 a Monaco di Baviera, Joseph Anton von Maffei fonda la fabbrica di locomotive ferroviarie J.A. Maffei, espandendosi e prosperando fino al 1930 quando, a causa della crisi economica a livello mondiale, andò in bancarotta e, per salvarsi, nel 1931 si fuse con la ditta Krauss & Co. dando vita alla celebre Krauss-Maffei. Specializzatasi nella costruzione di macchine a vapore (locomotive, battelli navali, motori a vapore) e di mezzi militari come carri armati. Dopo ulteriori settant'anni di florida attività produttiva, avvia una nuova fusione societaria con Demag e Mannesmann nel 1999 che condusse all'incorporazione in Siemens. Nell'anno 2000 incorpora la Berstorff, storica azienda produttrice di impianti di estrusione diventando Krauss Maffei Berstorff GmbH. Delle compagnie originarie che formarono il gruppo rimangono, con stabilimenti nella medesima zona, la Krauss Wegmann, attiva nei sistemi di difesa, e la fabbrica di locomotive di Siemens. L'ultimo proprietario del marchio è una società industriale in ingegneria meccanica con sede a Monaco di Baviera che impiega circa 4.500 persone.

Dal 1960 ad oggi

Binova S.r.l.

La società Binova è una delle più recenti aziende che si sono lanciate sul mercato nella produzione di impianti di riciclo ed anche di estrusori monovite e bivate. Fondata nell'anno 2006, si è distinta per una produzione di qualità e tecnologica, adottando sin dall'inizio la digitalizzazione del controllo dell'impianto. Impianti completi per rigenerazione e compound. Attualmente producono estrusori bivate, estrusori monovite, estrusori speciali in cascata, linee di estrusione e coestrusione per foglia, impianti per la produzione di master batch e di revamping di linee esistenti.

Comac S.r.l.

Fondata nell'anno 1978 a Cerro Maggiore (Milano), si è specializzata nella produzione di estrusori bivate per la produzione di masterbatch e compounding, estrusori da laboratorio e per applicazioni speciali. Produce linee complete per bio-polimeri, riciclo ed elastomeri. Produce anche linee per l'estrusione diretta di erba sintetica e l'estrusione di lunghe fibre di vetro miscelate in una matrice polimerica, producendo fogli rinforzati anticrash in estrusione continua. Questo particolare impianto di estrusione, è nato per alimentare le macchine per lo stampaggio a compressione in linea per realizzare pannelli sottoscocca per autoveicoli (ad es. Pannelli per porte interne), coperture ecc.

Leonard S.n.C.

Fondata nell'anno 1968 per la costruzione e la commercializzazione di macchine e di attrezzature per estrusione di materie plastiche, dal 1971 inizia la produzione di estrusori bivate per materie plastiche, di estrusori miscelatori, di estrusori di profili plastici cavi, di estrusori per pellicole e lamine plastiche. Ancora oggi l'azienda di Sumirago (Varese), produce impianti ed attrezzature per la produzione e lavorazione delle fibre artificiali e sintetiche e per la produzione di monofilamenti e multifili di fibre tessili artificiali e sintetiche .

Maris S.p.A.

Fondata nel 1962 dai fratelli Maris, si specializza nella produzione di estrusori e filiere per tubi e profili. Negli anni 70 del secolo scorso, inizia la produzione di estrusori bivate corotanti e facendo del compounding la propria specializzazione. Lo sviluppo degli estrusori bivate prosegue con la realizzazione di viti autopulenti a settori componibili, innovazione che diverrà uno standard per gli estrusori bivate. Le nuove generazioni di estrusori si sviluppano negli anni 80 del secolo scorso con la produzione di estrusori con viti a due o tre principi, usati per la produzione di masterbatchs e compound tecnici. Alla fine degli anni 80 ha sviluppato degli estrusori-reattori per la produzione di polimeri partendo da monomeri, ambito in cui divenne una indiscussa protagonista e dagli anni 90 in poi vi è stato lo sviluppo di nuove applicazioni per gli estrusori bivate corotanti in settori produttivi che prima non ne prevedevano l'utilizzo. Con le successive generazioni di estrusori bivate corotanti, l'azienda ha consolidato il proprio ruolo guida nel settore degli estrusori per compounding.

KMD Plastifizierungstechnik GmbH

La società cinese Yantai Huada Nano Materials Co., Ltd., fu fondata nel 1993 e dopo aver acquisito un'esperienza ventennale nella produzione di masterbatch, microfibre e nanomateriali, spunbond e meltblown nonwoven, si è inserita nel mercato della produzione delle macchine ed impianti di estrusione, fondando la Keimei Plastifizierung Technik (Yantai) Co., Ltd. Nel 2016 la società ha acquisito la Keimei Plastifizierung Technik GmbH in Germania consentendo di implementare le tecnologie di produzione per i nanomateriali. Nel 2018 viene rinominata come KMD Plastifizierungstechnik GmbH con sede a Lubeca (Germania).

BIBLIOGRAFIA

- A. Shah, M. Gupta,
Comparison of the flow in co-rotating and counter-rotating Twin-screw Extruder.
Engineering Mechanics Department, Michigan Technological University, Houghton,
MI 49931 - ANTEC, 2004.
- B. Vergnes, G. Souveton, M.L. Delacour, A. Ainsler,
Experimental and Theoretical Study of Polymer Melting in a Co-rotating Twin Screw Extruder
Intern. Polym. Process pp. 351-362, 2001.
- Chris Rauwendaal,
Polymer Extrusion
Hanser, Munich, 2007
- C. Teixeira, R. Faria, J.A. Cova, A. Gaspar-Cunha.
Solving the Twin Screw Extrusion configuration problem – a plasticating modeling program.
Institute for Polymer and Composites, University of Minho, Portugal, 2006.
- Doboczky, Z.,
Plast. Verarb., 16, 395, 1965.
- Fitzpatrick, H.,
Simulation and Characterization of Flow inside Twin-Screw Extruders,
PhD Thesis, Howard University, 2009.
- Harold F. Giles Jr., John R. Wagner Jr., Eldrige M. Mount III.
Extrusion – the Definitive Processing Guide and Handbook.
William Andrew Publishing, 2005.
- Herausgegeben Von KlemensKohlgrüber.
Co-Rotating Twin-Screw Extruder: Principles
Hanser, Munich, 2007.
- Klenk, K. P.,
Plast. Verarb., 17, IV/1-IV/9, 1966.
- Li, T.,
Analysis of Mixing Efficiency in Continuous Polymer Processing
Equipment, PhD Thesis, Case Western Reserve University, 1995.
- Li, T., Manas-Zloczower. I.,
Polym. Eng. Sci.,
34, 7, 551-558, 1994.

- Mario Miani
L'estrusione con parole mie
 Tecniche Nuove, Milano, 2009
- R.T. Fenner,
Principles of Polymer Processing,
 McMillan, London, 1979
- Valeriu V. Jinescu, Nicoleta Sporea.
Twin Screw Extruder Optimization.
 MaterialePlastice, 2009.
- ZhehevTimor, Costas G. Gogos.
Principles of Polymer processing – 2nd edition.
 Wiley Interscience – A John Wiley & Son, Inc. Publication, 2006.
- Janssen, L. P. B. M.,
Twin Screw Extrusion,
 Elsevier, Amsterdam, 1978.
- John Goff, tony Whelan,
The Dynisco Extrusion Processors Handbook.
 Don DeLaney, 1988.
- J. Diemer, C. Chilles, J. Colbert, T. Miri, A. Ingram, P. David, A. SarhangiFard,
 P. D. Anderson
*Flow Visualisation in Co-rotating Twin Screw Extruders: Positron Emission Particle Tracking and
 Numerical Particle Trajectories*
 Carl Hanser Verlag, Munich Intern. Polymer Processing XXVI, 2011.
- J.L. White.
Twin Screw Extrusion; Technology and Principles.
 Hanser, Munich, 1990.
- José AntónioCovas, AntónioGaspar-Cunha.
Optimization in Polymer Processing.
 A.Gaspar-Cunha, J. A.Covas – Nova Science Publishers, Inc., 2011.