



Università degli studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria

Meccanica e Meccatronica – Curriculum Meccanica

Tesi di Laurea Triennale

**PROPRIETÀ MECCANICHE DEI MATERIALI
PLASTICI: RESISTENZA ALL'AVVITAMENTO AD ALTE
COPPIE DI SERRAGGIO**

**MECHANICAL PROPERTIES OF PLASTIC MATERIALS:
SCREWING RESISTANCE TO HIGH TIGHTENING
TORQUES**

RELATORE: Prof. Lisa Biasetto

LAUREANDO: Giovanni Boratto

ANNO ACCADEMICO 2015-1016

INDICE

Introduzione e obiettivi	3
1. Descrizione dell'azienda	5
1.1 <u>Attività</u>	
1.2 <u>Processo produttivo</u>	
1.3 <u>Quality Control Lab</u>	
2. Descrizione dei materiali scelti	9
2.1 <u>Caratteristiche principali dei polimeri termoplastici</u>	
2.2 <u>Distinzioni e caratteristiche dei materiali scelti</u>	
3. Stampaggio ad iniezione	16
3.1 <u>Descrizione del processo</u>	
3.2 <u>Parametri utilizzati</u>	
3.3 <u>Osservazioni sul processo</u>	
4. Prove di trazione	21
4.1 <u>Norma di riferimento UNI EN ISO 527-1</u>	
4.2 <u>Procedimento</u>	
4.3 <u>Risultati</u>	
4.4 <u>Osservazioni</u>	
5. Prove di avvitatura	28
5.1 <u>Strumenti</u>	
5.2 <u>Descrizione del test</u>	
5.3 <u>Avvitatura alla stessa velocità di rotazione</u>	
5.4 <u>Avvitatura del PP C40 a diverse velocità di rotazione e temperature</u>	
6. Relazioni tra avvitatura e proprietà meccaniche	36
6.1 <u>Correlazioni e regressioni lineari</u>	
6.2 <u>Osservazioni sulle relazioni</u>	
Conclusioni	41
Bibliografia	42
Appendici	43

INTRODUZIONE E OBIETTIVI

In questa tesi viene descritta un'attività sperimentale svolta presso i laboratori R&D e Quality Control dell'azienda Sirmax S.p.a, la quale si occupa di compounding di polimeri.

Durante l'attività si sono studiate le caratteristiche, ed in particolar modo le proprietà meccaniche, di diverse famiglie di polimeri termoplastici e di compositi a matrice polimerica prodotti in azienda.

L'obiettivo dell'attività è il confronto tra ciascun materiale, e la scelta dei metodi più adeguati per realizzare i supporti per l'avvitatura (poppette) di componenti prodotti mediante stampaggio ad iniezione. Tali supporti hanno un ruolo fondamentale poiché consentono l'assemblaggio dei vari componenti mediante avvitatura e devono quindi essere in grado di sostenere adeguate coppie di serraggio. L'obiettivo è inoltre di studiare la correlazione tra alcune proprietà meccaniche dei materiali plastici prodotti e la coppia massima sopportata in fase di assemblaggio mediante avvitatura.

Nelle linee di produzione odierne la possibilità di fissare le viti autofilettanti direttamente sul pezzo in plastica consente di evitare l'utilizzo di componenti aggiuntivi (inserti metallici) e di minimizzare i tempi di assemblaggio. Viene utilizzata in diversi settori quali automotive ed elettrodomestici (nelle figure 1 e 2).



Fig.1: Vasca e oblò in composito di polipropilene di una lavatrice



Fig.2: Componente in composito polipropilene di una pompa; parte faro posteriore automotive in policarbonato

Nel seguente elaborato verrà presentata l'attività sperimentale svolta nel laboratorio di Controllo Qualità mettendo in pratica quanto affrontato durante il Corso di Studi. Durante l'attività con la supervisione del tutor aziendale e con la collaborazione dei tecnici del laboratorio, sono stati/e:

- selezionati 15 materiali, sia polimerici che compositi a matrice polimerica (compounds);
- stampati sia i provini dei supporti per l'avvitatura (poppette), che i provini normalizzati per le prove di trazione (con le dimensioni della normativa ISO) per ciascun materiale, con una pressa idraulica a "vite pistonante", consultando le schede tecniche aziendali per tale processo. I provini sono stati precedentemente progettati in modo tale da poter effettuare una simulazione efficace del processo di avvitatura;
- eseguite le prove di trazione di un certo numero di provini per ciascun materiale seguendo le indicazioni dell'apposita normativa UNI EN ISO 527-1;
- eseguiti i test di avvitatura con avvitatore elettronico a controllo di processo per ciascun materiale, a parità di dimensioni di provini e viti e di velocità di rotazione, a diverse coppie di serraggio, per individuare la coppia di strappo;
- confrontate le coppie di strappo dei diversi materiali studiando le opportune correlazioni con le loro proprietà meccaniche. Inoltre sono stati confrontati provini dello stesso materiale a diverse condizioni di esercizio (temperatura e velocità di installazione).

Verrà innanzitutto descritto brevemente il processo produttivo dell'azienda, focalizzando l'attenzione sugli aspetti più significativi ai fini dell'attività svolta.

CAPITOLO 1

Descrizione dell'azienda

In questo capitolo si presenta l'attività principale di Sirmax S.p.a, sia a livello di impianto produttivo che di controllo qualità. Per esaminare le proprietà del prodotto finito è importante conoscere le fasi della trasformazione subita e i parametri da controllare (composizione chimica, parametri del processo di trasformazione). E' altrettanto importante poi analizzare le proprietà dei materiali essendo in grado di rilevare da quali parametri (composizione e processo) esse possano dipendere.

1.1. Attività

L'impianto produttivo trasforma, mediante un processo di estrusione, la materia prima (polimero termoplastico grezzo sottoforma di granuli), in pellets a base dello stesso materiale mescolato con l'aggiunta di cariche, additivi e masterbatch (sottoforma di granuli o polveri), con lo scopo di migliorarne le proprietà fisico-chimiche.

La **materia prima** sono polimeri termoplastici (es: PP, PA, ABS, PC,PS) sottoforma di pellets.

Per **cariche** si intendono tutti le sostanze aggiuntive atte a migliorare le proprietà meccaniche della materia prima, come le cariche minerali (talco, carbonato di calcio) e le fibre di vetro. L'effetto delle cariche dipende dalla natura e dalla forza del legame esistente tra il materiale della carica e le catene polimeriche della resina. In generale esse conferiscono rigidità e stabilità dimensionale.

Altri **additivi** hanno il ruolo di migliorare le altre proprietà fisico-chimiche del polimero:

- per aumentare la resistenza chimica vengono aggiunti antiossidanti;
- per abbassare l'inflammabilità (capacità di sostenere la combustione) vengono aggiunti dei ritardanti di fiamma (es: a base di bromo);
- per migliorare la lavorabilità vengono aggiunti plastificanti.

Per **masterbatch** si intendono le sostanze coloranti sottoforma di pellets o polvere (es:TiO₂ per bianco). Il master contiene una percentuale ben definita di pigmentazione.

1.2.Processo produttivo

La lavorazione comincia con la miscelazione della materia prima con gli additivi, le cariche e i master, controllata dai dosatori, e prosegue in un estrusore, che porta a fusione la miscela a base di granuli, la omogeneizza e la trasforma in spaghi mediante il passaggio attraverso una filiera. Tali spaghi vengono poi solidificati mediante il passaggio in una vasca piena d'acqua, e granulati ottenendo il prodotto finito sottoforma di nuovi pellets.

PRODUCTION & INSPECTION FLOWCHART

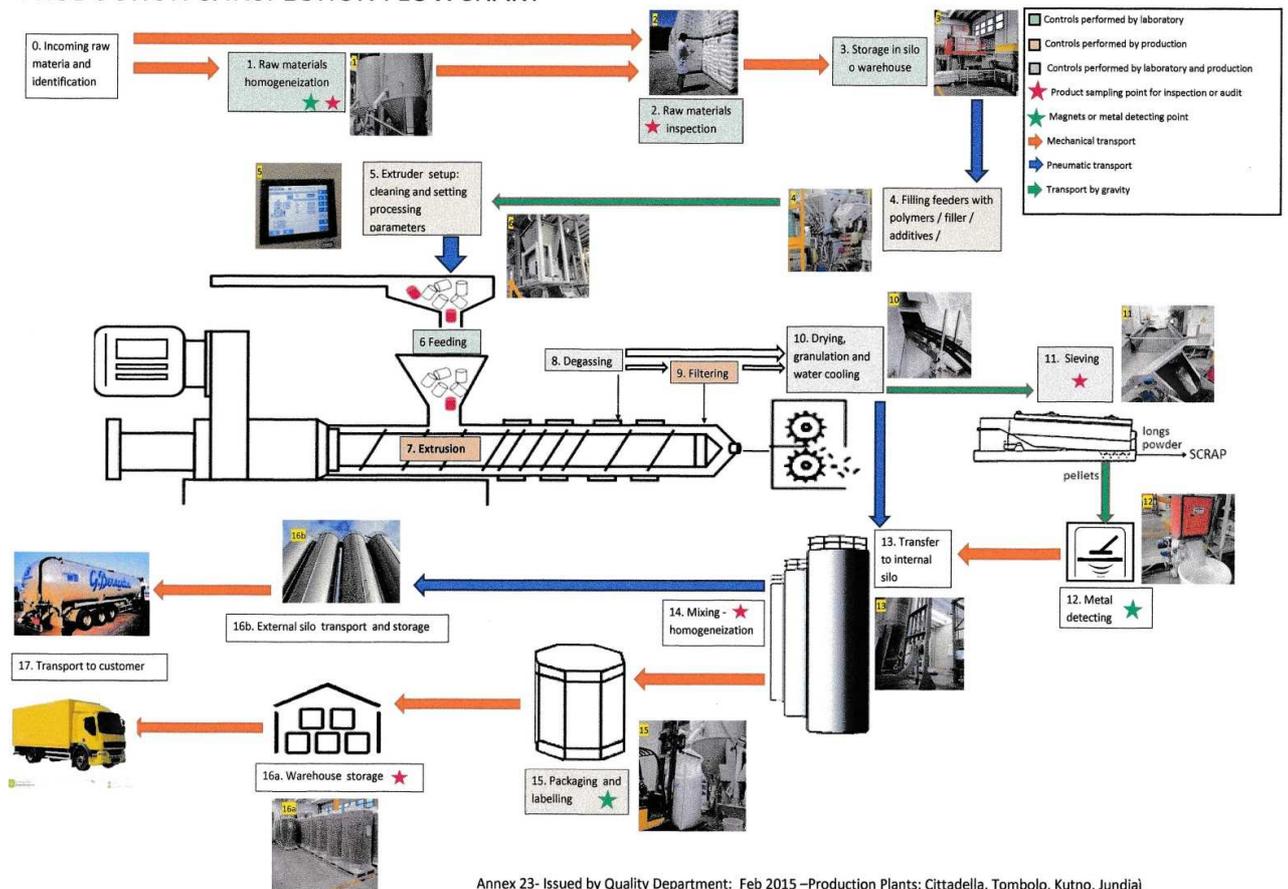


Fig. 1.1: flowchart del processo produttivo di Sirmax S.p.a

Il processo parte dalla materia prima che, dopo essere stata ispezionata, viene omogeneizzata (con una coclea) all'interno di silos appositi, e trasportata mediante sistemi pneumatici verso i dosatori della macchina. I vari dosatori possono essere riempiti con resine, cariche, additivi e masters a seconda della ricetta del prodotto. La miscela così ottenuta passa all'interno di una tramoggia, dalla quale ha accesso diretto all'estrusore.

Nell'estrusore la miscela di granuli viene trasportata da due viti corotanti (zona di alimentazione), all'interno di un cilindro riscaldato da termoresistenze. Il calore fornito dalle termoresistenze, insieme al contributo di attrito tra viti e granuli e tra i granuli stessi, portano a fusione la miscela (zona di fusione). Il cilindro è fornito di un sistema di degasaggio, cosicché l'estrusore lavori sottovuoto, poiché la presenza di vapore andrebbe a compromettere alcune proprietà del prodotto finito, e di una bocca di accesso laterale per l'aggiunta di carica. Le fibre di vetro inserite in tale posizione rimangono più lunghe dando la possibilità di aumentare le proprietà meccaniche. In corrispondenza della bocca di accesso laterale la vite presenta degli appositi masticatori per la carica. (Nota 1.1)

Nella zona terminale dell'estrusore (sezione di trasporto) il fuso è sottoposto la pressione elevata sia per l'azione delle viti che per effetto della conformazione della filiera.

Dopo essere fuoriuscito dalla matrice sottoforma di fili, l'estruso viene raffreddato attraverso il passaggio in una vasca riempita d'acqua. In seguito vengono sminuzzati, ottenendo pellets a spaghetti, o centrifugati, ottenendo pellets sferici. Per evitare di ottenere pellets di dimensioni disomogenee, essi passano attraverso dei vibro-vagli che li separano in base alle dimensioni.

Poi i granuli passano nuovamente in dei silos prodotto finito in cui vengono mescolati e omogeneizzati in modo da essere pronti per l'imballaggio e il trasporto finale.

Tale processo può essere ripetuto con pellets di materia prima già lavorata in un ciclo precedente. (Nota 1.2)

Nota 1.1: Il profilo della vite viene impostato a seconda della lavorazione (ad esempio se si lavora un polimero con carica di fibra vetro o talco).

Nota 1.2: C'è un limite tecnologico alla possibilità di riciclaggio, virtualmente infinita, dei materiali plastici ed in particolare per i materiali plastici rinforzati con fibra di vetro, poiché ogni nuova esposizione di un materiale termoplastico al calore, come quella che si verifica ad ogni nuova fusione o come quella che può aver subito un certo componente in opera, ne causa un degrado sensibile delle caratteristiche meccaniche, dovuta alla rottura dei legami delle catene polimeriche e che va sotto il nome di termo-ossidazione; inoltre, se il materiale è caricato con fibre di vetro, l'azione meccanica di macinazione dei manufatti dismessi da riciclare come pure l'azione di rimescolamento del materiale applicata dalla vite all'interno del cilindro di plastificazione, causa una diminuzione della lunghezza media delle fibre di vetro di rinforzo con un conseguente ulteriore degrado delle caratteristiche resistenziali del composito plastica – fibre di vetro.

1.3. Quality Control Lab

Il processo produttivo è monitorato 24 ore al giorno da un laboratorio di controllo qualità, che si occupa di verificare le prestazioni dei materiali, in ingresso e in uscita, in termini di proprietà fisico-chimiche sulla base dei requisiti richiesti dall'azienda o dai clienti.

Si controllano quindi:

- **composizione chimica**: controllo la quantità di carica, se presente;
- **estetica** :controllo colore (mediante spettrofotometro) e presenza di difetti estetici e bolle;
- **sicurezza** :controllo infiammabilità;
- **lavorabilità** :controllo fluidità, che dà informazioni sulla stabilità al ritiro;
- **resistenza** :misura delle proprietà meccaniche (secondo normative ISO e ASTM):
 - prova di trazione;
 - prova di flessione a 3 punti (misura il modulo elastico a flessione);
 - prova di assorbimento dell'urto, sia IZOD (per ASTM) che Charpy (per ISO).

Materiale	PP omopolimero (non caricato)
MFR (melt flow rate)	10 g/10min
MEF (modulo elastico a flessione)	770 MPa
IZOD (resistenza agli urti)	400 J/m
Note sull'estetica	Presenza infusi

Tabella 1.1: esempio di piano di controllo per una materia prima PP omopolimero.

Gli strumenti utilizzati durante l'attività sperimentale all'interno del laboratorio sono stati:

- **pressa idraulica a vite pistonante Negri-Bossi da 65 tons** per stampare i provini (sia per la prova di avvitatura che per la prova di trazione);
- **macchina per prova di trazione Instron 3366** con cella di carico max di 5kN, con i rispettivi **estensimetri Instron**;
- **avvitatore elettronico a controllo di processo Ober**.

CAPITOLO 2

Descrizione dei materiali scelti

I materiali utilizzati durante l'attività sperimentale sono polimeri termoplastici e compositi a matrice polimerica già prodotti dall'azienda. Questo capitolo ha l'obiettivo di introdurre in modo generale le caratteristiche dei materiali polimerici, focalizzando l'attenzione sui materiali utilizzati, integrando le conoscenze apprese durante il Corso di Studi con le informazioni acquisite in azienda. Diversi argomenti trattati in questo capitolo sono alla base dei procedimenti e delle scelte riguardanti le fasi di stampaggio, di avvitatura e di misurazione delle proprietà meccaniche.

2.1. Caratteristiche principali dei polimeri termoplastici

Definizione: I polimeri sono delle sostanze organiche macromolecolari, cioè costituite da molecole molto grandi (con peso molecolare molto elevato), ottenute dalla ripetizione di un particolare raggruppamento di atomi, detto "unità ripetitiva", caratteristico del polimero stesso. Le macromolecole che costituiscono il polimero possono essere formate da unità ripetitive uguali (omopolimeri) o diverse (copolimeri).

I polimeri utilizzati durante l'attività, essendo termoplastici, presentano macromolecole che possono essere lineari o ramificate. Esse sono completamente indipendenti allo stato fuso, mentre allo stato solido sono tenute assieme da legami secondari. Riscaldando il polimero, poiché tali legami sono deboli, si distruggono progressivamente, rendendo le catene libere di scorrere reciprocamente. Così il polimero può essere formato mediante estrusione o stampaggio a iniezione già a temperature relativamente basse.



Fig 2.1: polimeria sviluppo lineare (a) e ramificato (b).

I polimeri termoplastici si possono distinguere a seconda di come solidificano in amorfi (con struttura ordinata) e semicristallini (con struttura parzialmente ordinata).

I due presentano importanti differenze soprattutto in termini di:

- **solidificazione**, poiché i polimeri amorfi durante il raffreddamento non presentano uno specifico punto di solidificazione (T_m), ma aumentano la loro viscosità passando da stato liquido prima a uno stato solido gommoso, poi a uno stato solido vetroso in corrispondenza della temperatura di transizione vetrosa T_g , con conseguente cambio di pendenza della curva v - T . Nella maggior parte dei casi i polimeri allo stato vetroso sono rigidi e fragili, ad eccezione del policarbonato, duttile e tenace al di sotto della sua T_g .

I polimeri semicristallini invece presentano uno specifico punto di fusione T_m in corrispondenza del quale, durante il raffreddamento, il loro volume specifico cala bruscamente (ritiro) a causa dei cambiamenti strutturali a cui sono sottoposti. In questa fase infatti, a seconda della velocità di raffreddamento e

della presenza di ramificazioni, le catene disordinate e aggrovigliate allo stato fuso assumono una configurazione ordinata tramite rotazione e scorrimento, compattandosi.

- **proprietà meccaniche**, poiché una struttura maggiormente cristallina garantisce una maggiore rigidità e resistenza.

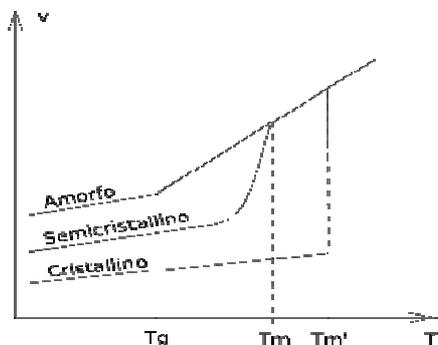


Fig.2.2: diagramma del volume specifico in funzione della temperatura

2.2. Distinzioni e Caratteristiche dei materiali scelti

I materiali utilizzati durante l'attività di laboratorio sono stati tutti quanti scelti sulla base di un possibile impiego per componenti che richiedono l'assemblaggio mediante avvitatura. Sono tutti "compound polymers" a base di polimeri termoplastici, in particolare a base di: polipropilene (PP), acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS) e poliammide 6 (PA6). In questo capitolo vengono prima introdotte le principali caratteristiche di tali polimeri, poi vengono descritte le tipologie specifiche di materiali utilizzati.

2.2.1. Polipropilene (PP)

È un polimero termoplastico **semi-cristallino** che si ottiene mediante polimerizzazione per addizione da monomeri di propilene. Il più frequente a livello commerciale (utilizzato anche durante l'attività) è quello **isotattico**, caratterizzato cioè da atomi con la stessa configurazione relativa.



Può essere **omopolimero**, cioè formato solo da monomeri di propilene, o **copolimero** se le catene macromolecolari sono costituite da monomeri di propilene e da monomeri di etilene (random o a blocchi). I copolimeri risultano più duttili e resistenti all'impatto rispetto agli omopolimeri.

Viene utilizzato in molti settori, dal packaging agli elettrodomestici fino all'automotive perché:

- relativamente economico e riciclabile;
- presenta bassa densità (0,90-0,92 g/cm³ non caricato);
- presenta discrete caratteristiche meccaniche, tra le quali spiccano la rigidità e la resistenza all'impatto (diventa fragile sotto gli 0°C);

- ha buona resistenza chimica (resiste a molti acidi ma non agli idrocarburi alifatici e aromatici);
- è un buon isolante elettrico;
- semplice da lavorare (sia per stampaggio che per estrusione), inoltre si può saldare.

2.2.2. Acrilonitrile butadiene stirene (ABS)

È un terpolimero **amorfo** ricavato dalla copolimerizzazione di tre monomeri:

- l'acrilonitrile (dal 15 al 35%) conferisce resistenza termica e chimica,
- il butadiene (dal 5 al 30%) determina la resistenza e la duttilità della gomma,
- lo stirene (dal 40 al 60%) conferisce la brillantezza superficiale, la facilità di lavorazione e il basso costo.

Il risultato è una lunga catena di polibutadiene attraversato da catene più corte di poli(stirene-co-acrilonitrile).

I suoi vantaggi sono:

- l'elevata resilienza e rigidità anche alle basse temperature (fino a -40°C);
- la buona resistenza termica, tanto che può essere utilizzato da circa -45°C sino a $+185^{\circ}\text{C}$;
- buona resistenza chimica, soprattutto all'acqua, alle soluzioni saline acquose, agli acidi diluiti e alle soluzioni alcaline, agli idrocarburi saturi (benzina), agli oli minerali e ai grassi animali e vegetali;
- la buona stabilità dimensionale;
- la buona termo-formabilità.

Gli svantaggi invece sono:

- la debole resistenza ai solventi e agli idrocarburi;
- la facile infiammabilità.

Viene tipicamente usato per realizzare tubi o altri oggetti leggeri e flessibili. È usato anche per interni auto e giocattoli.

2.2.3. Policarbonato (PC)

È un polimero termoplastico amorfo, vetroso ($T_{\text{amb}} < T_g$) caratterizzato da un'elevata temperatura di transizione vetrosa ($T_g = 150^{\circ}\text{C}$). Si ottiene dalla condensazione del bisfenolo con l'acido carbonico.

I suoi vantaggi sono:

- elevata resistenza all'urto (Fig. 2.3);
- elevata resistenza termica;
- buona stabilità dimensionale;
- ottima trasparenza e trasmissione della luce;
- autoestinguenza.

I suoi svantaggi invece sono:

- bassa durezza superficiale (graffiabile);
- debole resistenza ai solventi organici e ai raggi UV.

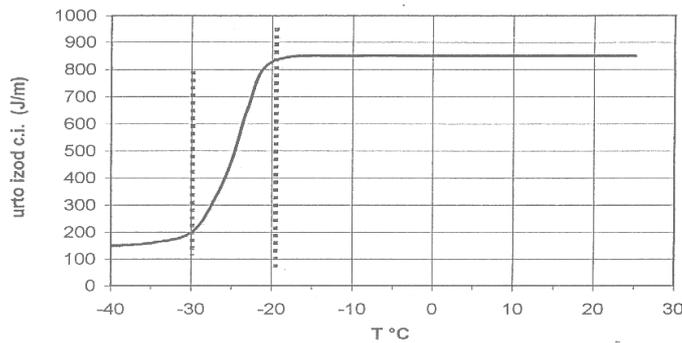


Fig. 2.3: resistenza all'urto del PC al variare della temperatura.

2.2.4. Poliammide 6 (PA 6)

E' un polimero termoplastico semi-cristallino, fa parte delle poliammidi alifatiche e si ottiene con una polimerizzazione a stadi. E' chiamato più comunemente **nylon 6**.

E' caratterizzato da:

- ottime proprietà meccaniche, resilienza, resistenza a caldo, resistenza all'usura e a fatica;
- basso coefficiente d'attrito, per questo può addirittura sostituire alcuni metalli in applicazioni meccaniche quali organi di trasmissione di potenza;
- buona resistenza ai solventi organici;
- buona lavorabilità (sia per stampaggio che per macchine utensili).
- notevole igroscopia, che comporta una scarsa resistenza all'umidità. Per questo motivo il materiale va essiccato prima di ogni lavorazione. (Nota 2.1)

Nota2.1: L'acqua assorbita dai granuli dall'umidità atmosferica produce gravi inconvenienti durante il processo di trasformazione poiché risulta presente alla temperatura di fusione della PA6 con conseguente possibilità di idrolisi (rottura) del legame ammidico (peptidico). La presenza di umidità superiore al limite accettato dello 0.2% genera un abbassamento della viscosità del polimero fuso per evidente diminuzione del peso molecolare medio dovuto alla rottura di un gran numero di legami principali della catena.

2.2.5. Distinzione commerciale

I "compound polymers" scelti durante l'attività di laboratorio fanno parte delle seguenti famiglie distinte con il loro nome commerciale: PP naturale (ISOPLEN®), PP con carica minerale (ISOFIL®), PP con fibra di vetro (ISOGLASS®), ABS (ISOTER®), PC-ABS (ISOBLEND®), PA (ISONYL®).

PP non caricato (ISOPLEN®)

Comprende PP sia omopolimero che copolimero senza contenuto di cariche con additivi (ritardanti di fiamma, stabilizzanti ecc) e coloranti. Tra questi è stato scelto:

- PP omopolimero non colorato (di seguito nominato **PP HOMO NAT**).

PP con carica minerale (ISOFIL®)

Comprende PP sia omopolimero che copolimero con un contenuto tra il 5 e il 50% di carica minerale (carbonato di calcio, talco) e percentuali minori di additivi (ritardanti di fiamma, stabilizzanti ecc) e coloranti. La carica minerale conferisce:

- un discreto aumento del modulo elastico e delle proprietà termiche della resina termoplastica,
- una maggiore stabilità dimensionale.

Tra questi compositi a rinforzo particellare sono stati scelti:

- PP omopolimero nero con il 10% di talco (**PP T10 HOMO**),
- PP omopolimero naturale con il 10% di talco micro (**PP T10 MICRO**),
- PP copolimero nero con il 20% di talco (**PP T20 COPO**),
- PP omopolimero grigio con il 40% di talco (**PP T40 HOMO**),
- PP omopolimero bianco con il 40% di carbonato di calcio (**PP C40 HOMO**).

PP con fibra di vetro (ISOGLASS®)

Comprende PP sia omopolimeri che copolimeri con un contenuto tra il 10 e il 50% di fibre di vetro e percentuali minori di additivi e coloranti. Le fibre di vetro conferiscono:

- un notevole aumento delle proprietà meccaniche della resina termoplastica (a discapito della duttilità),
- una maggiore stabilità dimensionale.

Tra questi compositi rinforzati con fibre sono stati scelti:

- PP omopolimero bianco con il 30% di fibre di vetro (**PP FV30 WHITE**),
- PP omopolimero non colorato (naturale) con il 30% di fibre di vetro (**PP FV30 NAT**).

	unità	hPP homo	PP T10 homo	PP T10 micro	PP T20 copo	PP T40 homo	PP C40 homo	PP FV30 white	PP FV30 nat
Densità	g/cm ³	0.90	1.03		1.10	1.24	1.24	1.14	1.14
Modulo Elastico	MPa	1800	2200		1500	3500	3000	6000	6500
Carico Snervamento	MPa	30	30		20	30	20	-	-
Carico Rottura	MPa	25	25		15	25	15	60	80
Allungamento a snerv.	%	5	4		5	4	4	-	-
Allungamento a rottura	%	> 30	>30		> 50	3-15	>50	3-5	3-5
Temperatura di fusione	°C	165	165		165	165	165	165	165
T. rammollimento HDT -A	°C	60	70		50	80	80	100	130
Dilatazione termica	10 ⁻⁵ /K	15	10		12	8	8	6	6
Costante dielettrica		2.3	2.3		2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Assorbimento d'acqua	%	< 0.1	< 0.1		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

Tabella 2.1: caratteristiche tipiche dei compound a base di polipropilene da catalogo CESAP

ABS (ISOTER®)

Comprende tecnopolimeri a base di ABS con additivi e coloranti insieme ad un'eventuale aggiunta di fibre di vetro. Tra questi sono stati scelti:

- ABS naturale non caricato (**ABS**),
- ABS nero con il 17% di fibre di vetro (**ABS FV17**).

PC/ABS (ISOBLEND®)

E' un prodotto specifico adatto ad applicazioni che richiedono un'elevata resistenza alla distorsione dovuta al calore (temperature tra 95 e 125°C) e una buona tenacità. E' stato scelto:

- blend PC/ABS nero (**PC/ABS**).

PC (ISOCLEAR®)

Comprende tecnopolimeri a base di PC con additivi, coloranti ed eventuali cariche (fibre di vetro). Di questi abbiamo scelto:

- PC naturale non caricato (**PC**).

	unità	ABS	ABS GF17	PC/ABS	PC
Densità	g/cm ³	1.05	1.18	1.10	1.20
Modulo Elastico	MPa	2200	6000	2000	2300
Carico Snervamento	MPa	40	-	50	60
Carico Rottura	MPa	30	60	40	
Allungamento a snerv.	%	2.5	-	3.5	5
Allungamento a rottura	%	30	2	20	
Temperatura di fusione	°C	-	-	-	-
T.ammollimento HDT -A	°C	95-105	100-110	90-110	125-135
Dilatazione termica	10 ⁻⁵ /K	9	4	8	7
Costante dielettrica		2.8	2.6	3	3
Assorbimento d'acqua	%	0.3	0.3	0.2	0,15

Tabella 2.2: caratteristiche tipiche dei compound a base di ABS da catalogo CESAP

PA (ISONYL®)

Comprende tecnopolimeri a base sia di PA6 che PA66 con additivi, coloranti ed eventuali cariche (fibre di vetro). Di questi sono stati scelti:

- PA6 grigio non caricato (**PA6**),
- PA6 non colorato con l'1% di elastomero (**PA6 ST1**),
- PA6 non colorato con il 30% di fibre di vetro (**PA6 FV30**).

	unità	PA6	PA6 ST1	PA6 GF30
Densità	g/cm ³	1.12	1.12	1.35
Modulo Elastico	MPa	4000	2500	10000
Carico Snervamento	MPa	75	65	-
Carico Rottura	MPa	50	50	170
Allungamento a snerv.	%	4	5	-
Allungamento a rottura	%	>30	>40	3,5
Temperatura di fusione	°C	220-225	220-225	220-225
HDT Metodo A	°C	55-80	50-75	190-215
Dilatazione termica	10 ⁻⁵ /K	8	8	3
Costante dielettrica		3.5	3.5	3.8
Assorbimento d'acqua	%	2.5	2.5	1.4

Tabella 2.3: caratteristiche tipiche dei compound a base di PA6 da catalogo CESAP

CAPITOLO 3

Stampaggio ad iniezione

In questo capitolo si introduce il processo di injection molding, elencando le fasi salienti e i parametri di processo (temperature, tempi, pressioni). Sulla base di ciò poi si descrivono le modalità utilizzate per stampare correttamente i provini a seconda dei vari materiali plastici trattati.

3.1.Descrizione del processo

Una delle maggiori potenzialità dei polimeri termoplastici (rinforzati o meno) è il prestarsi molto bene ad essere lavorati tramite stampaggio ad iniezione, un processo che permette di avere elevate produttività e costi di produzione molto bassi purché le quantità prodotte siano sufficientemente elevate da ammortizzare i costi dello stampo. Lo stampaggio ad iniezione (injection molding) è infatti una delle tecnologie più diffuse nella trasformazione delle materie termoplastiche in quanto, oltre all'economicità di processo prima accennata, esso permette la produzione di pezzi che non necessitano di lavorazioni aggiuntive, aventi geometrie anche molto complesse (completamente asimmetriche) e dimensioni anche ridotte, nei colori e nei materiali più differenti possibili (come composizione chimica e come rinforzi).

I componenti in plastica prodotti per iniezione vengono fabbricati tipicamente tramite macchine industriali del tipo "a vite pistonante".

3.1.1.Fasi del ciclo di stampaggio

Il materiale plastico da trasformare sottoforma di pellets, opportunamente pretrattato (con un eventuale trattamento di deumidificazione), viene caricato nel cilindro di plastificazione attraverso la tramoggia. Da questo momento si possono identificare cinque fasi:

Fase di caricamento e fusione (*loading*): la vite senza fine, posizionata all'interno del cilindro, ruota e riscalda il materiale plastico, grazie all'attrito che si genera tra granuli ed elica, tra granuli e cilindro e tra i granuli stessi. A questo effetto di riscaldamento si somma il contributo termico generato dagli elementi riscaldanti posizionati all'esterno del cilindro di plastificazione. Il materiale plastico viene quindi fuso ed avanza verso la testa della vite grazie al movimento rotatorio della stessa. L'accumulo del materiale plastificato nella parte anteriore del cilindro fa arretrare la vite, vincendo una contropressione impostata per migliorare la plastificazione, determinando la quantità di materiale che verrà iniettata (*quota di fine carica*).

• **Fase di iniezione o riempimento (*mould filling*):** una volta chiusi gli stampi, il materiale plastico fuso, portato alla temperatura e alla viscosità necessaria, accumulato in testa alla vite, viene iniettato nella cavità dello stampo, passando attraverso opportuni canali di distribuzione del fuso, grazie alla spinta subita idraulicamente dalla vite con velocità prestabilite. La pressione massima necessaria per mantenere le velocità stabilite di riempimento delle impronte viene detta "pressione di iniezione"

Nota: il valore massimo che si può utilizzare dipende dal tonnellaggio della pressa e dalla superficie degli stampi.

- **Fase di mantenimento o impaccamento** (packing): nel momento in cui la cavità viene riempita, il polimero viene pressurizzato e mantenuto sotto pressione, allo scopo rispettivamente di uniformare e compensare con materiale aggiuntivo, proveniente dal cilindro di plastificazione, le contrazioni termiche dovute all'abbassamento della temperatura del fuso, venuto a contatto con gli stampi più freddi. Questa fase termina nel momento in cui il punto d'iniezione si solidifica impedendo alla vite di immettere ulteriore materiale nella cavità.
- **Fase di raffreddamento sigillato** (sealed cooling): in questa fase il pezzo continua la solidificazione, iniziata nella fase precedente, ma il ritiro volumetrico del materiale non è più compensato dall'ingresso di nuovo materiale, così la densità del polimero (soprattutto se semicristallino) aumenta.
- **Apertura degli stampi ed estrazione del pezzo** (mould opening and part ejection): gli stampi vengono aperti ed il pezzo (eventualmente comprensivo della materozza) viene staccato dalle impronte tramite appositi organi meccanici mobili, detti estrattori. Affinché il pezzo non venga danneggiato durante l'estrazione, esso deve aver raggiunto una temperatura tale da assicurare una certa rigidità strutturale. Il pezzo, ancora caldo al momento dell'estrazione, completa poi il suo raffreddamento in aria o in acqua.

Tale processo è reso più rapido di quanto descritto poichè, durante la fase di raffreddamento del pezzo all'interno degli stampi chiusi, la vite ruotando arretra preparando già il materiale fuso per il ciclo seguente (fase di caricamento e fusione).

Il processo così ottenuto si può definire ciclico ma non continuo, in quanto in ogni ciclo l'accesso del nuovo materiale fuso è impedito dal materiale lavorato il ciclo precedente.

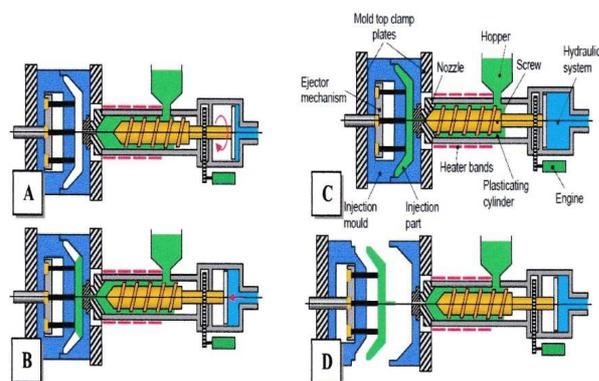


Fig.3.1: Principali fasi dello stampaggio ad iniezione [1]; A: accumulo del materiale fuso, B: iniezione, C: mantenimento/raffreddamento, D: estrazione.

3.1.2. Andamento delle pressioni durante il ciclo di stampaggio

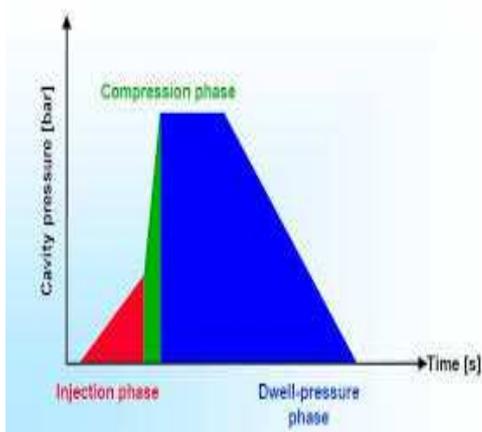


Fig.3.2: Tipico andamento temporale delle pressioni all'interno della cavità di uno stampo durante il processo di stampaggio.

- durante la fase di accumulo del materiale fuso in prossimità dell'ugello si ha un aumento della pressione dovuto all'aumento della temperatura;
- la traslazione della vite e la conseguente spinta del materiale attraverso l'ugello, comporta un aumento notevole di pressione (pressione di iniezione);
- durante la fase di mantenimento la pressione resta pressoché costante in quanto il lieve aumento della pressione dovuto all'accesso di ulteriore materiale fuso, viene compensato dal raffreddamento del fuso a contatto con gli stampi (inizio della solidificazione);
- la pressione cala poi bruscamente durante la fase di raffreddamento, fino all'apertura degli stampi e all'estrazione. Da questo punto, in seguito alla chiusura degli stampi, partirà il ciclo successivo.

Tale diagramma è importante poiché dà informazioni sia sulle necessità fisiche del prodotto (andamento delle pressioni), quindi sulla sua qualità finale (capability), che sul tempo ciclo, e quindi sulla produttività del processo.

3.2. Parametri utilizzati

Durante l'attività sperimentale i campioncini ed i provini sui quali effettuare i test, sono stati stampati con una pressa idraulica da 65 tonnellate.



Fig.3.3 pressa idraulica a vite pistonante Negri-Bossi da 65 tonnellate

I parametri impostati sono stati scelti consultando le schede tecniche dell'azienda, e in base alle necessità dei vari materiali affinché non presentassero difetti come ritiri, bolle, eccesso di bava. Vengono di seguito riportati i parametri scelti per stampare i campioncini dei supporti per l'avvitatura:

	unità	PP	ABS	PC/ABS	PC	PA6
Quota fine carica (volume)	mm	105-120	100-110	110	110	100-110
Temperatura del fuso	°C	220-250	220-250	250-270	280-310	240-250
Temperatura stampo	°C	20-70	40-80	70-90	70-100	60-100
Pressione di iniezione	bar	60-80	70-100	100	110	80-100
Pressione di mantenimento	bar	30-40	30-50	40	50	40-50
Contropressione	bar	5	5	10	10	5
Velocità di rotazione vite	rpm	100	60	50	50	75
Tempo di carica	s	10	10	10	10	10
Tempo di mantenimento	s	8-12	5-10	10	15	8-12
Tempo di pausa	s	10-20	15-20	25	25	10-15
Tempo ciclo (totale medio)	s	35	35	45	50	35
Ritiro	%	0,95-2,5	0,4-0,7	0,5-0,7	0,7	0,7-2
Essiccazione (3-4h a 80°C)		-	si	si	si	si

3.3 Osservazioni sul processo

- La quota di fine carica, cioè la corsa che la vite deve effettuare per iniettare un volume di fuso tale da riempire adeguatamente lo stampo, varia a seconda del ritiro volumetrico del materiale durante la fase di solidificazione. Il PA6 e soprattutto il PP, essendo semicristallini, presentano un ritiro maggiore rispetto all'ABS amorfo e quindi richiedono una quota di fine carica maggiore. La presenza di cariche all'interno del polimero tuttavia riduce l'entità del ritiro e quindi la necessità di un maggiore apporto di materiale fuso.
- La temperatura del fuso:
 - deve essere ovviamente maggiore della T_m , nel caso di polimeri semicristallini e maggiore della T_r (rammollimento) nel caso di polimeri amorfi;
 - viene scelta in base alla fluidità opportuna;
 - non deve causare bruciature allo stato solido.
- Le pressioni di iniezione e di mantenimento, dipendono dalla viscosità del polimero fuso: all'aumentare della viscosità aumenta la pressione necessaria per spingerlo all'interno dello stampo. La presenza di cariche può aumentare notevolmente la viscosità del fuso.
- Il tempo di mantenimento dipende dall'entità del ritiro: i polimeri semicristallini, presentando un maggiore ritiro, richiedono un maggiore mantenimento. Pure in questo caso la presenza di carica rende il polimero più stabile, riducendo l'entità del ritiro e quindi la necessità di un maggiore mantenimento.
- Il tempo di pausa (raffreddamento sigillato) dipende sia dalla stabilità dimensionale del materiale, che dal calore latente di solidificazione. Quest'ultimo viene scambiato con lo stampo rallentando il raffreddamento del componente. Nel caso specifico il PC/ABS presenta un elevato calore latente di solidificazione, quindi necessita di un elevato tempo di pausa. Se il tempo di

pausa non è sufficiente a garantire una completa solidificazione del pezzo, esso viene distorto durante l'estrazione.

- In seguito all'estrazione dei pezzi, per evitare la formazione di bolle all'interno dei fori, i materiali a base di PP sono stati raffreddati in acqua.



Fig.3.4: supporti per l'avvitatura (poppette) ottenuti per stampaggio ad iniezione



Fig.3.5 provette per trazione ottenute per stampaggio ad iniezione

CAPITOLO 4

Prove di trazione

Ciascuno dei campioni scelti è stato sottoposto alla prova di trazione con la macchina Instron 3366 con cella di carico da 5 kN, seguendo la norma per la “determinazione delle caratteristiche a trazione” UNI EN ISO 527-1.

4.1. Norma di riferimento UNI EN ISO 527-1

Principio della prova: La provetta viene allungata lungo il suo asse maggiore longitudinale a velocità costante finché non si rompe o finché il carico unitario (carico) o la deformazione (allungamento) abbiano raggiunto un valore predeterminato. Per tutto il tempo della prova vengono misurati il carico sostenuto dalla provetta e l'allungamento.

Scopo: La norma definisce i metodi necessari per determinare: la resistenza a trazione, il modulo in trazione e le relazioni carico unitario di trazione/deformazione nelle condizioni definite. Tali metodi prescrivono le dimensioni raccomandate per le provette e le condizioni necessarie per un'adeguata misurazione.

Distinzione: I metodi sono adatti selettivamente all'uso della seguente gamma di materiali:

- Materiali termoplastici rigidi e semirigidi per stampaggio ed estrusione incluse le composizioni caricate e rinforzate;
- Compositi termoplastici e termoindurenti rinforzati con fibre che incorporano rinforzi unidirezionali e non;
- Materiali termoindurenti rigidi e semirigidi per stampaggio;
- Polimeri a cristalli liquidi termo tropici.

Di questa gamma noi abbiamo utilizzato i primi due.

Parametri:

- **Lunghezza di misura L_0 :** distanza iniziale compresa tra le linee di riferimento nella parte centrale della provetta. E' espressa in mm.
- **Velocità di prova v :** velocità di allontanamento dei morsetti della macchina di prova durante la prova. E' espressa in mm/min;
- **Carico unitario a trazione σ :** forza di trazione per unità di area della sezione trasversale iniziale, a cui è sottoposta la provetta ad un qualunque momento della prova. E' espresso in MPa;
- **Carico unitario a trazione allo snervamento σ_{sn} :** primo carico unitario in cui un aumento di deformazione avviene senza un aumento del carico unitario stesso. Può essere minore del valore massimo ottenibile di carico unitario. E' espresso in MPa;
- **Carico unitario a trazione a rottura σ_R :** carico unitario a trazione a cui la provetta si rompe. E' espresso in MPa;
- **Resistenza a trazione σ_{MAX} :** carico unitario massimo a trazione sopportato dalla provetta durante una prova di trazione. E' espresso in MPa;

- **Deformazione a trazione ϵ** : incremento in lunghezza per unità della lunghezza iniziale del tratto di misura. E' espresso come un rapporto adimensionale o %. A ciascun tipo di carico unitario (a snervamento, a rottura e massimo) corrisponde una deformazione ϵ ;
- **Modulo di elasticità a trazione $E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$** con $\epsilon_2 = 0,0025$ e $\epsilon_1 = 0,0005$. E' espresso in MPa.

Condizioni delle apparecchiature:

- Velocità di prova: la macchina di prova di trazione deve essere in grado di mantenere la velocità di prova con una certa precisione: per $v < 20 \text{ mm/min}$ tolleranza $\pm 20\%$, per $v \geq 20 \text{ mm/min}$ tolleranza $\pm 10\%$. La velocità di prova selezionata deve dare una velocità di deformazione la più vicina possibile all'1% della lunghezza di misurazione al minuto, quindi varierà da materiali duttili a fragili;
- Morsetti: per serrare la provetta devono essere vincolati alla macchina in modo che l'asse principale coincida con la direzione passante per il loro centro di serraggio. La provetta deve essere tenuta in modo da prevenire un possibile scivolamento nei morsetti senza però rompersi prematuramente in corrispondenza dei tali;
- Indicatore del carico: deve essere in grado di segnalare il carico totale di trazione sopportato dalla provetta serrata nei morsetti;
- Estensimetro: deve essere in grado di determinare la variazione della lunghezza nel tratto utile della provetta in ogni momento della prova con un'accuratezza dell'1%, quindi varia l'utilizzo da materiali duttili a fragili.

Condizioni delle provette:

I metodi vengono applicati nell'uso di provette che possono essere sia stampate alle dimensioni scelte, sia lavorate a macchina (tagliate) a partire da prodotti finiti e semifiniti. Le provette devono essere esenti da torsione e devono avere coppie di superfici parallele mutuamente perpendicolari. Le superfici e i bordi devono essere privi di inclusioni, difetti, infossature superficiali e bave.

Un minimo di 5 provette deve essere sottoposto alla prova (in ciascuna delle direzioni di prova richieste). Dati riguardanti provette che arrivano a rottura fuori dalla zona a lati paralleli, o per le quali si è prodotto uno scivolamento nei morsetti, non devono essere inclusi nell'analisi.

Provetta tipo 1°:

- Lunghezza di misura $L_0 = 50,0 \pm 0,5$
- Larghezza della parte stretta $b_1 = 10,0 \pm 0,2$
- Spessore raccomandato $h = 4,0 \pm 0,2$

Vedi Fig.3.5

4.2.Procedimento

Le velocità di prova e gli estensimetri vanno regolati a seconda del tipo di materiale (duttile o fragile). Per materiali duttili si utilizza una velocità di 50mm/min, per materiali fragili invece di 5mm/min. Per i materiali fragili servono estensimetri più sensibili, cioè

con maggiore grado di precisione rispetto ai materiali duttili, in quanto registrano allungamenti inferiori.

Le provette, prima di essere sottoposte a trazione vanno termostate a 23°C per almeno 48h dallo stampaggio, per permettere una completa cristallizzazione al polimero.

Per ciascun materiale sono sottoposte a trazione almeno 7 provette. Per ciascuna di esse, una volta verificato che i valori di larghezza e spessore misurati (con calibro) rientrano nelle tolleranze della norma, si calcola il loro valore medio, che costituirà l'area iniziale da cui la macchina misurerà il carico unitario a trazione.

Una volta ottenuta la curva di trazione, con i rispettivi valori di sforzo a trazione e allungamento, per ciascun provino dello stesso materiale, si possono rielaborare i dati ricavando la curva di trazione, sempre con i rispettivi valori, per una provetta media.

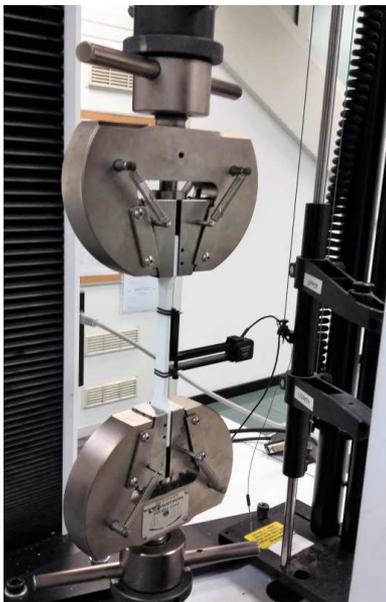


Fig.4.1 macchina per prove di trazione Instron 3366 con cella di carico da 5kN e estensimetri Instron.

4.3.Risultati

Dalla misurazione di ciascun materiale si ottengono **curve σ - ϵ** molto diverse, che si possono distinguere principalmente in base al comportamento duttile o fragile :

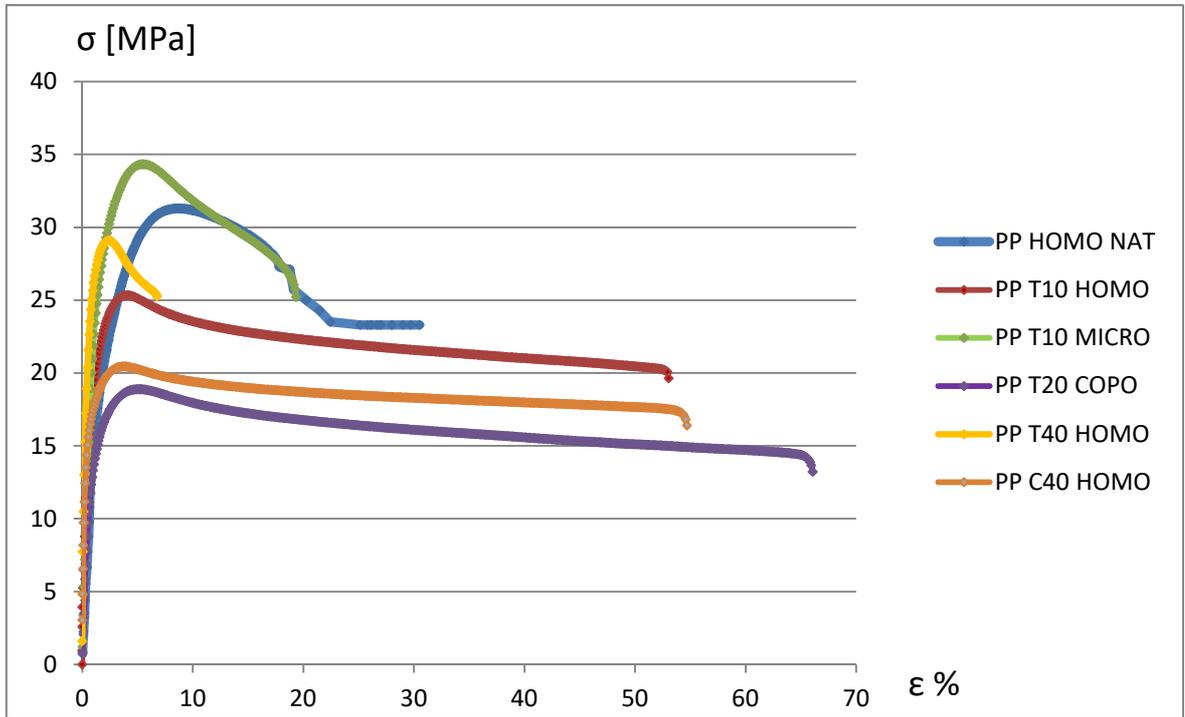


Fig.4.1: curva σ - ϵ PP caricati minerali e non

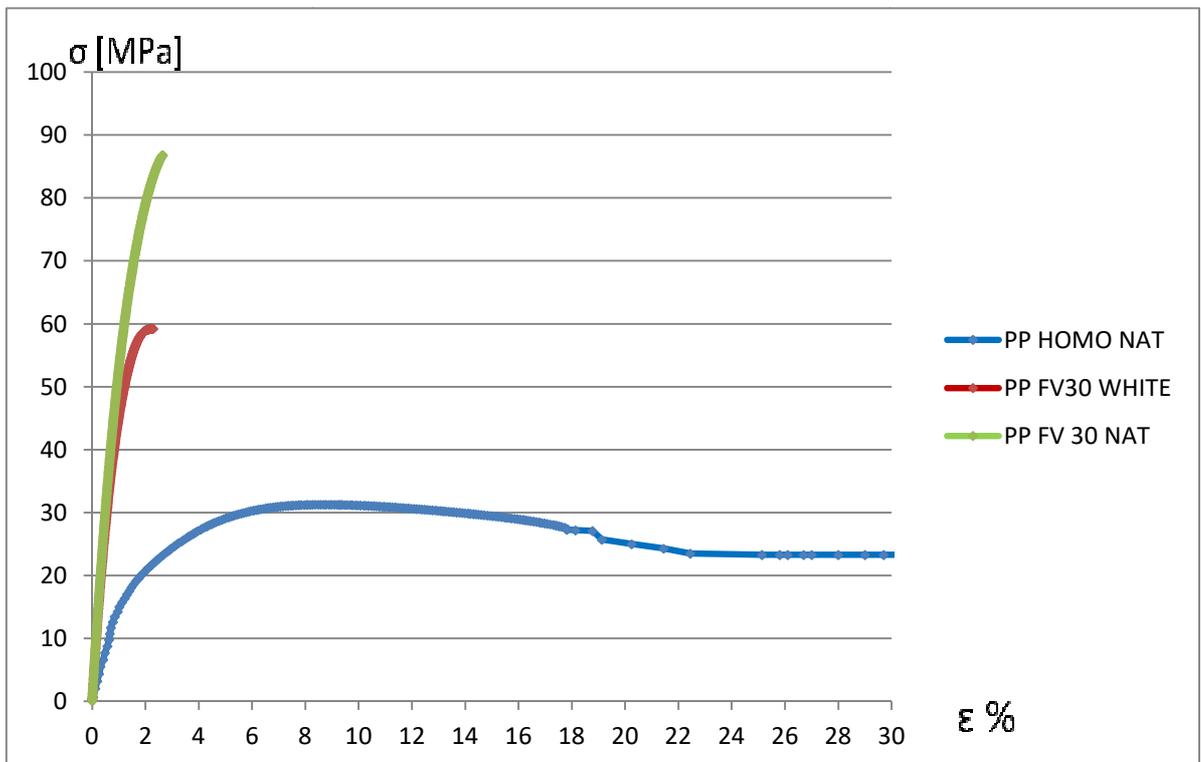


Fig.4.2: curva σ - ϵ PP caricati fibra vetro e non

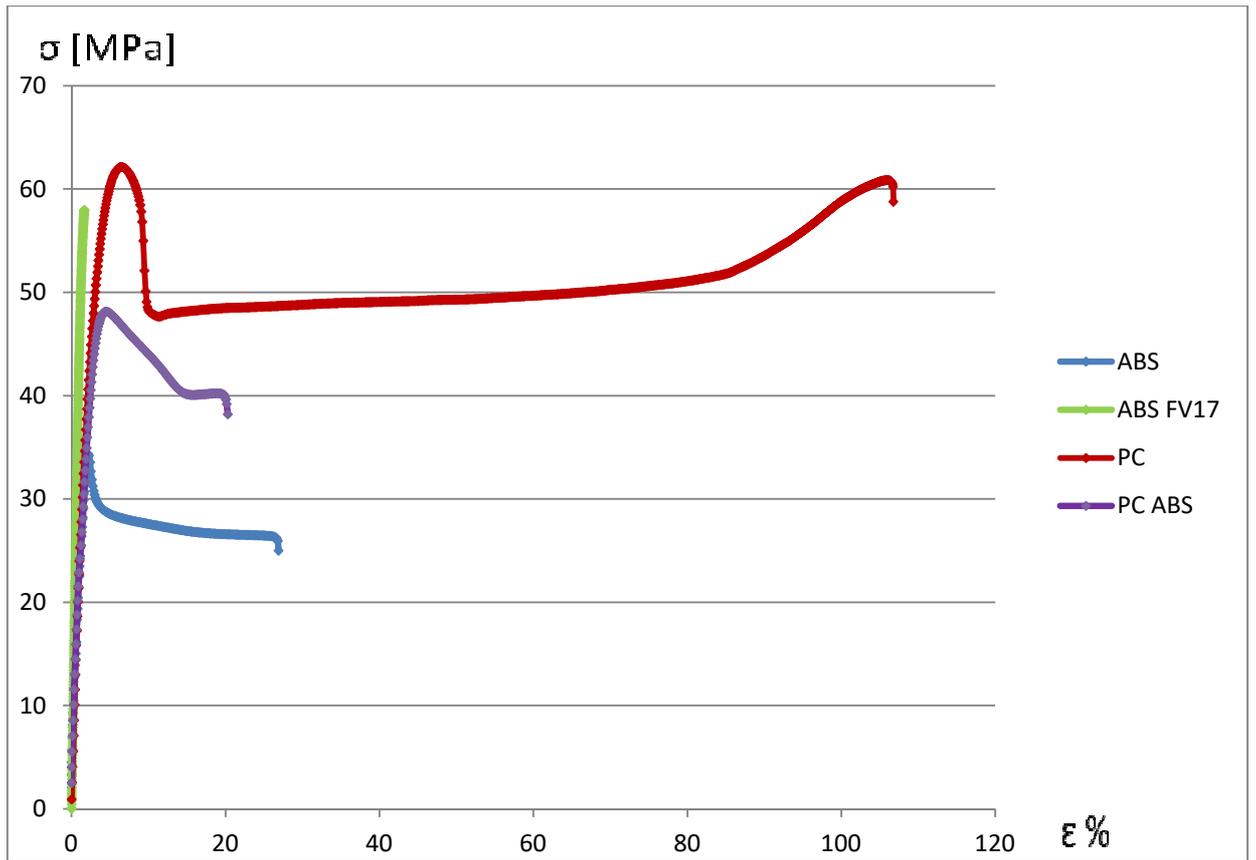


Fig.4.3: curva σ - ϵ ABS caricati e non, PC e blend PC/ABS

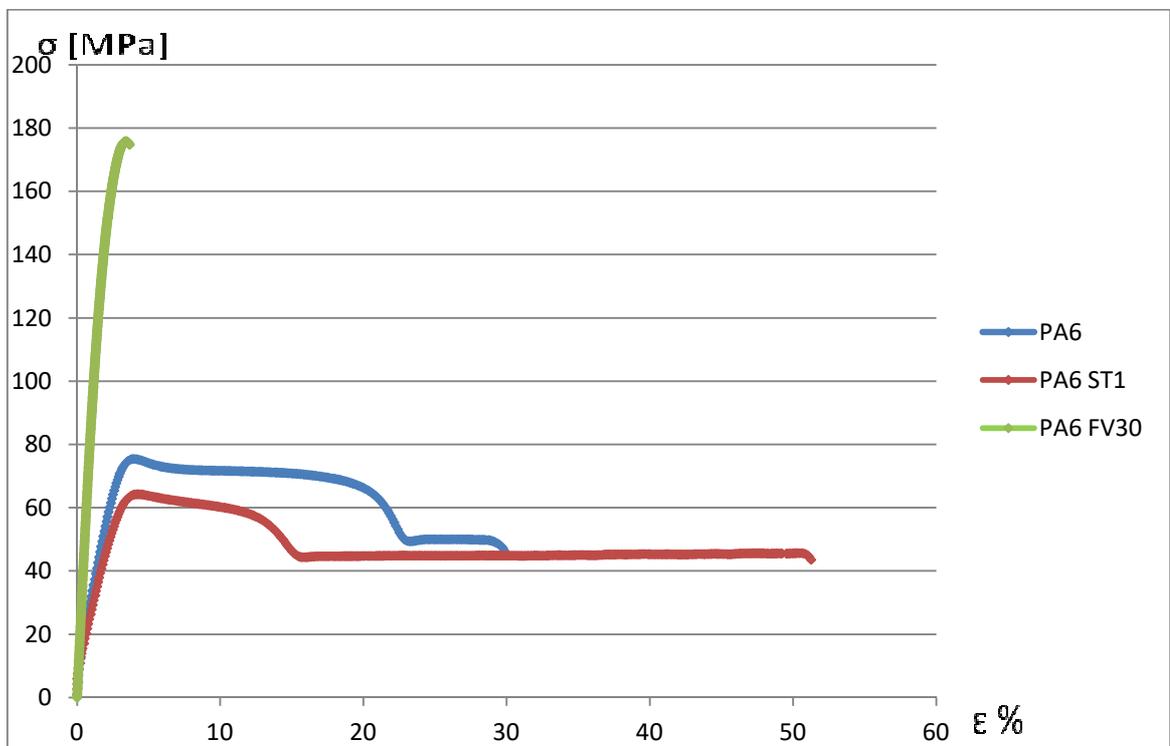


Fig.4.4: curva σ - ϵ PA6 caricati e non

Per ciascuna curva sono stati scelti come grandezze da confrontare:

- la resistenza a trazione (sforzo massimo a trazione),
- la rigidità (modulo elastico),
- la duttilità (allungamento a rottura%),
- la tenacità, che è stata ricavata analiticamente dal metodo dei trapezi, come area sottesa alla curva curve σ - ϵ .

	Sforzo max[MPa]	Modulo elastico[GPa]	Allungamento a snerv. [MPa]	Allungamento a rottura [%]	Tenacità [kJ/mm³]
PP HOMO NAT	31,3	1,85	3,0	37,3	8,32
PP T10 HOMO	25,3	2,27	4,1	53,0	11,60
PP T10 MICRO	34,3	2,91	6,7	25,2	5,76
PP T20 COPO	18,9	1,78	5,1	66,1	10,57
PP T40 HOMO	29,1	3,56	2,4	6,8	1,77
PP C40 HOMO	20,5	3,16	3,8	54,7	10,09
PP FV30 WHITE	59,2	6,05	2,3	2,3	0,97
PP FV30 NAT	86,8	6,46	2,7	2,7	1,52
ABS	34,4	2,14	2,2	26,9	7,26
ABS FV17	58,0	5,04	1,7	1,7	0,59
PC ABS	48,1	2,03	4,5	20,3	8,30
PC	62,1	2,34	6,7	107,6	54,21
PA6	75,5	4,24	4	29,9	18,59
PA6 ST1	64,3	2,43	4,2	51,3	24,59
PA6 FV30	175,9	9,61	3,7	3,7	4,47

Viene inoltre riportato l'allungamento a snervamento%.

4.4.Osservazioni

I risultati delle prove, simili a quelli attesi, mettono in evidenza notevoli differenze tra le famiglie di materiali scelti. I PA6 si confermano i più resistenti a trazione, mentre i PP e gli ABS presentano sforzi massimi discreti.

In generale si può notare come le cariche particellari (talco e carbonato) aumentino sia la resistenza a trazione che il modulo elastico del PP. Tali particelle possono essere di diametro medio di 10-12 μm o 1-2 μm nel caso dei micro-caricati. A parità di contenuto, le micro-cariche risultano più efficaci per rinforzare il polimero in quanto interferiscono meno con la cristallizzazione.

In tutte e tre le famiglie le fibre di rinforzo aumentano le proprietà a trazione poiché esse sono orientate longitudinalmente e poiché le piccole dimensioni delle loro sezioni ($d \approx 4-5 \mu\text{m}$) rendono molto improbabile la presenza di difetti al loro interno. Da notare la notevole differenza tra il PP FV30 bianco e il PP FV30 naturale: il primo presenta proprietà meccaniche inferiori in quanto durante il processo gli ossidi di titanio addetti alla pigmentazione hanno interagito con le fibre di vetro spezzandole. Ciò dimostra come le fibre corte risultino meno resistenti di quelle lunghe.

CAPITOLO 5

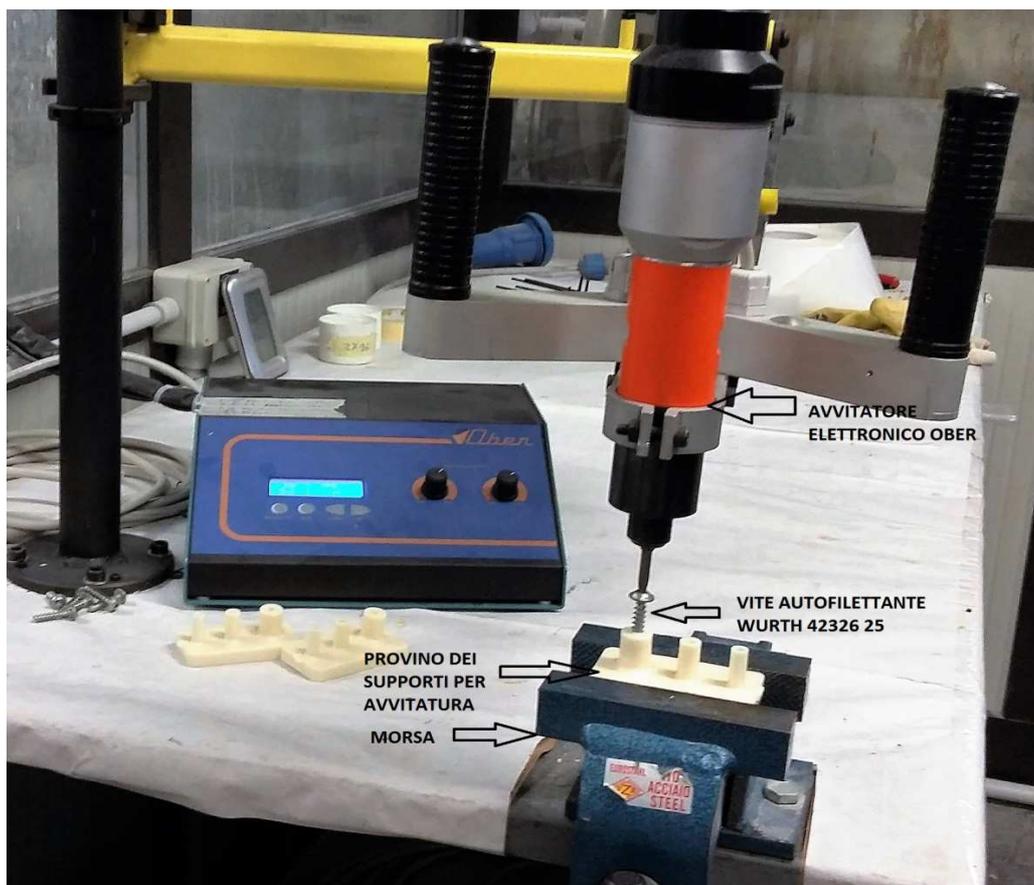
Prove di avvitatura

L'obiettivo finale del lavoro è di ricavare il massimo valore della coppia di serraggio che ciascun materiale può sopportare in fase di avvitatura senza rompersi, cioè la coppia di strappo, e di stabilire che tipo di correlazione le proprietà meccaniche abbiano con esso.

Sono state quindi condotte delle prove di avvitatura sui provini dei supporti forati, stampati nei diversi materiali con la stessa geometria, utilizzando un avvitatore elettronico a controllo di coppia e velocità di rotazione e delle viti autofilettanti delle stesse dimensioni per ogni provino.

Le prove sono state svolte innanzitutto alla stessa velocità di rotazione per tutti i materiali. Poi per un materiale specifico (PP C40 HOMO) le prove sono state svolte a diverse velocità di rotazione e a diverse temperature.

5.1.Strumenti



5.1.1. Avvitatore

E' stato utilizzato un avvitatore elettronico "HQ PRO ®" Ober. Questa macchina permette di controllare con precisione la coppia e la velocità di rotazione.

Esso è servito a fissare le viti autofilettanti sui provini con una definita velocità di rotazione e una definita coppia di serraggio impostate dall'operatore. Se con i valori impostati la vite arriva a fine corsa senza danneggiare il supporto ("sfilettamento" o strappo) significa che il provino in questione ha resistito a tale avvitatura. In base a ciò viene segnalato sul display se i provini PASSANO o NON PASSANO la prova. Non ci sono norme riguardo a tale prova.

Lo strumento è stato posizionato sopra un banco da lavoro e fissato ad esso mediante bulloni.

Sull'estremità dell'avvitatore è montato un inserto torx M25 il quale durante la prova viene posizionato nell'incavo della testa della vite trasmettendo a quest'ultima il moto rotatorio, così che essa possa penetrare il foro del provino stretto da una morsa.

I valori di coppia di serraggio, espressa in Nm, e velocità di rotazione, espressa in rpm, si possono impostare ruotando due cursori affianco al display. I valori sono compresi in due range caratteristici della macchina:

- coppia di serraggio compresa tra 2,5 e 20 Nm;
- velocità di rotazione compresa tra 20 e 180 rpm.

Entrambi i parametri sono controllati dai rispettivi trasduttori durante la corsa della vite.

Lo strumento ha due manopole con i rispettivi comandi alle estremità, atti ad avviare l'avvitatura (sulla manopola di sinistra) e la svitatura (sulla manopola di destra).

5.1.2. Viti

Sono viti autofilettanti Wurth 42326 25 con le seguenti caratteristiche:

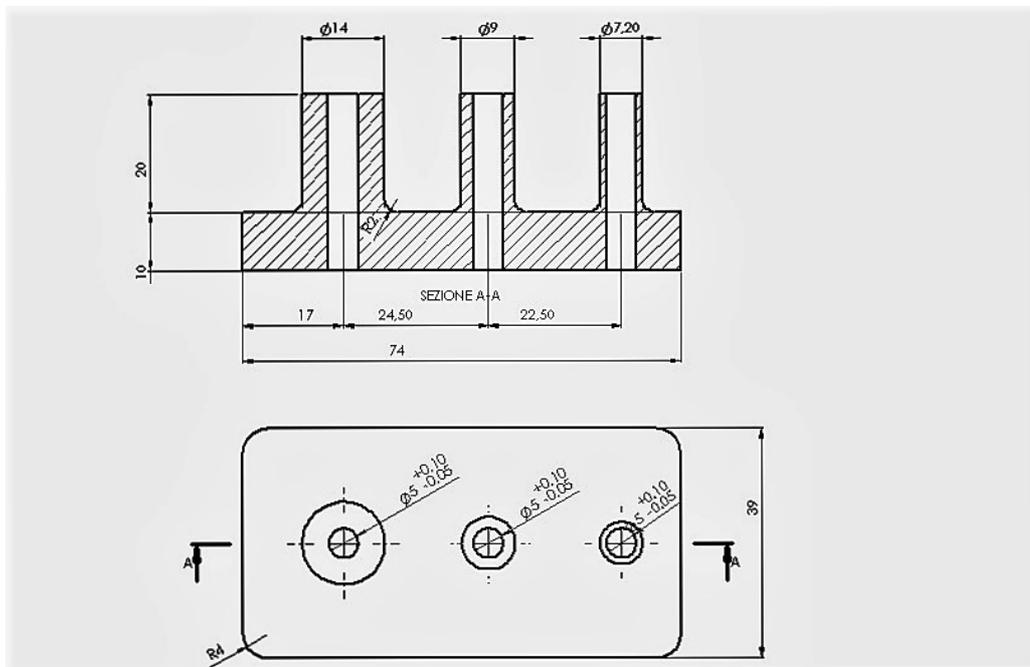
Diametro nominale	6 mm
Lunghezza	25 mm
Diametro testa	12 mm
Altezza testa	3,75 mm
Materiale	Acciaio
Classe avvitamento	di 10,9
Rivestimento	Zincato
Azionamento interno	TX25
Altre normative	WN 1451
Tipo mandrino	Con flangia
Forma testa	Testa tonda con flangia
Lunghezza gambo	3 mm
Passo	2,69 mm
Angolo del filetto	30°

Esse sono state progettate appositamente per le materie plastiche in modo da:

- ridurre le tensioni radiali (con angolo del filetto di 30°) così da ottenere pareti del supporto più sottili possibile e quindi supporti più leggeri e meno costosi;
- ottenere una maggiore superficie di contatto tra il filetto e il materiale, che consente di ottenere un'elevata coppia di strappo;
- facilitare il flusso di materiale riducendo gli sforzi;
- ottenere un maggiore margine tra coppia di installazione e coppia di strappo.

5.1.3.Provini

I provini hanno le seguenti dimensioni con le rispettive tolleranze dimensionali dei fori. Poiché essi determinano la superficie di contatto tra il filetto della vite e il materiale, sono funzionali per una corretta prova di avvitatura.



Affinché ci sia una un corretto contatto tra vite e materiale del supporto, è necessario che il diametro del foro sia $\Phi \cong 0,8d$ con d = diametro della vite, nel nostro caso $d = 6\text{mm}$ (Nota 5.1). Tuttavia è necessario tenere conto che le tolleranze dimensionali cambiano leggermente a seconda del materiale, poiché essi presentano una percentuale di ritiro diversa.

Nota 5.1: Il rapporto tra diametro del foro e diametro nominale della vite fa riferimento al catalogo della Wurth.

5.2.Descrizione del test

Affinché il fissaggio tra vite autofilettante e supporto in plastica risulti sicuro ed efficace è necessario che vi sia un ampio margine fra la coppia di installazione, ovvero il valore della coppia necessaria per portare la testa della vite a contatto con il componente da

accoppiare (cioè necessaria a formare il filetto), e la coppia di strappo, cioè il valore della coppia di serraggio che vanifica l'accoppiamento, rompendo il supporto in plastica.

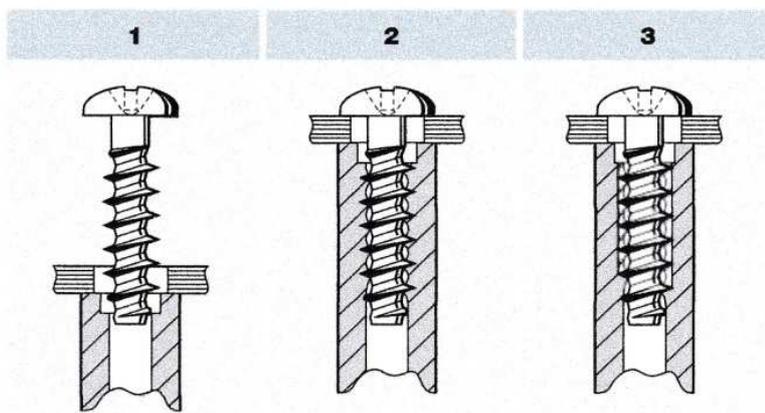
Viene consigliato infatti come valore della coppia di serraggio T:

$$T = T_i + k(T_s - T_i)$$

Con:

- T_i = coppia di di installazione,
- T_s = coppia di strappo,
- k = coefficiente che varia da 0,3 a 0,5.

L'obiettivo di questa parte dell'attività è di determinare la coppia di strappo per ogni provino.



La coppia di strappo dipende da:

1. la forma della vite (per quanto scritto in precedenza);
2. le dimensioni del foro, poiché determinano la superficie di contatto tra vite e materiale del supporto;

3. la velocità di installazione, poiché all'aumentare di essa aumenta la quantità di calore generato. Ciò causa il collassamento della plastica con relativo decadimento del serraggio dell'accoppiamento;
4. la temperatura di partenza, che influenza la risposta del materiale;
5. le caratteristiche del materiale,

Poiché abbiamo svolto le prove a parità di tipo di vite, diametro dei fori (entro le tolleranze misurate) e velocità di installazione, abbiamo potuto verificare come la coppia di strappo vari a seconda del materiale (punto 5) ed in modo meno approfondito come essa vari in funzione di temperatura e velocità di rotazione (punti 3 e 4).

5.3. Avvitatura alla stessa velocità di rotazione

Come in occasione delle prove meccaniche è necessario termostatare i provini dei supporti per l'avvitatura a 23°C per almeno 48h dallo stampaggio.

Per prima cosa è stato scelto il valore di velocità di rotazione comune, adatto a poter confrontare la coppia di strappo di ciascun provino. Tale valore ovviamente deve essere compreso tra 20 e 180 rpm, cioè il range di velocità di rotazione dello strumento. Sulla base di alcune prove su materiali completamente diversi a livello di proprietà meccaniche, è stato scelto un valore di velocità di rotazione che non determinasse valori di coppia di strappo maggiori di 20Nm o minori di 2,5 Nm, cioè fuori dal range di coppia di serraggio dello strumento. Quindi è stata scelta una velocità di rotazione di 140rpm;

A questo punto sono state condotte le prove su ciascun materiale, a parità di tipo di vite, dimensioni del provino (entro le tolleranze misurate), velocità di rotazione, al variare della coppia di serraggio. Poiché durante ogni prova la vite subisce un riscaldamento notevole, sono state utilizzate viti diverse per ciascun provino. Per ogni tipo di materiale sono stati testati in totale 40 provini, circa 4/5 provini per ogni valore di coppia di strappo, con l'obiettivo di ricavare la coppia di strappo media per ciascun materiale dalla seguente procedura sperimentale:

- Per ciascun materiale è stato stabilito un intervallo di coppia all'interno del quale condurre il test partendo da valori abbastanza diversi (circa 2 Nm di differenza) e arrivando progressivamente a convergenza. All'interno dell'intervallo ciascun valore di coppia presenta un certo numero di provini che hanno superato la prova (PASSATI) e un certo numero di provini che invece sono giunti a rottura (NON PASSATI), a seconda della dispersione statistica.
- Sono stati poi definiti:
 - la coppia limite inferiore, cioè il maggiore valore di coppia che non presenta alcun provino giunto a rottura;
 - la coppia limite superiore, cioè il minore valore di coppia che presenta tutti i provini giunti a rottura.

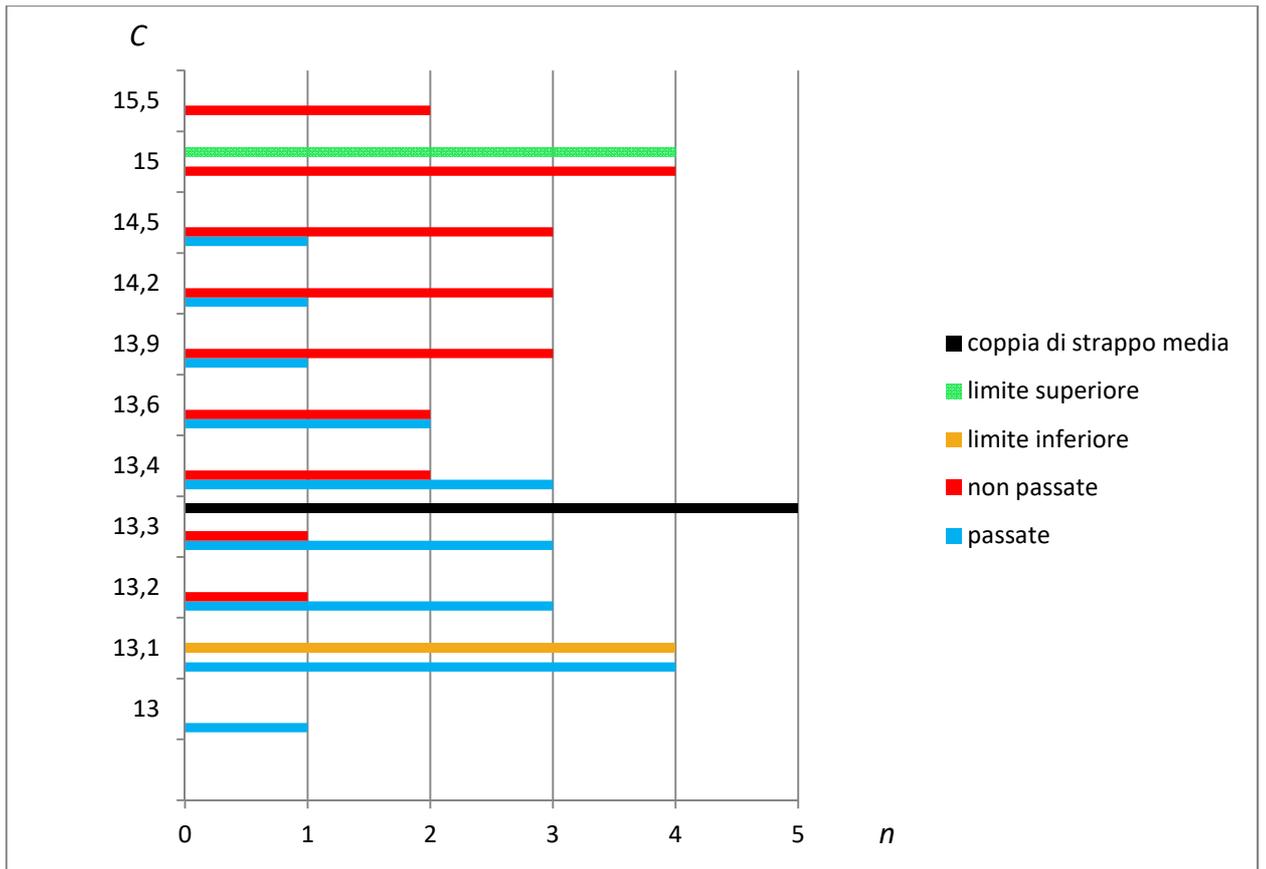


Tabella con risultati del test di avvitatura di PP C40 HOMO

- All'interno dell'intervallo critico compreso tra i valori di coppia limite inferiore e coppia limite superiore si trova la coppia di strappo media, che è stata definita come:

$$C_m = C_{li\ m\ inf} + \frac{1}{n_{tot}} \sum_i n_{pi} (C_i - C_{li\ m\ inf}) \quad (Nota\ 5.1)$$

Con: $C_{li\ m\ inf}$ = coppia limite inferiore

n_p

= numero di provini che hanno superato la prova con coppia C_i

n_{tot} = numero totale di provini nell'intervallo critico

Nota 5.1: si tratta di una definizione assegnata in modo che C_m accetti una frazione di provini NON PASSATI se a valori superiori di C_m ci sono anche significativi eventi di provini PASSATI.

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

- L'algoritmo descritto per trovare la coppia di strappo media è stato applicato per ogni materiale sottoposto al test, e sono stati ottenuti i seguenti risultati:

materiali	coppia di strappo [Nm]
PP HOMO NAT	13,9
PP T10 HOMO	12,5
PP T10 MICRO	14,7
PP T20 COPO	10,4
PP T40 HOMO	18,3
PP C40 HOMO	13,3
PP FV30 WHITE	12,2
PP FV30 NAT	16,7
ABS	15,7
ABS FV17	18,0
PC/ABS	20,0
PA6	17,9
PA6 ST1	18,1
PA6 FV30	19,8

Per il PC non è stato possibile misurare la coppia di strappo in queste condizioni, poiché durante l'avvitatura la vite è giunta a rottura.

5.4. Avvitatura del PP C40 a diverse velocità di rotazione e temperature

Per il PP C40 HOMO, uno dei compositi molto utilizzati nel settore dell'elettrodomestico, sono state effettuate le prove a diverse velocità di rotazione e temperature per studiare come queste due variabili condizionino la resistenza del materiale e quindi la coppia di strappo.

Utilizzando sempre la stessa tipologia di vite e considerando che i fori dei provini hanno sempre le stesse dimensioni, sono state effettuate:

- delle prove a diverse velocità di rotazione (40; 100; 140 rpm),
- delle prove a diverse temperature (4; 23; 40°C) termostatando i provini opportunamente fino al momento del test. Ovviamente durante il test tale temperatura non viene mantenuta.

	n= 40rpm	n= 100rpm	n= 140rpm
T= 4°C	fuoriscalda	fuoriscalda	16,1 Nm
T= 23°C	fuoriscalda	20,0 Nm	13,3 Nm
T= 40°C	fuoriscalda	18,5 Nm	11,8 Nm

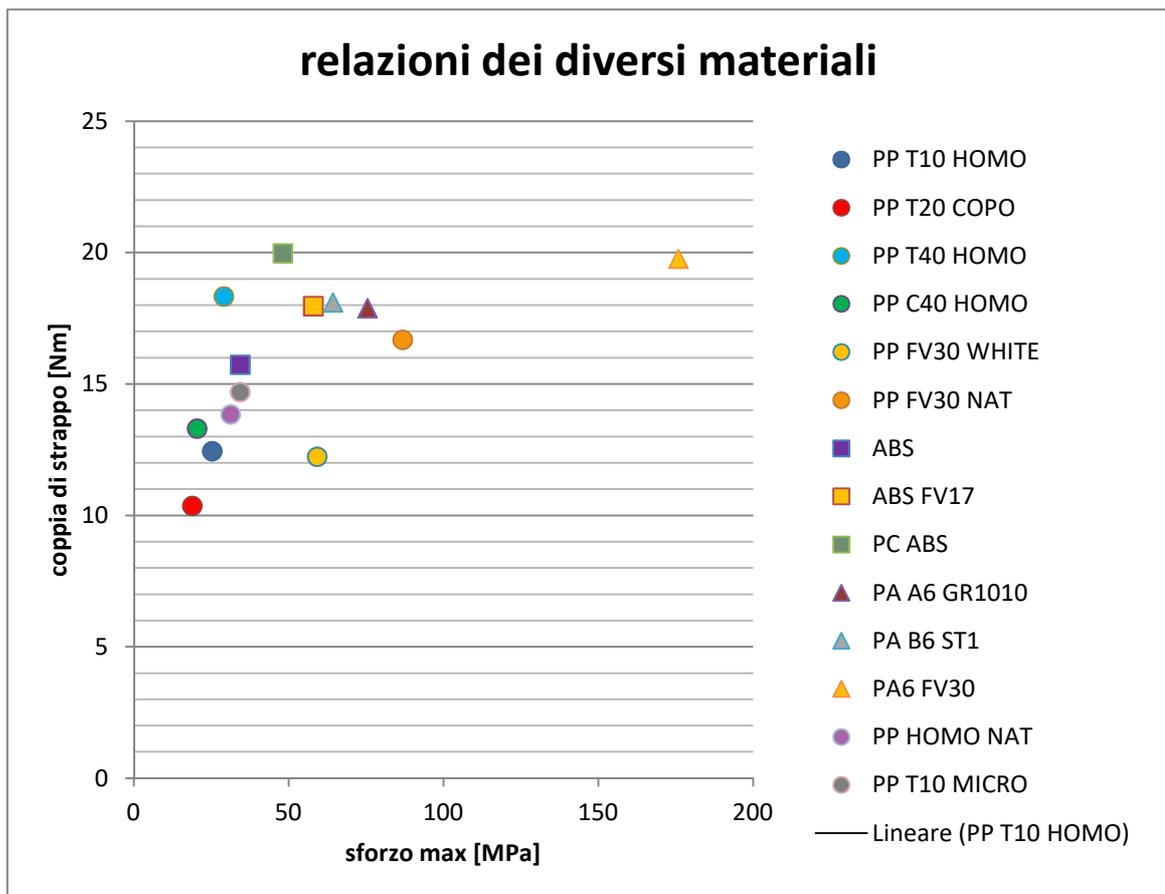
Per calcolare la coppia di strappo è stato utilizzato lo stesso algoritmo spiegato nella prova di avvitatura alla stessa velocità di rotazione (5.3).

In questo caso poiché al diminuire sia della velocità di rotazione che della temperatura la resistenza del materiale aumenta, alcune prove danno come risultato una coppia di strappo fuori scala, cioè maggiore di 20 Nm, che è il limite di coppia misurato dall'avvitatore elettronico.

CAPITOLO 6

Relazioni tra avvitatura e proprietà meccaniche

Poiché di ogni materiale considerato durante l'attività si conoscono sia le proprietà meccaniche a trazione che le coppie di strappo misurate durante il test di avvitatura, si possono studiare ora i tipi di relazione che ci sono tra le varie proprietà e la coppia di strappo, per vedere se c'è un eventuale relazione di linearità tra le variabili in questione.

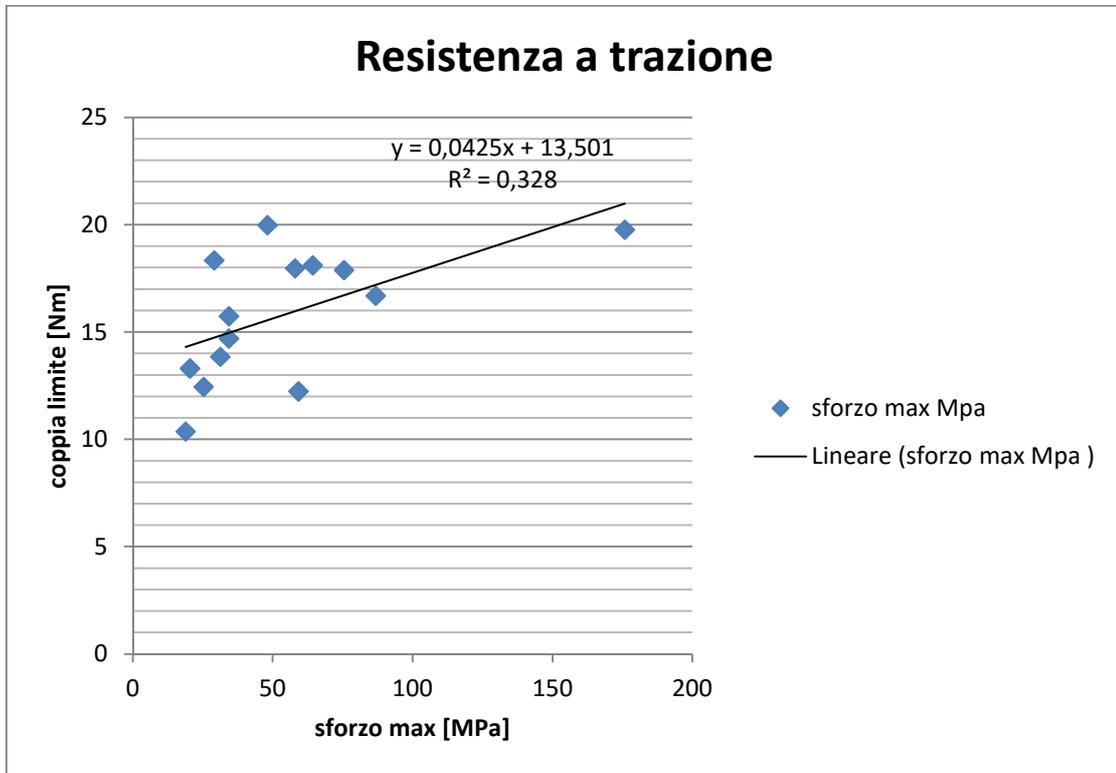


6.1. Correlazioni e regressioni lineari

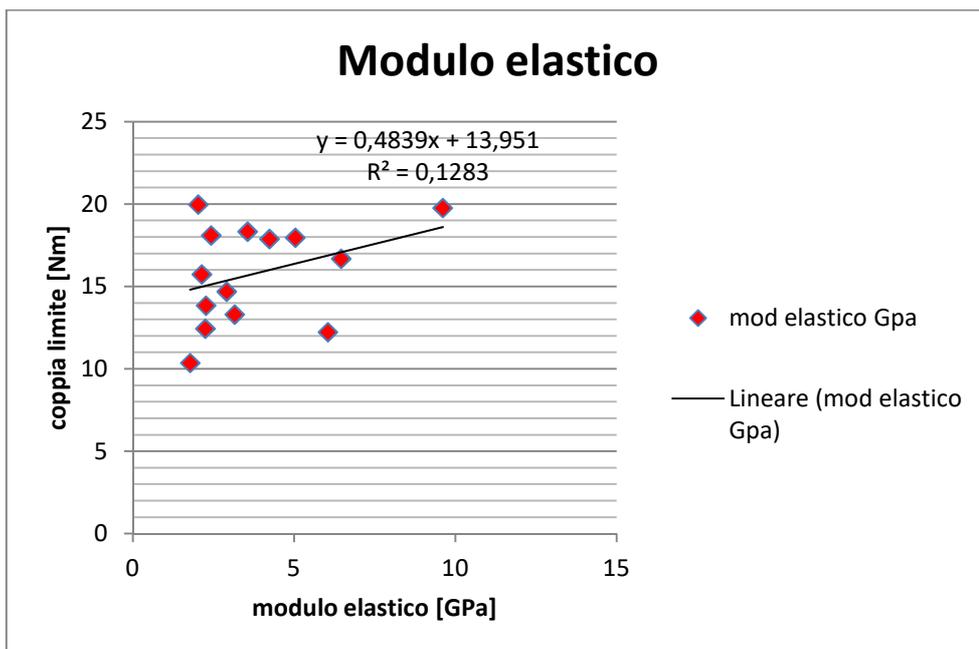
Perciò si può utilizzare:

- **l'indice di correlazione di Pearson**, definito come la covarianza delle variabili X e Y divisa per il prodotto delle deviazioni standard delle due variabili:
$$R = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$
 dove y = coppia di strappo del materiale, x = proprietà meccaniche del materiale;
- **la regressione lineare**, che rappresenta un metodo di stima del valore atteso condizionato di una variabile dipendente, nel caso specifico la coppia di strappo del materiale, dati i valori di altre variabili indipendenti, nel caso specifico le proprietà meccaniche a trazione.

Entrambi i metodi sono stati utilizzati direttamente in Excel, inserendo nell'asse delle ascisse ciascuna proprietà meccanica e nell'asse delle ordinate la coppia di strappo misurata.

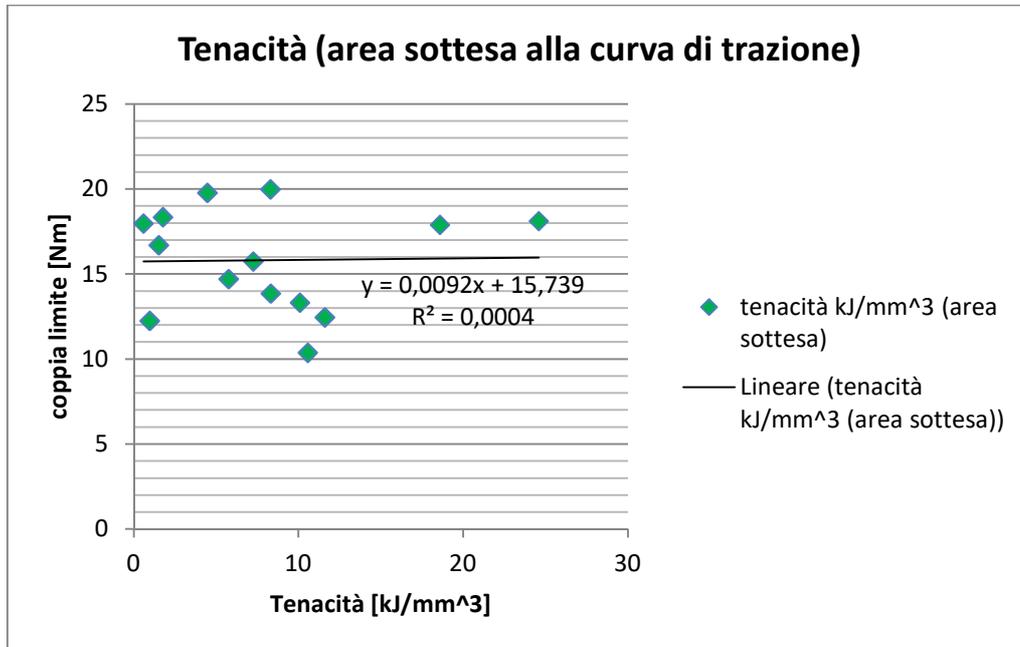


Risulta $R = 0,57$ quindi si ha una correlazione moderata tra resistenza a trazione (intesa come sforzo massimo a trazione) e coppia di strappo.



Risulta $R = 0,32$ quindi si ha una correlazione debole tra modulo elastico e coppia di strappo. Tuttavia per quanto riguarda tale grandezza è necessario fare attenzione a come essa possa compromettere l'installazione della vite. (Nota 6.1)

Nota 6.1: materiali con modulo elastico (sia a trazione che a flessione) elevato sono troppo duri per garantire la formatura del filetto. (Da catalogo Stanley: Plastics with a high flexural modulus, including thermosets, are too stiff for thread forming).



Risulta $R = 0,01$ quindi non si ha alcuna correlazione tra tenacità e coppia di strappo.

Come si può notare dai dati solamente la resistenza a trazione presenta una relazione con la coppia di strappo da tenere in considerazione.

6.2.Osservazioni sulle relazioni

E'importante notare come i risultati dei test di avvitatura non dipendano esclusivamente dalle proprietà meccaniche a trazione, ma probabilmente anche da altre proprietà dei materiali.

L'attrito tra vite in rotazione e supporto genera un aumento di temperatura, che in corrispondenza dei fori dei provini è stato registrato da una termocoppia intorno ai 45-50°C. Tale aumento di temperatura può incidere in modo diverso sul comportamento dei polimeri. Considerando dunque che i provini sono stati sottoposti a stress sia meccanico che termico, i materiali più performanti sono stati il PC/ABS e il PP T40 HOMO.

Osservando i valori del grafico della resistenza a trazione con la coppia di strappo, i valori che si discostano maggiormente dalla retta di regressione sono quelli relativi ai materiali caricati con le fibre di vetro. Depurando i dati da questi valori si ottiene una maggiore correlazione tra resistenza a trazione e coppia di strappo.

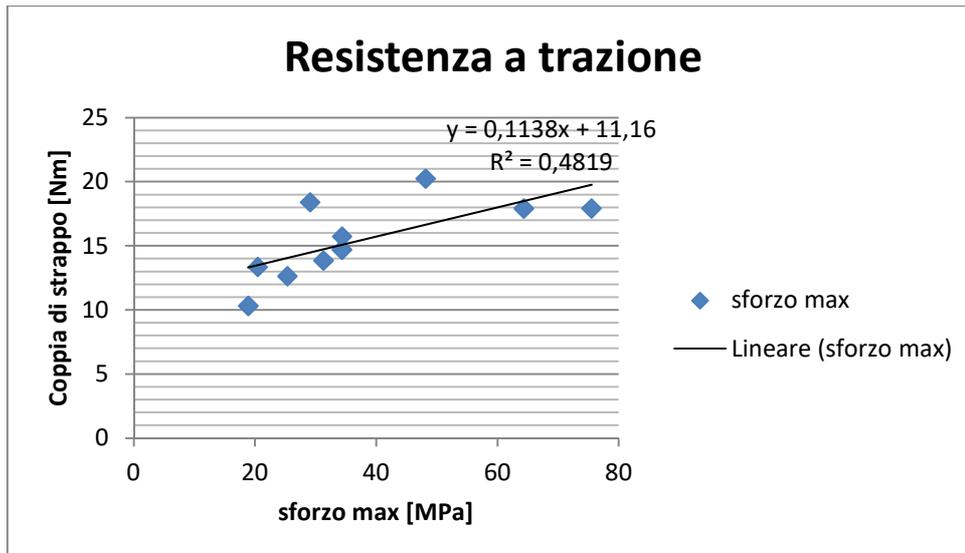


Grafico della relazione tra resistenza a trazione e coppia di strappo per polimeri senza fibre di vetro.

Da questi dati si ottiene un indice di correlazione $R = 0,69$. Questo valore è prossimo a una buona correlazione.

Il confronto tra la correlazione con e senza polimeri caricati con fibre di vetro mette in evidenza come essi siano i materiali più critici tra quelli analizzati: presentano una bassa coppia di strappo rispetto alla resistenza a trazione. Per valutare la causa di tale comportamento è necessario tenere conto della differenza degli stati tensionali tra le due prove:

- 1) la prova di trazione genera uno stato di tensione monoassiale,
- 2) la prova di avvitatura genera uno stato di tensione complesso, con componenti di tensioni sia assiali che tangenziali indotte nel provino dalla rotazione della vite.

I compositi rinforzati con fibre, a seconda di quanto esse siano lunghe e allineate, presentano un'elevata resistenza ai carichi applicati longitudinalmente ad esse (come nel caso della prova di trazione) e una bassa resistenza ai carichi applicati in altre direzioni.

Di conseguenza il diverso comportamento dei polimeri caricati con fibre di vetro durante la prova di avvitatura, può essere attribuito alla loro forte anisotropia, dovuta alla distribuzione e all'orientamento preferenziale delle fibre di vetro all'interno della matrice polimerica nei provini dei supporti per l'avvitatura durante la fase di stampaggio ad iniezione. (Nota 6.1)

Nota 6.1:” Il processo di stampaggio ad iniezione determina un orientamento preferenziale delle fibre di rinforzo, in quanto queste ultime vengono trascinate dal polimero fuso durante il riempimento dello stampo ed opportunamente orientate. Il polimero fuso può infatti essere assimilato a un fluido a elevata viscosità: quando fluisce all’interno dello stampo si presentano i tipici profili di velocità a elevato gradiente in prossimità delle pareti dello stampo. In questa zona, detta shell, le fibre tendono ad allinearsi con il vettore della velocità assunta dal fluido[...]. Viceversa, lontano dalle pareti dello stampo (quindi in particolare nella zona centrale, detta core), dove le velocità tendono a raggiungere una distribuzione uniforme, le fibre tendono a disporsi perpendicolarmente al vettore velocità. In generale, lo spessore relativo di questi due strati dipende da:

- la forma dello stampo,
- lo spessore del pezzo stampato,
- le condizioni di stampaggio (temperature e velocità). “

Da: A. Bernasconi et al., *Frattura ed Integrità Strutturale, Analisi dell’anisotropia microstrutturale in materiali compositi rinforzati con fibre corte* .

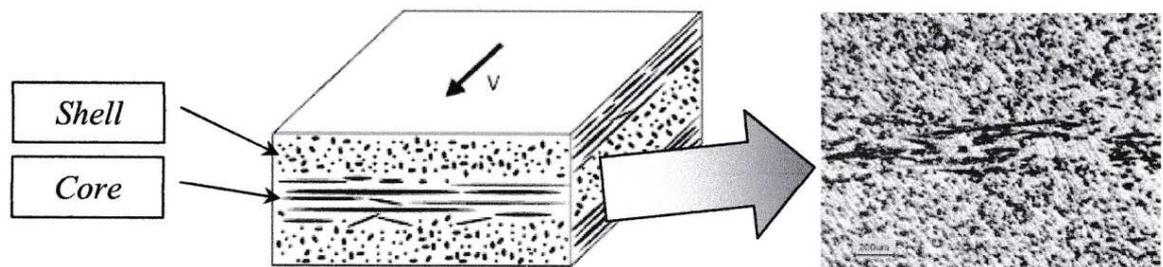


Fig.6.1: Orientamento delle fibre durante lo stampaggio ad iniezione: schema della disposizione tipica delle fibre rispetto al vettore velocità avanzamento locale del flusso di fuso (a sinistra), sezione trasversale di una lastra in PA6 rinforzata con il 30% di fibre di vetro (a destra; fonte: Laboratori del Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano).

Risultano invece molto più sicuri in termini di tenuta in fase di avvitatura i polimeri a rinforzo particellare, in particolare i PP caricati con talco. La buona dispersione delle particelle di talco all’interno della matrice polimerica garantisce infatti sia una buona isotropia che una buona resistenza a caldo, di conseguenza una buona resistenza alla prova di avvitatura.

Conclusioni

Durante quest'attività sperimentale sono state studiate principalmente le tipologie di relazioni tra le proprietà meccaniche dei compound e la loro resistenza al test di avvitatura, effettuato alle stesse condizioni di: tipo di vite, dimensione del foro (entro le tolleranze misurate), velocità di rotazione, temperatura. In generale è stato verificato che elevati carichi di snervamento garantiscono buone coppie massime di serraggio (ad eccezione dei compositi con fibre di vetro).

Inoltre è stato verificato come le performance dei materiali dipendano dalle condizioni di prova (nel caso specifico del PP C40 HOMO): all'aumentare della temperatura e della velocità di rotazione della vite la coppia di serraggio massima sopportata dal materiale (coppia di strappo) diminuisce.

Un fattore che influenza la prove di avvitatura e che non abbiamo potuto controllare con accurata precisione è il rapporto tra il diametri dei fori dei provini sottoposti al test e il diametro nominale della vite. Tale rapporto varia da materiale a materiale sia perché durante la solidificazione i polimeri mostrano diverse entità di ritiro, sia perché durante la prova di avvitatura essi dilatano in modo diverso, definendo superfici di contatto tra vite e supporto leggermente diverse.

Poiché nel corso dell'attività ci siamo limitati a porre delle tolleranze dimensionali piuttosto ampie (-0,05;+0,10), riportiamo in seguito le dimensioni dei fori, in funzione del diametro nominale della vite, consigliate da Wurth e Stanley in fase di progettazione a seconda del polimero termoplastico.

materiale	Diametro del foro del supporto
PP	0,7d
ABS	0,8d
PA6	0,75d
PA6 FV30	0,8d

Con d = diametro nominale della vite.

Con un approfondimento della nostra esperienza in tal senso si potrebbe dimostrare come i fori dei componenti da assemblare e la tipologia di vite andrebbero progettati in funzione del materiale e non scelti a priori.

La nostra attività sperimentale si sta ampliando con lo studio di altre proprietà dei materiali alla ricerca di altre possibili correlazioni. Una di queste proprietà è la durezza.

Bibliografia

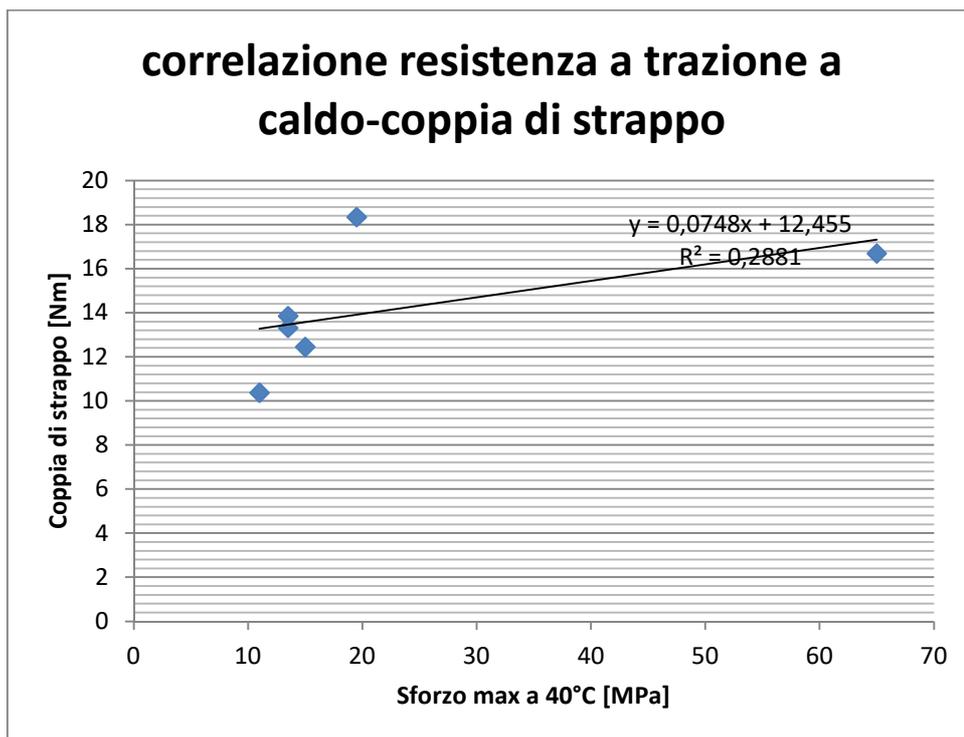
- Bernardo Enrico, Scarinci Giovanni, 2010, “Lezioni del corso di Scienza e Tecnologia dei Materiali” per Ingegneria Meccanica e Meccatronica
- Kalpakjian Serope, R.Smids Steven, 2014, Pearson Italia Milano-Torino, “Tecnologia Meccanica”
- Centro europeo sviluppo materie plastiche (CESAP), slide “Proprietà delle famiglie polimeriche”
- Giorgio Bertacchi, “Manuale dello stampaggio progettato”
- Wurth, “Direct screwing into plastic and metals”
- Stanley engineered fastening, “Engineered Threaded Fasteners for Plastics”
- *A. Bernasconi et al., Frattura ed Integrità Strutturale, Analisi dell'anisotropia microstrutturale in materiali compositi rinforzati con fibre corte*

Appendice

Poiché durante l'esperienza non è stato possibile eseguire le prove di trazione in temperatura prossima a quella di esercizio (cioè quella misurata con la termocoppia in corrispondenza del foro del provino al termine della penetrazione della vite), vengono riportati alcuni valori della resistenza a trazione di compound a base di polipropilene a 40°C:

	Sforzo max [MPa] a T=40°C
PP HOMO NAT	13,5
PP T10 HOMO	15
PP T20 COPO	11
PP T40 HOMO	19,5
PP C40 HOMO	13,5
PP FV30 NAT	65

Provando a correlare le proprietà a trazione a caldo con la coppia di strappo misurata in fase di avvvitatura a 140rpm si ottiene il seguente grafico:



Anche in questo caso si può notare come la coppia di strappo del PP FV30 (bassa rispetto alle proprietà meccaniche) abbassi l'indice di correlazione $R=0,55$.