

POLITECNICO DI TORINO

ANNO ACCADEMICO 2018/2019

Corso Di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale



INVECCHIAMENTO ACCELERATO DEL POLIPROPILENE CARICATO CON TALCO

Relatore:

Prof. Belingardi Giovanni

Candidato:

Baldassarre Gabriele

Luglio 2019

Sommario

1. INTRODUZIONE	5
2. CONCETTI TEORICI	6
2.1. Definizioni e classificazione polimeri	6
2.1.1. Monomeri, macromolecole, polimeri e plastiche.	6
2.1.2. Omopolimeri e copolimeri.....	7
2.1.3. Comportamento dei polimeri al variare della temperatura.....	8
2.1.4. Classificazione in base alla struttura molecolare.	9
2.1.5. Classificazione in base al loro stato di aggregazione.....	10
2.2. I principali additivi	13
2.3. Degradazione dei polimeri.....	15
2.3.1. Degradazione causata dai raggi UV.....	17
2.4. Polimeri nel settore automotive.....	21
2.4.1. Storia dei polimeri nell'industria automobilistica e sviluppi futuri	21
2.4.2. Polimeri attualmente utilizzati nel settore automobilistico.....	23
2.4.3. Principali cariche/additivi nel settore automotive	24
3. POLIMERI ANALIZZATI	26
3.1. Il polipropilene	26
3.1.1. Copolimeri etilene-propene random (EP-RACOs)	28
3.1.2. Copolimeri ad impatto in PP/copolimeri eterofasici (EP-HECOs)/TPO.....	29
3.2. Il talco come additivo minerale per il polipropilene	31
4. METODI SPERIMENTALI	34
4.1. Piano prove e reperimento provini.....	34
4.2. Banco di prova per invecchiamento accelerato agli UV	35
4.3. Test sperimentali	40
4.3.1. Misura del modulo elastico flessionale in modo non distruttivo	40
4.3.2. Prova di trazione	44
4.3.3. Test di resilienza	46
4.3.4. Calcolo del fattore di smorzamento.....	48
4.3.5. Misura di densità	51
4.3.6. Resistenza al fuoco	51
5. ELABORAZIONE DEI DATI E CALCOLO DEI PARAMETRI	53
5.1. Polipropilene "puro"	53
5.2. Polipropilene con talco al 10%.....	69
5.3. Polipropilene con talco al 30%.....	86

6.	CONFRONTI E CONCLUSIONI	103
6.1.	Modulo elastico a trazione	103
6.2.	Modulo elastico a flessione	105
6.3.	Energia assorbita a impatto.....	107
6.4.	Densità	109
6.5.	Fattore di smorzamento	111
6.6.	Velocità di combustione	113
6.7.	Pro e contro nell'utilizzo del talco	114
6.8.	Progetti futuri.....	114
7.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	115
8.	RINGRAZIAMENTI	116

1. INTRODUZIONE

Le plastiche e i polimeri in generale, sono tra i materiali più utilizzati in qualsiasi ambito, sia esso ingegneristico o no. Le moderne tecnologie permettono, infatti, di produrre un'ampia varietà di polimeri modificando e combinando insieme più materiali, anche di origine diversa (minerali, vitrei, resine), al fine di ottenere caratteristiche e performance che il monomero puro non potrebbe mai raggiungere; questo ampio range di variabilità rende tali materiali estremamente versatili e, quindi, capaci di essere adoperati e adattati in svariati contesti.

In particolare, nell'ambito automotive, i polimeri ricoprono un ruolo fondamentale costituendo difatti circa il 30% della massa totale di una berlina, equivalente a 300 kg.

Tra i 13 diversi polimeri impiegati nell'industria automobilistica, il più diffuso è senza dubbio il polipropilene; viene, infatti, utilizzato in svariate applicazioni, quali: scudo dei paraurti, plance, rivestimenti montanti, pannelli e rivestimenti interni, contenitori per componenti elettrici e schede elettroniche, passaruota, etc.

Perché preferire il polipropilene piuttosto che un altro polimero? È solo una questione di costi? Quali caratteristiche meccaniche e funzionali lo rendono il più diffuso?

Un'ulteriore curiosità che ha motivato l'approfondimento e l'analisi di tale materiale è sorta dall'aver notato che, nella maggior parte dei casi, al polipropilene si aggiunge una carica minerale di talco in diverse percentuali volumetriche. Questo, ha portato ad analizzare come la presenza di talco influisce sulle principali proprietà meccaniche del polipropilene.

È noto, inoltre, che i polimeri si deteriorano e perdono le loro proprietà meccaniche con il passare del tempo, soprattutto se esposti agli agenti atmosferici e alla radiazione solare.

A fronte di questo, altri quesiti scaturiti sono: tali polimeri riescono ad assolvere le loro funzioni anche dopo anni di utilizzo? Può la presenza del talco influenzare in qualche modo l'invecchiamento e, quindi, il decadimento delle proprietà meccaniche?

Lo scopo di questo lavoro è stato, quindi, quello di fornire una risposta a questi dubbi e curiosità, pur non essendoci alla base una grande esperienza personale nel campo dei materiali polimerici.

La prima parte dell'elaborato è un excursus sui polimeri in genere e sul perché si sono diffusi nel settore automobilistico, per poi analizzare nel dettaglio le caratteristiche principali che rendono vincente il polipropilene.

Si è proseguito nella spiegazione della fisica che è alla base dell'invecchiamento chimico, provocato dai raggi UV, illustrando poi tutte le procedure sperimentali utilizzate, al fine di misurare le variazioni delle principali grandezze meccaniche provocate da tale fenomeno. I risultati verranno illustrati mediante grafici e tabelle riportati nel capitolo 5, per poi essere analizzati, confrontati e commentati nelle conclusioni.

2. CONCETTI TEORICI

2.1. Definizioni e classificazione polimeri

2.1.1. Monomeri, macromolecole, polimeri e plastiche.

Per poter giungere in modo più chiaro e lineare alla definizione di materie plastiche è bene iniziare definendo il concetto di monomero, polimero e di unità ripetitiva.

In chimica col termine **monomero** si è soliti identificare una molecola semplice dotata di gruppi funzionali tali da renderla in grado di combinarsi ricorsivamente con altre molecole (identiche a sé o reattivamente complementari a sé) al fine di formare macromolecole. Un esempio di monomero è l'etilene:

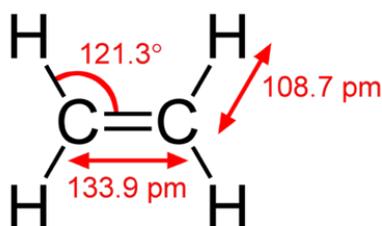


Figura 1: Formula di struttura dell'etilene.

Una **macromolecola**, è una molecola di dimensioni molto grandi e di peso molecolare molto elevato. Le macromolecole sono comuni nei sistemi viventi ma comprendono anche i polimeri sintetici e artificiali. Secondo la IUPAC il termine macromolecola va utilizzato esclusivamente per indicare molecole singole di grandi dimensioni, mentre il termine polimero identifica una sostanza composta da più macromolecole.

Si può difatti, definire il **polimero** come una molecola costituita da un gran numero di gruppi molecolari (detti unità ripetitive) uguali o diversi tra loro uniti "a catena" mediante la ripetizione dello stesso legame, generalmente di tipo covalente. Un esempio possiamo vederlo nel Polietilene (Figura 2) il cui monomero è l'etilene raffigurato precedentemente (Figura 1):

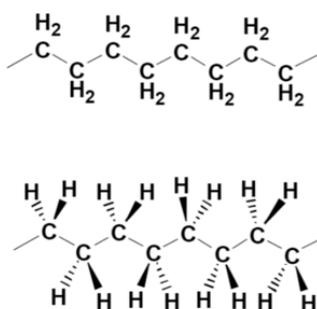


Figura 2: Struttura del polietilene (PE).

In generale si tende a confondere il monomero con l'unità ripetitiva, ma i due termini si riferiscono a due situazioni differenti, infatti **un'unità ripetitiva** è semplicemente una parte di una molecola o macromolecola, mentre un monomero è, come definito precedentemente, una molecola semplice dotata di gruppi funzionali.

Per **plastica** si intende qualsiasi materiale appartenente ad un gruppo ampio e variegato formato in tutto o in parte da combinazioni di carbonio con ossigeno, azoto, idrogeno e/o altri elementi organici o inorganici; essendo sempre presenti atomi di carbonio le materie plastiche sono considerate organiche. Tali materiali hanno un elevato peso molecolare poiché sono costituiti da catene molto lunghe dette appunto macromolecole che ne determinano in modo essenziale il comportamento e le caratteristiche. Un esempio concreto, di come la lunghezza delle catene influenzi le proprietà di un polimero, possiamo

trovarlo nella temperatura di fusione o di rammollimento; a temperatura ambiente, infatti, lo stato di aggregazione dei polimeri varia come segue:

- catene corte (dell'ordine di 10^2 g/mol) sono allo stato liquido o gassoso;
- catene con pesi dell'ordine di 10^3 g/mol sono solidi cerosi o resine morbide;
- catene con pesi superiori a 10^4 g/mol sono solidi e sono anche detti alti polimeri.

Le plastiche possono essere costituite o da polimeri puri oppure miscelati con additivi o cariche varie (aspetto che verrà ripreso successivamente).

2.1.2. Omopolimeri e copolimeri

Questa ulteriore suddivisione è comoda per capire da quante unità ripetitive è composto il polimero in questione:

- Omopolimero: è il polimero più semplice ottenuto dalla ripetizione della stessa unità ripetitiva lungo tutta la sua struttura. Un esempio pratico è il polipropilene ottenuto infatti dalla ripetizione nello spazio del gruppo $(C_3H_6)_n$:

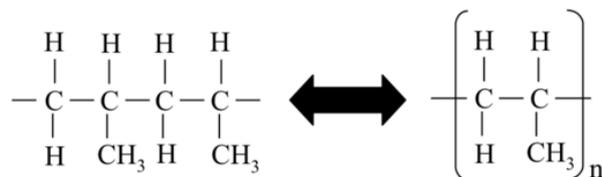


Figura 3: Polipropilene (sinistra). Unità ripetitiva del polipropilene (destra).

- Copolimero: è un polimero formato da due o più unità ripetitive nella sua struttura molecolare. Questa tipologia di materiali è stata scoperta dai chimici e dagli scienziati al fine di ottenere materiali economici e facili da sintetizzare ma che allo stesso tempo, avessero proprietà migliori di quelle offerte dal semplice omopolimero. Un esempio ben noto di tale tipologia è l'ABS (Acrylonitrile-butadiene-styrene), ottenuto dalla ripetizione nello spazio delle unità fondamentali del polipropilene e dell'etilene:

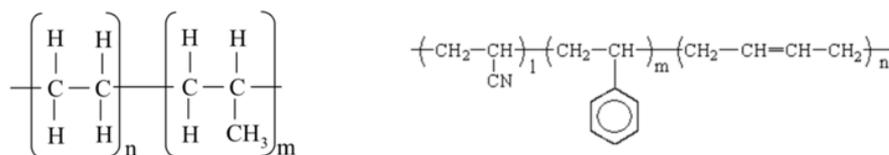


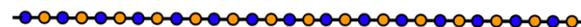
Figura 4: Etilene e polipropilene (sinistra). Struttura ABS (destra).

In base al processo di polimerizzazione e al tipo di unità ripetitiva si possono ottenere differenti configurazioni della catena polimerica. Le possibili strutture sono le seguenti:

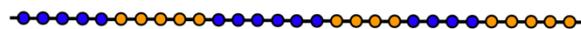
COPOLIMERO RANDOM:



COPOLIMERO ALTERNATO:



COPOLIMERO A BLOCCHI:



COPOLIMERO INNESTATO
O GRAFT:



Figura 5: Possibili configurazioni delle catene polimeriche.

2.1.3. Comportamento dei polimeri al variare della temperatura.

I materiali polimerici puri, ovvero quelli che non contengono additivi, si dividono in:

- **termoplastici:** acquistano malleabilità, cioè rammolliscono, sotto l'azione del calore; possono essere modellati o formati in oggetti finiti per poi esser riportati allo stato solido tramite un raffreddamento; tale processo è totalmente reversibile e può essere ripetuto tante volte senza degradare il polimero.

La spiegazione dal punto di vista molecolare è che, aumentando la temperatura, la forza dei legami secondari diminuirà, permettendo così una maggiore mobilità relativa tra le catene nel momento in cui verrà applicata una sollecitazione al polimero.

Hanno una struttura molecolare "a catena aperta", ovvero presentano un basso grado di reticolazione e sono relativamente morbidi.

Esempi più comuni di polimeri termoplastici sono il polietilene, il polistirene, il polipropilene e l'ABS;

- **termoindurenti:** sono polimeri che dopo una prima fase di rammollimento per effetto combinato di calore e pressione risultano formabili, mentre successivamente induriscono grazie al processo di reticolazione; se si provasse a riscaldare tali polimeri in seguito all'indurimento, non rammolliscono, bensì si decompongono carbonizzandosi; da ciò si può dedurre che tali polimeri possono essere formati una sola volta.

La spiegazione a livello molecolare la si può trovare nel fatto che i polimeri appartenenti a questa categoria presentano legami covalenti tra le varie catene, grazie ai quali riescono a contrastare le vibrazioni e le rotazioni anche ad alte temperature. La rottura di tali legami avviene solo riscaldando eccessivamente il polimero ma, con un conseguente degrado della struttura molecolare.

I termoindurenti in generale sono più duri e più forti dei termoplastici e presentano inoltre una maggiore stabilità dimensionale.

- **elastomeri:** presentano elevata deformabilità ed elasticità. Sono formati da lunghe macromolecole con molti gradi di libertà che permettono un'alta deformazione anche per carichi relativamente bassi. Un'ulteriore particolarità è dovuta al fatto che sono in grado di recuperare in maniera totalmente elastica la loro forma originale non appena viene interrotta l'applicazione del carico. Questo comportamento è dovuto alla presenza di legami incrociati che riportano le catene alla loro configurazione indeformata. Nello stato in cui non viene applicata nessuna forza gli elastomeri sono amorfi e composti da catene molecolari intrecciate e avvolte tra loro, mentre quando viene applicata una forza, tali catene si allineano nella stessa direzione di quest'ultima.



Figura 7: Catene molecolari a "riposo".

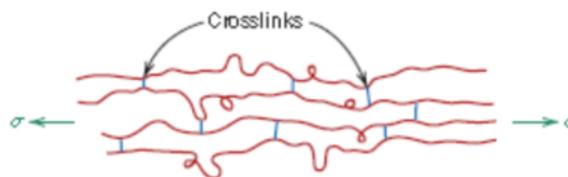


Figura 6: Catene molecolari di un elastomero allineate.

Dal punto di vista pratico, in genere si sfruttano delle opportune mescole, costituite da uno o più materiali polimerici più l'aggiunta di additivi. Tra gli additivi si possono citare sostanze plastificanti, coloranti, antiossidanti, lubrificanti ed altri componenti speciali. Per tale motivo, alla classificazione standard dei materiali polimerici si affianca una classificazione "commerciale", secondo la quale i materiali polimerici si dividono in:

- fibre: sono dotati di notevole resistenza meccanica e hanno scarsa duttilità rispetto agli altri materiali polimerici; ciò vuol dire che sono materiali che si allungano poco se sottoposti a trazione e possono resistere a elevati carichi di rottura;
- materie plastiche: formulate a partire da termoplastici e termoindurenti;
- resine: particolari materie plastiche formulate a partire da termoindurenti;
- gomme: formulate a partire da elastomeri.

Le caratteristiche vantaggiose delle materie plastiche rispetto ai materiali metallici e non metallici sono la grande facilità di lavorazione, l'economicità, la colorabilità, l'isolamento acustico, termico, elettrico, meccanico (vibrazioni), la resistenza alla corrosione e l'inerzia chimica, nonché l'idrorepellenza e l'inattaccabilità da parte di muffe, funghi e batteri. Quelle svantaggiose sono l'attaccabilità da parte dei solventi (soprattutto le termoplastiche) e degli acidi (in particolare le termoindurenti) e scarsa resistenza a temperature elevate.

2.1.4. Classificazione in base alla struttura molecolare.

Un altro parametro importante che influenza molto le caratteristiche fisiche di un polimero, è la configurazione strutturale delle catene molecolari. Le moderne tecniche di sintetizzazione dei polimeri permettono di controllare molto bene lo svilupparsi di determinate configurazioni in modo tale da poter ottenere il più possibile le proprietà meccaniche desiderate.

In base alla configurazione i polimeri possono essere classificati in:

- **polimeri lineari:**
Le unità ripetitive, appartenenti ad una singola catena, sono unite da un estremo all'altro.

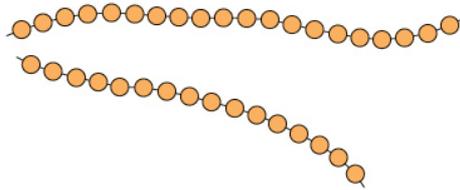


Figura 8: Esempio di polimero lineare.

Le catene sono flessibili e tra due catene si possono instaurare legami di tipo van der Waals e idrogeno.

Esempi di polimeri con struttura lineare sono: polietilene (PE), cloruro di polivinile (PVC), e il polistirene (PS).

- **polimeri ramificati:**
Dalla catena partono ramificazioni laterali, generati da reazioni laterali che avvengono durante il processo di sintesi.

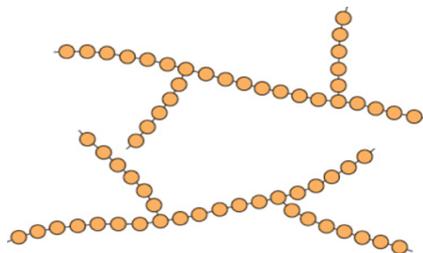


Figura 9: Esempio di polimero ramificato.

Le ramificazioni riducono la capacità di compattazione con una conseguente diminuzione della densità. Gli stessi polimeri che formano strutture lineari possono essere ramificati.

Un esempio pratico di quest'ultima affermazione è il polietilene, il quale ad alta densità (HDPE) è essenzialmente un polimero lineare, mentre a bassa densità (LDPE) contiene piccole ramificazioni.

- **polimeri a rami incrociati:**

Le catene lineari adiacenti sono unite in vari punti da legami covalenti. Lo sviluppo dei legami incrociati si ha sia durante la fase di sintesi tramite una reazione chimica non reversibile. Spesso questa configurazione si ottiene aggiungendo, nella fase di sintesi del polimero, atomi/molecole molto affini a quelli appartenenti alla catena principale. Questa struttura è molto tipica dei materiali gommosi:

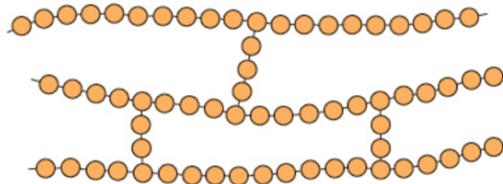


Figura 10: Esempio di polimero a rami incrociati.

- **polimeri reticolati:**

I monomeri multifunzionali si impegnano in tre o più legami covalenti attivi formando reti tridimensionali. I polimeri appartenenti a questa categoria presentano delle proprietà termiche e meccaniche che li rendono molto particolari:

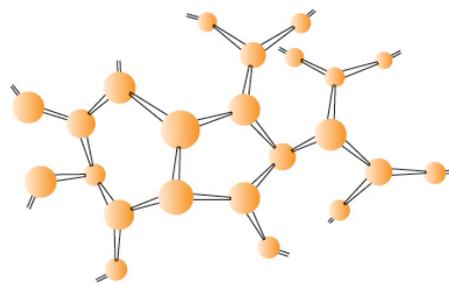


Figura 11: Esempio di polimero reticolato.

Esempi di polimeri reticolati sono le resine poliuretaniche.

2.1.5. Classificazione in base al loro stato di aggregazione.

Lo stato di aggregazione e la temperatura di esercizio determinano il comportamento finale del polimero; essi si presentano sotto due forme principali, amorfi e semi-cristallini.

Osservando l'organizzazione strutturale delle catene che formano i polimeri, si può affermare che la maggior parte di questi presentano una struttura semicristallina, ossia una configurazione intermedia tra la struttura interamente cristallina e quella totalmente amorfa.

Si parla di struttura semicristallina proprio perché all'interno del materiale si osservano zone cristalline detti cristalliti, in cui le singole catene sono ripiegate a lamella, ordinate e con una forte interazione, mentre altrove si hanno zone amorfe, in cui le catene sono distese, disordinate e scarsamente interagenti. Da ciò ne consegue che, una stessa catena polimerica, può trovarsi alternativamente in una zona cristallina e in una amorfa al fine di poter garantire la continuità della struttura. Questo particolare tipo di struttura è detto a micelle frangiate e lo si può osservare in figura 12:

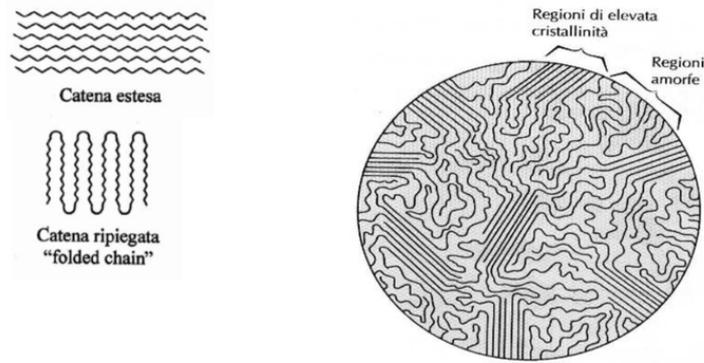


Figura 12: Esempio di struttura a micelle frangiate.

Una dimostrazione pratica di tale modello si ha, osservando tramite delle tecniche di diffrazione ai raggi X un materiale termoplastico che abbia subito il passaggio di fase dallo stato liquido allo stato solido; si è infatti notato che la maggior parte dei polimeri termoplastici, in seguito a solidificazione, formano delle sferuliti, ovvero piccole particelle solide di forma circa sferica dove si può notare la presenza dei cristalliti e delle zone amorfe, in accordo con il modello a micelle frangiate:

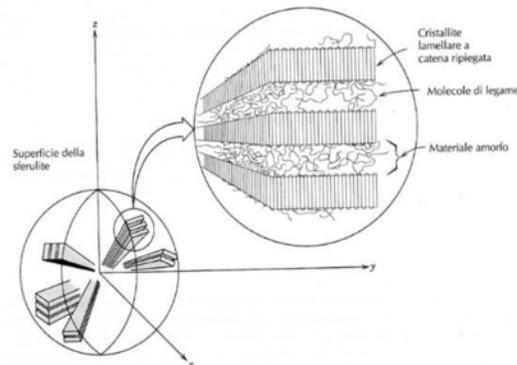


Figura 13: Schematizzazione di una sferulite.

In tale struttura, si può facilmente distinguere la zona cristallina da quella amorfa, in quanto la prima si presenta sotto forma di striature più chiare e le catene polimeriche in questa zona assumono una configurazione ripiegata, mentre la seconda è caratterizzata da un colore più scuro.

Il comportamento dei polimeri varia molto in base alla percentuale di volume occupato dalla zona cristallina e dalla zona amorfa. Si parlerà quindi di:

- Polimeri cristallini: con una percentuale di cristallinità superiore al 80%. Tali polimeri avranno quindi proprietà tipiche dei materiali cristallini ovvero rigidità, elevata resistenza meccanica, fragilità e opacità;
- Polimeri amorfi: con percentuale di cristallinità inferiore al 20%. In questo caso avranno un comportamento simile ai materiali amorfi, difatti saranno soffici, presenteranno una bassa resistenza meccanica, una buona elasticità e saranno trasparenti (al di sopra della temperatura di transizione vetrosa).

La differenza che merita una maggiore attenzione è la risposta di tali materiali quando li viene somministrata energia termica; difatti, si può osservare sperimentalmente un comportamento diverso dei polimeri a seconda del loro grado di cristallinità:

- **Polimeri amorfi:**

I polimeri amorfi presentano una temperatura di transizione vetrosa T_g (T_{glass}) oltre la quale il polimero rammollisce senza fondere.

Superata tale temperatura il materiale, inizialmente rigido, vetroso e con bassa mobilità molecolare, diventa gommoso e si comporta come un liquido ad elevata viscosità permettendo quindi alle catene una maggiore libertà di movimento.

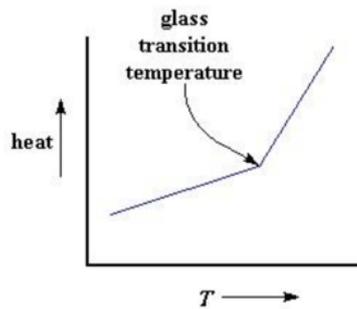


Figura 14: Risposta di un polimero amorfo alla somministrazione di calore.

Non si tratta di una transizione termodinamica ma cinetica infatti, la temperatura continua a salire con una pendenza differente. La diversa pendenza della retta di riscaldamento è dovuta a una variazione del calore specifico del materiale derivante dall'importante cambio strutturale a cui il polimero è stato sottoposto.

La temperatura di transizione vetrosa è influenzata da diversi fattori:

- La natura chimica del polimero, infatti se la flessibilità delle catene diminuisce la T_g tende a salire;
- Un aumento del peso molecolare implica un aumento della temperatura di transizione;
- Strutture ramificate e con legami incrociati provocano un aumento della T_g ;
- Introducendo dei plasticizzanti nel processo di produzione del polimero si abbassa tale soglia in modo da evitare il comportamento fragile alla temperatura a cui si vuole utilizzare il materiale.

• **Polimeri cristallini:**

I polimeri cristallini presentano una temperatura di fusione T_m (melting temperature) alla quale i cristalliti fondono e permettono alle catene, inizialmente ripiegate e interagenti nelle micelle, di muoversi liberamente e di scorrere plasticamente.

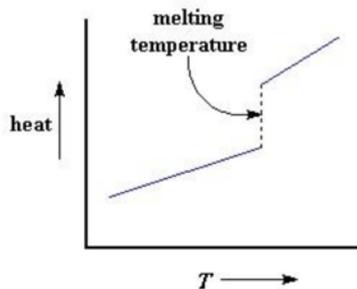


Figura 15: Risposta di un polimero cristallino alla somministrazione di calore.

Come succede in tutti i materiali aventi struttura cristallina il passaggio di stato è un processo isoterma, difatti nel grafico si può notare un tratto verticale in cui la temperatura non aumenta fino a fusione completa. Durante il passaggio di stato si assiste a un arresto termico in quanto, il calore, viene utilizzato per rompere i legami all'interno dei cristalliti e non per innalzare ulteriormente la temperatura.

La temperatura di fusione di un polimero dipende dalla storia termica a cui è stato sottoposto lo stesso ma anche dallo spessore delle lamelle, dalla natura chimica del materiale e dal suo peso molecolare. In particolare, tale temperatura viene influenzata come segue:

- Diminuisce all'aumentare dei difetti all'interno del materiale. Un materiale avente una struttura con poche ramificazioni e con catene corte a basso peso molecolare presenterà maggiori difetti in quanto si ha una struttura più frammentata e con minore continuità;

- Più le catene sono flessibili, minore sarà la temperatura di fusione;
- Aumenta all'aumentare dei legami intermolecolari (a ponte di idrogeno per esempio);
- Aumenta con l'aumentare della durezza del gruppo funzionale.

Ci possono essere polimeri semicristallini nei quali non prevalgono nettamente né le zone cristalline né le zone amorfie, e che quindi presentano entrambe le temperature; in particolare le zone amorfie saranno la causa della transizione vetrosa a T_g , mentre le zone cristalline provocheranno la fusione a T_m . In questi casi la temperatura di fusione è sempre maggiore della temperatura di transizione vetrosa.

In generale si può dire che i polimeri aventi struttura lineare tendono a cristallizzare più facilmente in quanto le catene incontrano minore impedimento ad allinearsi, cosa che risulta più difficile nel caso in cui siano presenti ramificazioni o legami incrociati.

Per quanto riguarda i copolimeri invece, quelli che presentano una struttura di tipo random o graft tendono ad essere amorfi in quanto la disposizione delle unità ripetitive è molto irregolare, mentre i copolimeri alternati o blocchi presentano un certo grado di cristallizzazione.

I seguenti grafici (figura 16) evidenziano come il comportamento dei polimeri dipenda dallo stato di aggregazione e dalla temperatura di utilizzo:

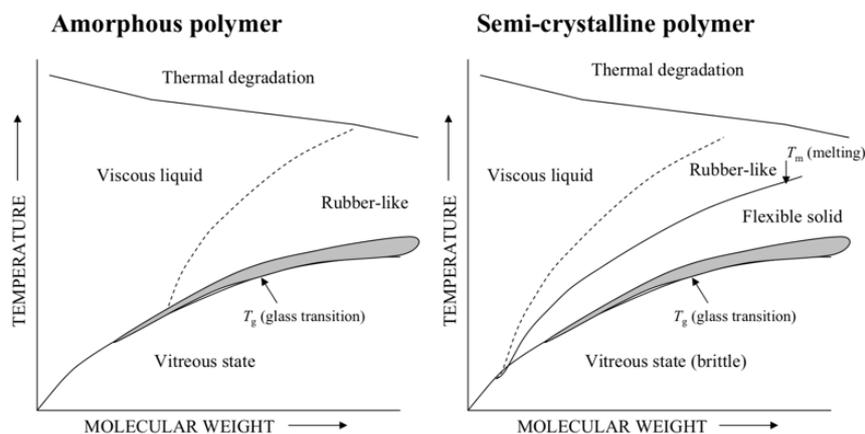


Figura 16: Stato di aggregazione dei polimeri in funzione della temperatura e del peso molecolare.

È molto importante conoscere la temperatura di transizione vetrosa di un polimero in quanto questa ne determinerà il suo campo di applicazione. Un esempio pratico si può riscontrare nel polietilene e nel polistirene: il primo ha una T_g inferiore agli 0°C quindi a temperatura ambiente si presenta come un materiale morbido, deformabile e facilmente lavorabile, mentre il secondo avendo la temperatura di transizione vetrosa a circa 90°C si presenterà, a temperatura ambiente, come un materiale duro e fragile.

Da ciò ne deriva che, al fine di ottenere l'elasticità tipica degli elastomeri, questi devono sempre essere usati al di sopra della loro temperatura di transizione vetrosa. In alcuni casi vengono addizionati al polimero appositi additivi, detti plastificanti, con lo scopo di abbassare la T_g e di facilitarne la lavorabilità.

2.2. I principali additivi

I polimeri non vengono quasi mai usati allo stato puro, ma miscelati con additivi vari, per migliorare la lavorabilità e le caratteristiche d'uso. Questi agenti hanno dato un contributo decisivo alla diffusione della plastica e promettono di essere strumenti utili per risolvere i problemi futuri. Ci sono moltissime ragioni per cui risulta molto conveniente aggiungere degli additivi ai principali polimeri:

- Incrementano la resistenza alle alte temperature e la stabilità dimensionale;
- In qualche caso riducono i costi;
- Incrementano la rigidità;

- Riducono il restringimento sia in fase produttiva che nell'utilizzo quotidiano;
- Incrementano la conduttività elettrica e termica;
- Riducono l'infiammabilità;
- Incrementano la resistenza ad impatto.

Gli additivi plastici possono classificarsi in 3 gruppi principali:

1. Additivi che incrementano la stabilità e la resistenza della plastica contro la degradazione e l'invecchiamento durante la lavorazione o l'uso. Per degrado generalmente si intende la scissione delle catene causato o dalla somministrazione di energia al polimero, come ad esempio calore e radiazioni UV, o da reazioni chimiche di ossidazione e l'idrolisi. Questi additivi sono:
 - Antiossidanti: prevengono o ritardano l'autossidazione dei polimeri eliminando o riducendo al minimo i conseguenti danni (es. scolorimento, riduzione della brillantezza, crepe, infragilimento);
 - stabilizzanti alla luce: sono utilizzati per massimizzare la protezione contro la fotodegradazione in quanto, come già accennato, dei particolari tipi di radiazioni hanno energia sufficiente a rompere i legami chimici. Molte materie plastiche a causa della fotodegradazione subiscono ingiallimento, screpolature superficiali, infragilimento, riduzione della lucentezza o sfarinamento soprattutto se utilizzati all'aperto e quindi costantemente esposti a tali agenti;
 - stabilizzatori termici: sono composti organometallici a base di Sn, Pb, Ca e Zn.
2. Additivi che facilitano o controllano il processo di lavorazione come ad esempio:
 - lubrificanti: controllano le proprietà di attrito e di aderenza delle materie plastiche durante la lavorazione e l'uso facilitandone lo scorrimento. I lubrificanti migliorano inoltre la dispersione dei pigmenti e delle cariche nelle materie plastiche difatti, colorazioni uniformi possono essere ottenute scomponendo gli agglomerati nella preparazione dei pigmenti. Anche dal punto di vista delle proprietà meccaniche, risulta importante avere una buona dispersione delle cariche, ragion per cui si cerca di introdurre additivi molto piccoli in modo da favorire la dispersione. Si utilizzano cere, grassi, esteri, idrocarburi e saponi metallici;
 - distaccanti: impediscono l'adesione del polimero allo stampo. Si utilizzano cere e siliconi;
 - agenti di sformatura: impediscono l'adesione della plastica stampata ai rulli di raffreddamento e agli stampi metallici;
 - agenti anticiscivolo: migliorano la qualità di attrito delle superfici plastiche finite (ad es. cuscinetti e ingranaggi) e impediscono l'adesione tra film impilati;
 - agenti anti bloccanti: impediscono l'adesione tra gli strati di film su rotoli o in pile quando si applicano pressione e calore;
 - riempitivi: sono anche detti cariche ed hanno lo scopo di abbassare il costo del materiale senza pregiudicarne le proprietà. Tipici riempitivi, di basso costo, sono CaCO_3 , fibre di vetro, legno, talco, mica, polvere di marmo, nerofumo, silice. Generalmente i riempitivi sono più economici del polimero confrontandoli dal punto di vista del peso.
3. Plastificanti: additivi che conferiscono alle materie plastiche una nuova e auspicabile qualità, come la resistenza alla combustione, la trasparenza o il colore, il miglioramento delle proprietà meccaniche o elettriche, la stabilità dimensionale e la degradabilità. Tra questi abbiamo:
 - Additivi che abbassano la T_g e quindi conferiscono flessibilità ai polimeri. In genere sono esteri dell'acido ftalico che sono completamente solubili nel polimero e, insinuandosi all'interno dei cristalli, diminuiscono la cristallinità e quindi la rigidità;

- pigmenti e coloranti: sono utilizzati per dare colore e opacità al materiale. I pigmenti sono insolubili mentre i coloranti sono solubili nel materiale che devono colorare. In alcuni casi, questi additivi, possono assorbire le radiazioni UV e quindi prolungare la vita del materiale riducendone foto-ossidazione. In altri impartiscono particolari proprietà alla luce, come ad esempio la fluorescenza.
- agenti antifiamma: i ritardanti di fiamma nelle materie plastiche influenzano l'infiammabilità, il tasso di combustione, il rilascio di calore, l'apporto di combustibile, l'evoluzione del fumo e la formazione di gas tossici o corrosivi. L'importanza di questi parametri dipende dalla situazione. Sebbene i ritardanti di fiamma possano essere particolarmente efficaci nelle prime fasi di un incendio e possano ridurre l'infiammabilità, le plastiche modificate con questi additivi sono ancora combustibili. In molti casi e, soprattutto in presenza di elevate concentrazioni, i ritardanti di fiamma abbassano la qualità e aumentano il prezzo di una plastica. Essi vengono quindi utilizzati solo quando richiesto. La scelta è determinata dall'efficacia e dal prezzo del ritardante di fiamma in quanto, influenza le sue proprietà meccaniche, ottiche ed elettriche, nonché le interazioni con altri additivi (ad esempio, stabilizzanti alla luce). Una volta si usavano derivati alogenati, oggi sostituiti, a causa della loro tossicità, da borati e idrossidi di alluminio;

Il problema legato all'uso di queste sostanze è che molte hanno una sospetta o conclamata tossicità, per cui è necessario controllare, con appositi saggi, che tali sostanze nocive non vengano rilasciate in misura significativa nell'ambiente o agli utilizzatori.

2.3. Degradazione dei polimeri

I materiali polimerici, se da un lato presentano il vantaggio di essere quasi totalmente immuni alla corrosione, dall'altro sono soggetti, in maniera più o meno evidente, alla degradazione provocata dall'interazione con l'ambiente esterno (acqua, umidità, luce solare etc.).

Se per i metalli la corrosione è più di tipo elettrochimico, per i polimeri si tratta di reazioni fisicochimiche, ovvero che inglobano fenomeni fisici e chimici.

Considerata la complessità della struttura polimerica, i meccanismi di invecchiamento di tali materiali non sono del tutto chiari. La questione chiara e lampante è che in ogni caso l'invecchiamento implica una riduzione delle proprietà meccaniche e allo stesso tempo un peggioramento dell'aspetto superficiale del polimero. Il deterioramento dei polimeri si manifesta o attraverso il rigonfiamento (swelling) o la dissoluzione del materiale in questione o attraverso la rottura dei legami intermolecolari; come già accennato, nel primo caso si tratta di fenomeni fisici, mentre nel secondo siamo in presenza di reazioni chimiche. Vediamo ora in dettaglio i fenomeni sopracitati:

- **Swelling e dissoluzione:** questo tipo di degradazione avviene quando i polimeri vengono a contatto con altre sostanze allo stato liquido.

Nel caso dello swelling le piccole molecole di soluto liquido, tramite il meccanismo della diffusione, vengono assorbite all'interno del polimero e si andranno a posizionare tra le varie catene polimeriche. La diretta conseguenza è che il polimero tenderà a espandersi e rigonfiarsi in quanto le macromolecole sono costrette ad allontanarsi per lasciare posto al soluto.

La separazione delle catene polimeriche riduce la forza dei legami intermolecolari che produrrà come diretta conseguenza, l'aumento della duttilità e della morbidezza del polimero. Lo swelling può essere considerato come una dissoluzione parziale nel quale c'è solo la solubilità limitata del polimero nel solvente; la dissoluzione difatti avviene solo quando il polimero è completamente solubile.

In linea generale si può affermare che più sono simili le strutture chimiche del soluto e del solvente, più saranno favoriti entrambi i fenomeni.

Lo swelling e la dissoluzione sono molto influenzati dalla temperatura e dalle caratteristiche della struttura molecolare del polimero e del solvente; infatti si può affermare che, aumentando il peso molecolare, aumentando i legami incrociati e il grado di cristallizzazione e diminuendo la temperatura, tali fenomeni risulterebbero molto rallentati.

- **Rottura dei legami:** la rottura dei legami intermolecolari può avvenire o a causa della radiazione, o a causa dell'energia termica o a causa di sostanze che generano reazioni chimiche.

Effetti delle radiazioni

Alcuni tipi di radiazioni, come i raggi x, i raggi gamma, i raggi beta e gli ultra violetti possiedono sufficiente energia da penetrare all'interno dei polimeri e interagire con gli atomi che li costituiscono o con i loro elettroni.

Un esempio di tale reazione è la ionizzazione, nella quale la radiazione strappa l'elettrone più esterno ad un atomo specifico trasformandolo in uno ione positivo. Ovviamente, il legame covalente, associato all'atomo trasformatosi in ione, si rompe e si ha una nuova riorganizzazione atomica. Per proteggere il polimero dagli effetti provocati dalle radiazioni si possono aggiungere degli additivi noti come stabilizzatori.

Nella realtà la radiazione che più colpisce i polimeri sono i raggi UV contenuti all'interno della radiazione solare, che provocano, dopo diverse ore di esposizione, un forte infragilimento e ingiallimento. Il degrado delle materie plastiche causato dalle radiazioni ultraviolette rappresenta un serio problema, soprattutto per i veicoli spaziali esposti alle radiazioni cosmiche e per i reattori nucleari nei quali è presente un alto livello di radiazioni nucleari.

Sviluppare polimeri che resistano alle più estreme condizioni ambientali è una sfida alla quale molti ricercatori stanno partecipando.

C'è però da dire che, non sempre le radiazioni creano un effetto negativo sui polimeri, difatti può succedere che si creino dei legami intermolecolari proprio in seguito all'esposizione del polimero ad una fonte radiativa. In questo caso, non si parla più di degrado del materiale proprio perché questi nuovi legami incrementeranno le proprietà meccaniche del polimero piuttosto che diminuirle. Volendo fornire un esempio di ciò, basti pensare che i raggi gamma vengono usati commercialmente per creare legami incrociati nel polietilene al fine di migliorare la sua resistenza all'ammorbidimento e al flusso a elevate temperature.

Reazioni chimiche

Sostanze chimiche come l'ossigeno o l'ozono possono generare delle reazioni chimiche che provocano o accelerano la scissione delle catene. Questo effetto solitamente è tipico delle gomme vulcanizzate che come particolarità hanno il doppio legame tra gli atomi di carbonio nella catena principale. Tali gomme, se poste in un ambiente in cui è presente l'ozono, subiscono la seguente reazione di scissione:

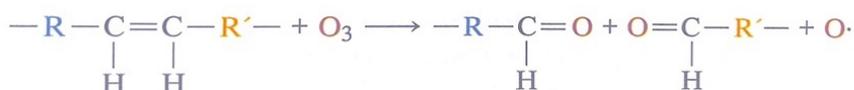


Figura 17: Reazione di scissione di una gomma vulcanizzata in presenza di ozono.

La molecola di ozono O₃ si scinde in 3 singoli atomi di ossigeno, due dei quali andranno a formare i doppi legami con i due atomi di carbonio, inizialmente legati tra loro, mentre uno dei tre rimarrà disaccoppiato. Si assisterà quindi alla formazione di uno strato di ossido che delle volte può portare benefici alla molecola, mentre altre volte può risultare deleterio; nel caso in cui la gomma è intatta e non è soggetta a stress, questo film di ossido andrà a proteggere la superficie da eventuali reazioni chimiche esterne, mentre se la gomma dovesse essere sottoposta a trazione, si favorirà la formazione di cricche che si andranno a sviluppare in direzione perpendicolare a quella dello stress, inducendo così la rottura del materiale.

La maggior parte delle volte, per risolvere l'ossidazione dei polimeri, si aggiungono degli stabilizzatori che fungono da elementi sacrificali in quanto reagiscono con l'ozono eliminando così i radicali liberi.

Effetti dell'energia termica

Per degradazione termica si intende la scissione dei legami dovuta principalmente all'esposizione alle alte temperature. Può infatti accadere che si noti una diminuzione di peso del polimero, dovuta alla produzione di sostanze gassose, dopo aver esposto il materiale alle alte temperature. La stabilità termica di un polimero dipende principalmente dall'energia dei legami presenti tra le varie specie atomiche, difatti tanto più energia possiedono i legami, tanto più stabile risulta essere il polimero.

- **Weathering:** con questo termine si intende la degradazione dei polimeri quando sono utilizzati all'aperto e quindi esposti a tutti gli agenti atmosferici. Questa condizione operativa genererà molte reazioni a catena, prima tra tutte è l'ossidazione dovuta all'esposizione ai raggi UV provenienti dal sole. Oltre a questo c'è da considerare che alcuni polimeri come il nylon e la cellulosa sono molto predisposti ad assorbire l'acqua riducendo così la loro rigidità e la loro durezza. La resistenza agli agenti atmosferici varia molto da polimero a polimero infatti ci sono i fluorocarburi che sono totalmente immuni, mentre il PVC e il polistirene sono facilmente attaccabili.

2.3.1. Degradazione causata dai raggi UV

Per “ *invecchiamento* ” di un materiale si intende la progressiva perdita, dovuta alle sollecitazioni che esso subisce durante la vita operativa, di quelle proprietà che avevano determinato il suo utilizzo ed il relativo dimensionamento nella realizzazione di un'apparecchiatura.

Verrà dedicato un apposito paragrafo a questa tipologia di degrado dei materiali plastici poiché rappresenta il fulcro di questa tesi; infatti, come già anticipato nell'introduzione, si studierà e si confronterà l'invecchiamento del polipropilene puro e del polipropilene rinforzato con della carica minerale di talco.

La principale sorgente di UV è il sole, ragion per cui, quasi la totalità dei materiali plastici e non, presenti sulla Terra, sono esposti a questo tipo di radiazione; per comprendere meglio quest'aspetto analizzeremo nel dettaglio la radiazione solare.

La radiazione solare, incidente sulla superficie terrestre, è il risultato di complesse interazioni e di continui scambi di energia che avvengono con l'atmosfera e la superficie stessa.

Analizzando nel dettaglio lo spettro elettromagnetico solare, si può affermare che dal punto di vista radiativo il Sole è un emettitore perfetto: ciò significa che si comporta come un corpo nero capace di assorbire tutta la radiazione incidente senza riflessione alcuna.

Essendo trattato come un corpo nero, per quanto riguarda il suo spettro di emissione, l'intensità della radiazione emessa sarà descritta dalla legge di Planck, quindi varierà solo in funzione della frequenza e della temperatura superficiale del corpo emettitore che nel caso del sole corrisponde ai 5780 K.

Tale temperatura risulta essere un equilibrio tra l'energia che la superficie solare riceve dal nucleo e quella che viene emessa dalla stessa verso lo spazio siderale, ragion per cui si può affermare che rimanga sempre uguale nel corso degli anni. Ovviamente, a temperature così elevate, corrisponderà un'importante emissione di radiazioni.

L'energia emessa è chiamata radianza e viene indicata con $B_\nu(\nu, T)$:

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad (2.1)$$

dove: ν è la frequenza, T la temperatura in K, k_B è la costante di Boltzman, h è la costante di Planck e c è la velocità della luce nel vuoto.

Agli inizi del 1900, il fisico tedesco Max Planck riuscì a spiegare il fenomeno dell'emissione dei corpi neri; in particolare, concentrò la sua attenzione sulla correlazione tra energia emessa e temperatura del corpo considerato. Analizzando i dati che ottenne sperimentalmente, notò che le varie energie ottenute erano tutte l'una multipla dell'altra. Tale formula aveva senso solo se si accettava che l'energia di una particella oscillante è quantizzata, ovvero che può assumere solo determinati valori. In una superficie qualsiasi, infatti, le particelle presenti possono assorbire energia dall'esterno, incrementando così la loro energia cinetica, e cominciando ad oscillare. Oscillando emetteranno delle radiazioni non in modo qualsiasi, ma solo in quantità ben definite e precise: questi pacchetti di energia prendono il nome di quanti del campo elettromagnetico. Notò inoltre, che l'energia risultava essere proporzionale alla frequenza di oscillazione moltiplicata per una certa costante; tale costante divenne nota come costante di Planck (h) e risulta essere pari a $6,63 \cdot 10^{-34}$ Joule s.

L'idea che l'energia si possa trasmettere solo in pacchetti discreti era una grande novità a quei tempi tanto che nemmeno Planck si rese conto dell'impatto che avrebbe avuto in futuro la sua intuizione.

Difatti, successivamente, Einstein propose l'idea che anche l'energia emessa dalla luce si trasmettesse sotto forma di pacchetti energetici. Scopri quindi che anche la luce era composta da piccole particelle o quanti, (chiamate in seguito fotoni) ognuna con un quantitativo di energia ben definita. Tale energia indicata con la lettera E risulta essere uguale alla costante già introdotta da Planck moltiplicata per la frequenza ν .

$$E = h \cdot \nu \quad (2.2)$$

Risulta ora opportuno riprendere la relazione esistente tra la lunghezza d'onda (λ) e la frequenza di una radiazione elettromagnetica (ν). Tra le due grandezze fisiche esiste una relazione di proporzionalità inversa, per cui maggiore è l'una e minore sarà l'altra. Essendo la lunghezza d'onda espressa in multipli e sottomultipli del metro, mentre la frequenza in s^{-1} (Hz), si intuisce facilmente come la costante di proporzionalità tra le due debba essere una velocità:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.3)$$

dove c rappresenta la velocità della luce pari circa a $3 \cdot 10^8$ m/s.

Si può quindi osservare come, l'energia posseduta da questi pacchetti energetici vari come segue:

- Aumenta alle alte frequenze e quindi alle basse lunghezze d'onda;
- Aumenta all'aumentare della temperatura, infatti a temperature maggiori, le particelle di un corpo avranno un'energia maggiore e quindi potranno emettere pacchetti energetici più grandi.

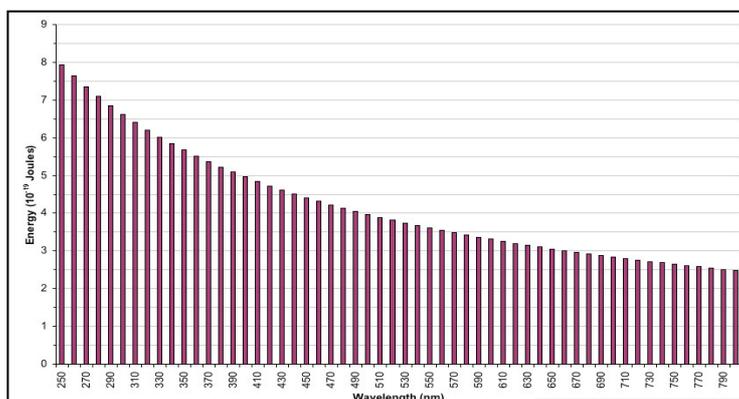


Figura 18: Energia associata ad un fotone in base alla sua frequenza.

Avendo chiarito questi aspetti preliminari si può passare ad analizzare nel dettaglio quello che è lo spettro di emissione del sole. La maniera più semplice è tramite il seguente grafico:

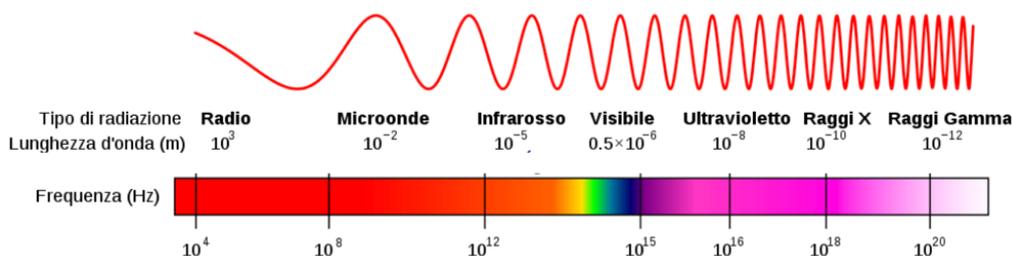


Figura 19: Spettro della radiazione solare.

Tale spettro è costituito dalla mescolanza di fotoni con una vasta gamma di frequenze e di lunghezze d'onda, le cui proporzioni la fanno percepire come luce bianca.

La radiazione solare visibile che raggiunge gli strati più esterni della superficie terrestre, corrisponde a circa il 41% della radiazione globale emessa dal sole ed è composta da un ampio range di lunghezze d'onda. Dai 400 ai 490 nm si hanno le radiazioni blu-violetto, dai 490 ai 560 nm quelle verdi e infine dai 590 ai 700 nm circa si hanno prevalentemente le radiazioni rosso-arancio.

La parte di radiazione di maggiore interesse e che ha un importante impatto sull'invecchiamento dei polimeri è proprio quella non visibile. In questa frazione si includono sia le radiazioni aventi lunghezza

d'onda maggiore di quelle appartenenti al visibile (infrarosse, microonde e onde radio) che quelle aventi una λ minore (UV, raggi x e raggi γ).

I raggi ultravioletti, raggi X e gamma, essendo caratterizzati da lunghezze d'onda molto piccole, possono creare problemi agli esseri viventi in quanto sono le radiazioni a maggior contenuto di energia. Considerando nello specifico i raggi UV, si può affermare che questi costituiscono solo l'8% della radiazione solare contro circa il 40% di radiazione visibile e più del 50% di infrarossi:

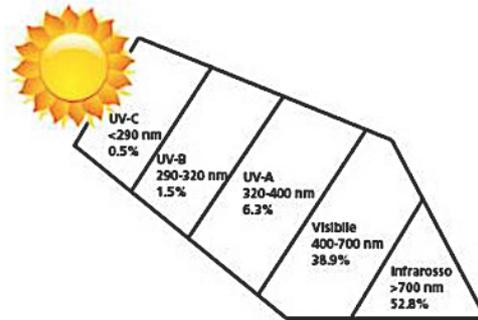


Figura 20: Distinzione tra UV-A, UV-B, e UV-C.

Come si può osservare dall'immagine, la banda degli UV è stata ulteriormente divisa in 3 sottogruppi:

- UV-A che coprono una lunghezza d'onda compresa tra i 400 e i 320 nm e costituiscono il 75% dei raggi UV totali emessi dal sole;
- UV-B con lunghezza d'onda compresa tra 320 e 290 nm e sono il 19%;
- UV-C va da 290 a 200 nm e costituiscono solo il 6% della radiazione UV totale.

Non la totalità di queste 3 differenti categorie arriva sulla Terra, infatti, grazie all'assorbimento da parte dell'ozonofera, circa il 99% degli ultravioletti che giungono sulla superficie terrestre sono UV-A. Come conseguenza si può affermare che quasi il 100% degli UV-C e il 95% degli UV-B è assorbito dall'atmosfera terrestre.

Il quantitativo di energia emessa dal sole nell'arco di una giornata (24 ore), si può riassumere nel seguente grafico:

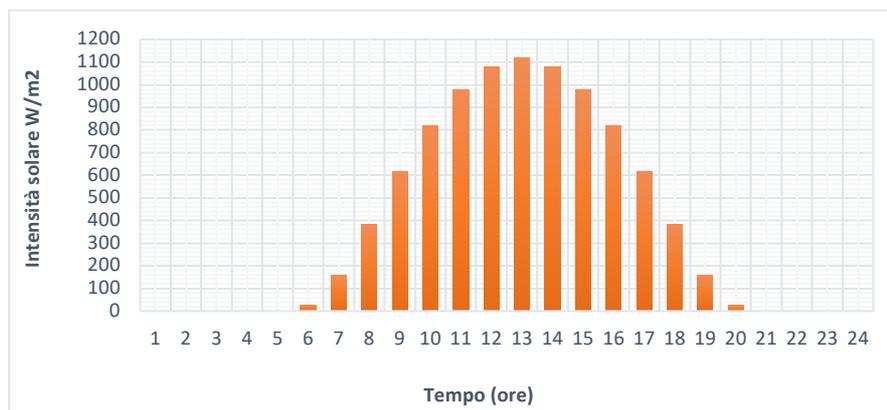


Figura 21: Energia solare che giunge sulla Terra nell'arco di una giornata.

Nelle ore notturne, come ci si può aspettare, l'energia solare che giunge sulla superficie terrestre è pari a zero e aumenterà pian piano, nel corso della giornata, fino a raggiungere il suo massimo, pari a 1120 W/m², tra mezzogiorno e le tredici. In particolare, tramite seguente tabella si può osservare nel dettaglio la distribuzione della radiazione globale emessa dal sole proprio nelle ore in cui questa raggiunge il suo massimo:

SPECTRAL REGION	BANDWIDTH (μm)	IRRADIANCE (W/m ²)	IRRADIANCE (%)
Ultra-violet*	0.28 - 0.36	32	2.9
	0.36 - 0.40	36	3.2
Visible	0.40 - 0.44	56	5.0
	0.44 - 0.48	73	6.5
	0.48 - 0.52	71	6.3
	0.52 - 0.56	65	5.8
**	0.56 - 0.64	121	10.8
	0.64 - 0.68	55	4.9
Infra-red	0.68 - 0.72	52	4.6
	0.72 - 0.78	67	6.0
	.78 - 1.0	176	15.7
	1.0 - 1.2	108	9.7
	1.2 - 1.4	65	5.8
	1.4 - 1.6	44	3.9
	1.6 - 1.8	29	2.6
	1.8 - 2.0	20	1.8
2.0 - 2.5	35	3.1	
2.5 - 3.0	15	1.4	
Totals		1120	100.0

* Note: Radiation shorter than 0.30 μm reaching the Earth's surface is insignificant.

** This bandwidth may apply to either the visible or IR spectrum.

Tabella 1: Dettaglio della distribuzione spettrale della radiazione globale.

Fotodegradazione di polimeri

La radiazione ultravioletta proveniente dalla luce solare, svolge un ruolo critico poiché, avendo un'alta frequenza, avrà un contenuto energetico altrettanto elevato da rompere i legami chimici.

Molte materie plastiche subiscono ingiallimento, screpolature superficiali, infragilimento, riduzione della lucentezza, sfarinamento o addirittura la completa disintegrazione anche dopo un breve periodo di servizio all'aperto.

L'energia assorbita da un materiale può essere dissipata tramite tre meccanismi principali:

- Attraverso l'emissione di radiazioni da parte degli elettroni quando passano dallo stato eccitato a quello fondamentale;
- Attraverso il rilascio di calore e quindi lo scambio termico con l'ambiente circostante;
- Attraverso il trasferimento di energia ai cromofori vicini.

Se nessuno di questi meccanismi è disponibile, la fotodegradazione avviene con la scissione dei legami e la formazione di radicali. Questi siti radicali saranno un punto molto reattivo, difatti possono reagire con l'ossigeno innescando reazioni a catena di autossidazione.

Può anche accadere che, i segmenti molecolari eccitati, possano anche trasferire energia all'ossigeno, convertendolo in ossigeno singoletto ad alta energia, che accelera l'ossidazione del materiale e quindi la sua degradazione. È proprio l'ossidazione dei gruppi carbonilici che provocherà la scissione della catena attraverso le seguenti reazioni chimiche:

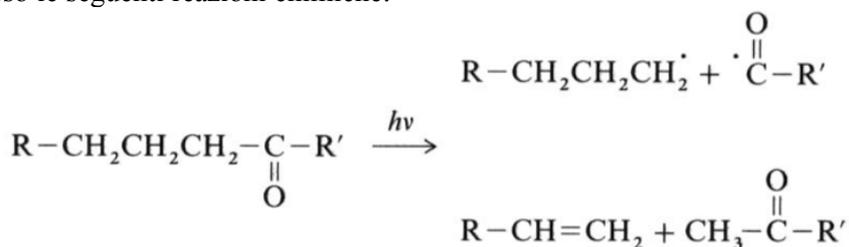


Figura 22: Reazioni di ossidazione dei gruppi carbonilici.

Osservando la reazione si può notare come fornendo energia a quella che inizialmente risulta essere un'unica molecola, in una prima fase si otterranno due molecole ciascuna con due elettroni spaiati, mentre successivamente, tali elettroni liberi, andranno a saturarsi producendo così due molecole stabili. Nelle plastiche semicristalline la degradazione è accentuata dal fatto che la radiazione UV viene dispersa dai cristalliti. La fotodegradazione si verifica principalmente nelle regioni amorose e permeabili all'ossigeno.

Sia i polimeri semicristallini che quelli amorfi manifestano un peggioramento delle loro caratteristiche meccaniche se esposti alla radiazione UV. Prendendo come esempio il PVC che è un polimero termoplastico avente struttura amorfa, si può notare, tramite il seguente grafico, come l'ingiallimento di tale materiale peggiori bruscamente se questo viene esposto a radiazioni di tipo UV-B (essendo queste quelle con una frequenza maggiore):

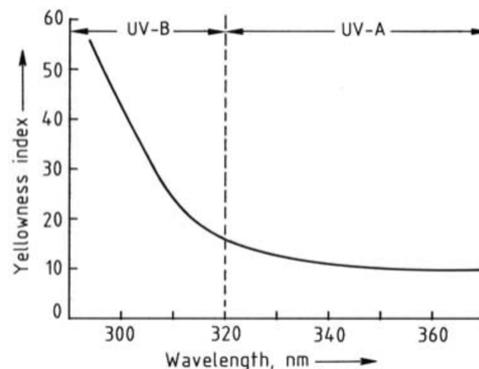


Figura 23: Ingiallimento del PVC in funzione del tipo di radiazione UV.

Difatti in via generale si può affermare che la maggior parte delle plastiche sono sensibili a lunghezze d'onda di 290 - 320 nm.

Vi sono delle sostanze, note come **assorbitori di UV**, le quali, avendo bande di assorbimento intenso nell'UV-B (alcuni di essi anche nell'UV-A) sono in grado di filtrare le radiazioni nocive prima che raggiungano i cromofori della plastica, evitando così il caratteristico ingiallimento.

Gli assorbitori UV devono dissipare rapidamente l'energia assorbita sotto forma di calore e non di radiazioni. Tali sostanze agiscono ostacolando quindi la fotolisi dei polimeri, quando si ipotizza che questi potrebbero essere esposti a fonti di radiazioni UV durante la loro vita. Sono quindi particolarmente efficaci quando la degradazione è dovuta principalmente alla fotolisi e non all'ossidazione. Poiché l'intensità della radiazione dipende dallo spessore dello strato assorbente queste sostanze sono più efficaci all'interno della plastica che sulla sua superficie; sono quindi solo marginalmente efficaci nei film sottili e nelle fibre.

2.4. Polimeri nel settore automotive

2.4.1. Storia dei polimeri nell'industria automobilistica e sviluppi futuri

I materiali polimerici ricoprono e hanno sempre ricoperto un ruolo preponderante all'interno dell'industria automobilistica. Il dominio delle plastiche nel settore automobilistico iniziò nel 1950, quando i materiali termoplastici come l'ABS, la poliammide, il policarbonato e le varie miscele di polimeri hanno avuto il loro debutto. Nei successivi anni e, in particolar modo negli ultimi decenni, il continuo sviluppo di polimeri avanzati e ad alte prestazioni ha aumentato notevolmente il loro utilizzo. Al giorno d'oggi, le materie plastiche sono utilizzate in quanto, oltre ad offrire buone proprietà meccaniche (come l'elevata tenacità e la resistenza a corrosione) e un piacevole aspetto estetico, rendono le automobili più efficienti dal punto di vista energetico, riducendone il peso e aumentandone la durata; a ciò si deve aggiungere l'estrema flessibilità del processo produttivo grazie al quale si riesce a creare forme e dettagli sempre più complessi mantenendo comunque i costi ridotti.

I maggiori esperti, spinti dalle attuali preoccupazioni economiche e ambientali, affermano che il modo più semplice e meno costoso per ridurre il consumo energetico e le emissioni di un veicolo è quello di ridurre il peso. Si stima che ogni riduzione del 10% del peso del veicolo si traduce in un risparmio di carburante compreso tra il 5% e il 7%. Così, per ogni chilogrammo di riduzione del peso del veicolo, c'è la possibilità di ridurre le emissioni di anidride carbonica di 20 kg. L'incorporazione dei materiali leggeri nelle automobili è quindi diventata una necessità.

L'obiettivo attuale è quindi quello di studiare e approfondire tutte le combinazioni possibili al fine di realizzare materiali leggeri ma resistenti e soprattutto sostenibili.

Il modo migliore per comprendere l'importanza di tali materie all'interno del settore automobilistico è osservando come si è evoluta la massa media dei componenti plastici nel corso degli anni:

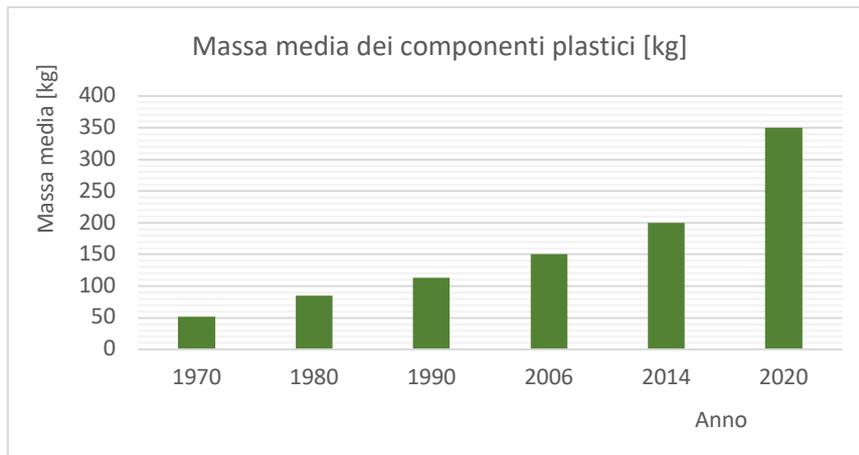


Figura 24: Evoluzione della massa media dei componenti plastici negli anni.

Si può osservare che già nel 2006 la media dei veicoli circolanti era composta da 150 kg di materie plastiche contro i 1160 kg di ferro e acciaio il che, rappresentava circa il 10-15% del peso totale della vettura. Dal 2006 in poi si è assistito ad un forte incremento difatti si è giunti a 200 kg nel 2014 e si prevede che nel 2020 si arriverà a circa il doppio, ovvero 350 kg.

Attualmente si può affermare con certezza che i compositi polimerici ingegnerizzati e plastiche rappresentano la seconda classe più comune di materiali automobilistici dopo i metalli ferrosi e le leghe (ghisa, acciaio, nichel) che costituiscono il 68% in peso; Il contenuto di plastica dei veicoli commerciali rappresenta circa il 50% di tutti i componenti interni, compresi i sottosistemi di sicurezza, le porte e i gruppi sedili. Questo brusco incremento è certamente dovuto, come già anticipato, alle sempre più stringenti norme antinquinamento che impongono consumi medi ed emissioni di CO₂ sempre più bassi al fine di contrastare il continuo aumento dell'inquinamento ambientale.

Si prevede che in futuro plastica e compositi saranno usati (in parte lo sono già) per componenti elettronici pannelli della carrozzeria, cofani, schienali dei sedili, console centrali, rivestimenti interni, e anche per la componentistica presente sotto al cofano.

Tutto questo non andrà a minacciare la sicurezza del conducente, in quanto, le plastiche adottate per la produzione automobilistica, sono spesso rinforzate con fibra di vetro e additivi grazie ai quali migliorano le proprietà meccaniche e la stabilità;

Riassumendo, i vantaggi di usare plastiche e compositi nei mezzi di trasporto pubblico e privato sono:

- corrosione minima che garantisce una maggiore durata del veicolo;
- una sostanziale libertà di progettazione, che consente maggiore creatività e innovazioni;
- notevole riduzione del peso e quindi dei consumi;
- flessibilità nell'integrazione dei componenti;
- sicurezza, comfort ed economia;
- riciclabilità.

2.4.2. Polimeri attualmente utilizzati nel settore automobilistico.

Anche se in un modello di auto possono essere utilizzati fino a 13 polimeri diversi, solo tre tipi di questi costituiscono circa il 66% del totale delle plastiche utilizzate in un'auto: polipropilene (33%), poliuretano (17%) e PVC (16%). Di seguito verrà fornito un elenco e una breve descrizione dei principali polimeri utilizzati nel settore automotive:

1. Polipropilene (PP)

Il polipropilene è un polimero termoplastico utilizzato in un'ampia varietà di applicazioni. Risulta essere estremamente resistente agli agenti chimici e quasi completamente impermeabile all'acqua.

Applicazioni: paraurti automobilistici, isolamento cavi, scatole batterie, taniche di benzina, tappeti per interni ed esterni.

2. Poliuretano (PUR)

Il poliuretano solido è un materiale elastomerico dalle eccezionali proprietà fisiche, tra cui tenacità, flessibilità, resistenza all'abrasione e alla temperatura. Inoltre, vanta un'ampia gamma di durezza, dalla gomma morbida alla palla da bowling dura. Altre caratteristiche del poliuretano sono: una durata estremamente elevata, un'elevata capacità di carico, un'eccezionale resistenza agli agenti atmosferici (ozono e radiazioni), al petrolio, alla benzina e alla maggior parte dei solventi.

Applicazioni: sedili in schiuma flessibile, volante, pannelli isolanti in schiuma, ruote e pneumatici in elastomero, boccole per sospensioni automobilistiche, parti in plastica dura.

3. Cloruro di polivinile (PVC)

Il polivinilcloruro ha una buona resistenza agli attacchi chimici e ai solventi, è un ritardante di fiamma, presenta un'elevata brillantezza e un basso/nullo contenuto di piombo. Il suo contenuto di vinile gli conferisce una buona resistenza alla trazione ma anche una buona flessibilità.

Applicazioni: pannelli di strumenti per automobili, guaina di cavi elettrici, tubi, porte.

4. Acrilonitrile butadiene stirene (ABS)

L'acrilonitrile butadiene Stirene è un copolimero ottenuto polimerizzando stirene e acrilonitrile in presenza di polibutadiene. Lo stirene conferisce alla plastica una superficie lucida e impermeabile mentre il butadiene, sostanza gommosa, fornisce resilienza anche a basse temperature; inoltre, resiste agli agenti atmosferici e ad alcune sostanze chimiche.

Applicazioni: parti di carrozzeria, cruscotti, copriruote.

5. Poliammide (PA)

La poliammide è nota come nylon 6.6 o nylon 6. Entrambi questi nylon hanno un'elevata resistenza all'usura, basse caratteristiche di attrito e buona resistenza chimica. Uno svantaggio di questo materiale è la scarsa stabilità dimensionale dovuta al fatto che tende ad espandersi assorbendo facilmente l'acqua e l'umidità; questo ovviamente limita molto il suo utilizzo.

Applicazioni: ingranaggi, boccole, camme, cuscinetti, rivestimenti resistenti alle intemperie.

6. Polistirene (PS)

Naturalmente trasparente e facile da produrre, il polistirene presenta un'eccellente resistenza chimica ed elettrica ma una scarsa resistenza alla luce UV.

Applicazioni: contenitori per attrezzature, accessori per auto, basi per display.

7. Polietilene (PE)

Il polietilene ha una buona resistenza chimica, buona tenacità e un'elevata resistenza agli urti. Viene prodotto in due modi differenti, a bassa densità (LDPE) e ad alta densità (HDPE). Risulta particolarmente utile quando è richiesta resistenza all'umidità e basso costo.

Applicazioni: vetro rinforzato per carrozzerie, isolamento elettrico, dove la resistenza e l'estetica sono importanti.

8. Poliossimetilene (POM)

Il poliossimetilene (noto anche come poliacetale o poliformaldeide) ha un'eccellente rigidità e resistenza allo snervamento anche alle basse temperature. Il POM è inoltre altamente resistente ai prodotti chimici e ai carburanti.

Applicazioni: finiture interne ed esterne, sistemi di alimentazione, piccoli ingranaggi.

9. Policarbonato (PC)

Il polimero di policarbonato amorfo offre una combinazione unica di rigidità, durezza e tenacità. Presenta eccellenti proprietà di resistenza agli agenti atmosferici, ai raggi UV, a impatto. Vanta inoltre delle ottime proprietà ottiche, elettriche e termiche. Grazie alla sua straordinaria resistenza agli urti, è spesso utilizzato per paraurti, caschi e vetri antiproiettile.

Applicazioni: paraurti, lenti per fari.

10. Acrilico (PMMA)

L'acrilico è un materiale termoplastico più trasparente del vetro, ha una buona resistenza alla trazione, ai raggi UV e agli agenti atmosferici. Presenta inoltre un'alta qualità ottica e finitura superficiale con una vasta gamma di colori.

Applicazioni: finestre, display, schermi.

11. Polibutilene tereftalato (PBT)

Il polibutilene tereftalato ha una buona resistenza chimica e presenta ottime proprietà elettriche tanto che generalmente è utilizzato come isolante nell'industria elettrica ed elettronica.

Si presenta come un materiale duro avente un'ottima resistenza alle sollecitazioni dinamiche, stabilità termica e dimensionale. Inoltre, è molto facile da produrre e da lavorare, difatti grazie alla sua cristallizzazione rapida, può essere raffreddato bruscamente.

Applicazioni: alloggiamenti e lunette dei fendinebbia, parti anteriori del tetto apribile, alloggiamenti del sistema di bloccaggio, maniglie delle porte, paraurti e componenti del carburatore.

12. Polietilene tereftalato (PET)

Il polietilene tereftalato ha caratteristiche simili al PBT difatti presenta una buona stabilità termica, buone proprietà elettriche, bassissimo assorbimento d'acqua ed eccellenti proprietà superficiali.

Applicazioni: braccio del tergitristallo e relativi alloggiamenti degli ingranaggi, fermo fari, coperchio motore e alloggiamenti dei connettori.

13. Acrilonitrile stirene acrilato (ASA)

Questo materiale ha grande tenacità e rigidità, buona resistenza chimica e stabilità termica, eccezionale resistenza agli agenti atmosferici, all'invecchiamento e all'ingiallimento, ed elevata brillantezza. L'unica limitazione nel suo utilizzo consiste nel fatto che se bruciato, provoca un fumo tossico.

Applicazioni: alloggiamenti, profili, parti interne ed esterne.

2.4.3. Principali cariche/additivi nel settore automotive

Nel settore automobilistico e in particolare in quello delle grandi produzioni in serie, è sempre più importante ridurre al minimo il ciclo produttivo di ogni singolo componente per ridurre conseguentemente il tempo globale di assemblaggio. La fase più lenta e più delicata nella produzione dei componenti polimerici è proprio quella del raffreddamento, difatti proprio da questa dipenderà la struttura interna del materiale, come ad esempio il grado di cristallizzazione. Questo è uno dei principali motivi che hanno spinto i produttori di polimeri per il settore automotive ad usare sempre più riempitivi minerali poiché, avendo questi una conduttività termica dieci volte maggiore di quella dei polimeri, aiutano di gran lunga la fase di raffreddamento nello stampo riducendone la durata del 30% circa con un conseguente aumento della produttività.

Modifiche delle proprietà meccaniche, ritiri e dilatazioni termiche sono possibili attraverso l'aggiunta di cariche e rinforzi di natura prevalentemente minerale. I rispettivi effetti sono determinati dalle proprietà del polimero di base, nonché dalla quantità e dalla natura della carica.

Tra le cariche minerali più comuni troviamo il carbonato di calcio e il talco. Il **talco** con una dimensione media delle particelle di 0,6-10 μm è il riempitivo più diffuso in quanto è anche in grado di rinforzare il materiale incrementando i moduli di elasticità, la stabilità dimensionale e la resistenza termica. Il carbonato di calcio, nonostante sia più economico del talco, è utilizzato in misura minore. Un'ulteriore caratteristica molto importante del talco, che ha incrementato ancora di più la sua diffusione, è che funge da agente nucleante per il polipropilene difatti riduce le dimensioni dei singoli cristalli favorendo così una riduzione di tempo nel processo di iniezione.

Le **fibre di vetro** sono di gran lunga il rinforzo più importante per la plastica. Sintetiche, inorganiche e incolore sono generalmente utilizzate a livelli del 30-40 % e migliorano la resistenza a trazione, a flessione, il modulo elastico e la temperatura di distorsione termica. Inoltre, la fibra di vetro, essendo incolore, non varia minimamente l'aspetto del componente (se aggiunto in modeste quantità), ma allo stesso tempo risulta essere il più costoso tra tutti i comuni riempitivi; l'effetto rinforzante aumenta con la lunghezza della fibra e dall'agente di accoppiamento.

In generale tutti i riempitivi aumentano il modulo elastico sia in trazione che in flessione, agendo però in modi diversi. I riempitivi aventi forme più sferiche, come il carbonato di calcio, apportano moderati miglioramenti del modulo, mentre quelli piatti, come la mica e il talco, danno miglioramenti intermedi. I riempitivi fibrosi invece, sono proprio quelli che danno il massimo aumento del modulo ma come già detto sono quelli più costosi (fibre di vetro). L'unica carica fibrosa che fa eccezione è quella di legno, difatti fornisce un lieve aumento del modulo elastico del materiale, causato principalmente dal fatto che di per sé possiede un modulo elastico basso già in partenza.

Il modulo elastico del nuovo materiale ottenuto combinando il polimero e l'additivo si otterrà con la seguente formula:

$$E_c = (1 - \phi)E_m + \phi E_f \quad (2.4)$$

In cui E_c , E_m e E_f è il modulo elastico del composto, della matrice e dell'additivo, mentre ϕ rappresenta la frazione in volume dell'additivo.

A differenza delle proprietà precedentemente elencate, la resistenza all'urto non presenta un comportamento così semplice. Questa proprietà meccanica è difatti controllata da molti fattori e non può essere prevista con successo. È noto che la presenza di grandi particelle e agglomerati riduce drasticamente la resistenza all'urto (soprattutto se non intagliata) difatti queste grandi particelle agiscono come se fossero dei difetti dai quali possono generarsi delle crepe. Al contrario, l'inclusione di particelle piccole e ben disperse può avere un'influenza molto positiva sulla forza d'impatto. Le particelle di carica, scarsamente legate al PP, deflettono l'avanzamento della punta della fessura e, in alcuni, casi possono anche cambiare il meccanismo di rottura da fragile a duttile. Questo è vero per la maggior parte dei copolimeri e per i polimeri modificati, però non si può affermare che è sempre così anche per il polipropilene, difatti si è notato che le particelle di carica possono annullare l'effetto della fase gommosa nei copolimeri PP e nel polipropilene modificato da impatto.

Uno degli aspetti negativi, causato dall'introduzione di queste cariche minerarie, consiste nel fatto che producono una perdita della resistenza alla graffiatura superficiale. Quando una parte è graffiata, le particelle minerali esposte riflettono la luce e rendono il graffio più visibile, quindi con l'aumento della carica minerale, i graffi diventano più facilmente visibili. La morfologia e le dimensioni di tali particelle giocano però un ruolo importante, difatti più le particelle delle cariche son piccole, migliore sarà la resistenza ai graffi. Nel settore automobilistico infatti, per cercare di alleviare l'effetto prodotto da queste cariche minerarie, le parti prodotte in TPO vengono verniciate oppure gli viene applicato un trattamento superficiale atto a diminuire la riflessione della luce da parte di questi minerali. La sigla TPO indica le poliolefine termoplastiche o elastomeri termoplastici olefinici che sono costituite da una frazione di un materiale termoplastico, da un elastomero o gomma, e solitamente da riempitivi (talco, fibra di vetro, fibra di carbonio, wollastonite).

3. POLIMERI ANALIZZATI

Tra tutti i polimeri diffusi maggiormente nel settore automotive si è deciso di concentrare le prove sperimentali sul polipropilene, con lo scopo di vedere come la presenza del talco in quantità differenti possa incidere sulle proprietà meccaniche e sull'invecchiamento del polimero.

La scelta è ricaduta su questo polimero in particolare poiché, come spiegato precedentemente, è il più utilizzato nella produzione di componenti interni ed esterni per le automobili di fascia medio-bassa.

Essendo il polipropilene il fulcro di tale studio, i prossimi paragrafi saranno dedicati proprio a questo polimero e alla descrizione delle sue principali caratteristiche, proprietà e utilizzi.

3.1. Il polipropilene

Il polipropilene è un polimero termoplastico di vastissimo utilizzo il cui monomero è il propilene.

Prima di descrivere dettagliatamente il polipropilene è bene presentare brevemente le principali caratteristiche del propilene.

Il **propilene** (chiamato dalla IUPAC propene) è un idrocarburo alifatico insaturo avente formula bruta C_3H_6 . Per capire come questi atomi sono disposti nello spazio risulta particolarmente interessante presentare la formula di struttura:

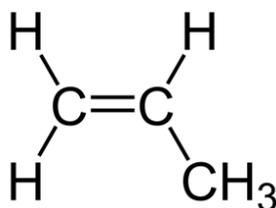


Figura 25: Formula di struttura del propilene.

La presenza del doppio legame tra i due atomi di carbonio la rende una molecola particolarmente reattiva infatti sarà proprio grazie alla rottura di tale legame che si origina il polipropilene. Oltre a formare questo composto, è ampiamente utilizzato nell'industria chimica per produrre svariati composti chimici organici come ad esempio l'acetone. Tra le caratteristiche tipiche di tale idrocarburo possiamo ricordare:

- alta infiammabilità;
- poco solubile in acqua;
- a temperatura e pressione ambiente si presenta come un gas incolore e quasi inodore.

Il **polipropilene (PP)** come già accennato si ottiene dalla polimerizzazione del propilene. Tale processo può essere schematizzato nel seguente modo:

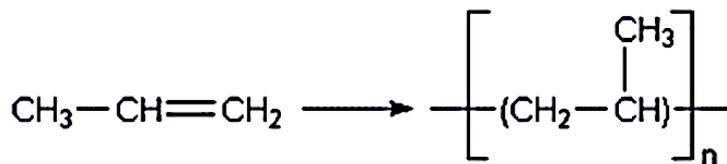


Figura 26: Propilene a sinistra, polipropilene a destra.

La presenza di un gruppo metilico CH_3 laterale alla catena origina un fenomeno di stereoisomeria, difatti, in base alla disposizione nello spazio di tale gruppo si possono avere tre diversi isomeri del PP:

- PP isotattico: i gruppi metili si trovano tutti dalla stessa parte della catena. Il materiale è prevalentemente cristallino, grazie alla sua regolarità spaziale della catena e quindi presenta buone proprietà di resistenza meccanica.

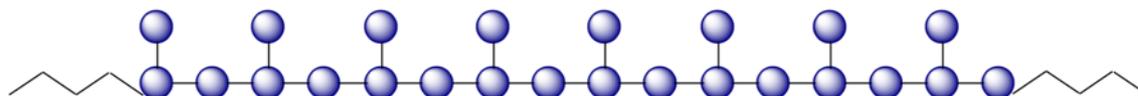


Figura 27: Polipropilene isotattico.

- PP sindiotattico: i gruppi metili sono alternati rispetto alla catena polimerica. Il materiale ha caratteristiche intermedie tra l'isotattico e l'atattico.

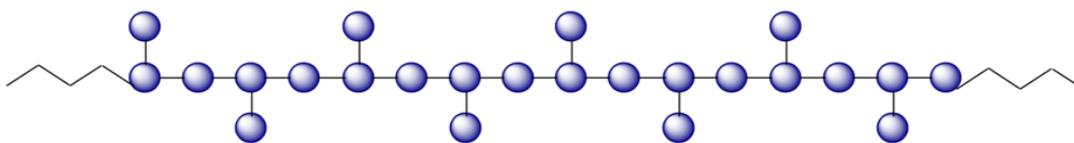


Figura 28: Polipropilene sindiotattico.

- PP atattico: i gruppi metili sono disposti casualmente. Il materiale è prevalentemente amorfo a causa della irregolarità spaziale della catena e quindi risulta soffice e gommoso, privo di resistenza meccanica.

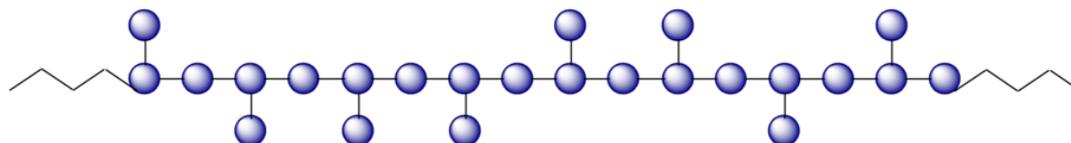


Figura 29: Polipropilene atattico.

In una normale polimerizzazione radicalica si ottiene il PP atattico. Nel 1953 lo svizzero Ziegler e l'italiano Natta proposero un nuovo tipo di polimerizzazione, che avviene in presenza di particolari catalizzatori a base di $TiCl_3$ e $Al(C_2H_5)_3$, detti catalizzatori stereospecifici o di Ziegler-Natta. Si forma così un complesso catalitico sul quale avviene la polimerizzazione: a causa della particolare struttura del complesso, i diversi monomeri di propilene si possono attaccare alla catena in crescita solo se presentano il metile lontano dal complesso e quindi sempre dalla stessa parte. Tali catalizzatori permettono quindi un controllo stereochimico sulla polimerizzazione ed il risultato è la formazione del PP isotattico, con una elevata percentuale di cristallinità, adatto alla produzione di svariati oggetti e noto con il nome commerciale di Moplen.

Per capire il grosso impatto che ebbe questa scoperta nel campo dei polimeri, basti pensare che nel 1963 fu conferito il premio Nobel per la chimica a Giulio Natta, ancora oggi l'unico italiano a ricevere quest'onorificenza per la chimica in Italia.

Il prodotto più interessante dal punto di vista commerciale è proprio quello isotattico che è un polimero semicristallino caratterizzato da un elevato carico di rottura, una bassa densità, una buona resistenza termica e all'abrasione. Il fatto che sia resistente alle alte temperature permette la sterilizzazione dei manufatti prodotti con questo materiale. La configurazione isotattica garantisce inoltre una buona resistenza meccanica, in particolare a flessione e distorsione ripetuta. In molte applicazioni viene utilizzato poiché è un buon isolante elettrico e ha una buona resistenza chimica.

Una nota a suo demerito è costituita dall'alta infiammabilità, se confrontato con gli altri polimeri (derivante dal fatto che il suo monomero è altamente infiammabile). Un'utile misura dell'infiammabilità delle materie plastiche è l'indice di ossigeno limitante (LOI), che denota la frazione volumetrica di ossigeno in una miscela ossigeno-azoto che supporta solo la combustione di un campione ben definito in condizioni standard. Un LOI elevato indica una bassa infiammabilità. Seguono i valori LOI per le plastiche più importanti, riportati per poter comparare il PP con gli altri polimeri:

Polyoxymethylene	15.5
Polyethylene	17.3
Poly(methyl methacrylate)	17.5
Polypropylene	17.6
Polyurethane	17-19
Polystyrene	18.0
Unsaturated polyester	18.5
ABS	18-19
Epoxy resin	19.0
PBT	21.5
Polyamide 12	21.6
PETP	22.0
Polycarbonate	23-25
Polyamide 6	23-26
PVC, flexible	24-25
Poly(phenylene oxide) - polystyrene	24-25
Polyamide 66	24-26
PVC, rigid	40-45
Polytetrafluoroethylene	95.0

Tabella 2: Valori di LOI per le plastiche più importanti.

Per ovviare a questo problema spesso vengono aggiunti additivi ritardanti di fiamma che produrranno un aumento del LOI.

Ultima caratteristica tipica di tale materiale, ma non per questo di scarsa importanza, è la possibilità di poter essere riciclato, il che riduce di molto il costo di produzione.

In generale si può affermare che, per gli omopolimeri di PP, le prestazioni meccaniche e ottiche sono determinate da:

- La massa molecolare media e la distribuzione della stessa;
- La struttura della catena, cioè la presenza di difetti e le differenti isomerie;
- Additivi nucleanti.

Tutte queste caratteristiche sopra elencate hanno fatto sì che nel corso degli anni la produzione annua di polipropilene sia sempre aumentata e continui ad aumentare tuttora. Osservando il seguente grafico si può notare come dagli anni 80' in poi la sua produzione ha avuto un brusco aumento sovrastando, negli ultimi anni, tutti gli altri polimeri.

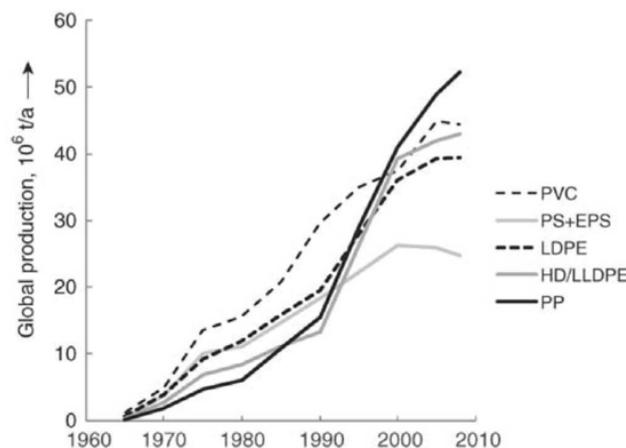


Figura 30: Volumi di produzione annua per i principali polimeri termoplastici.

Per superare quelli che sono i punti deboli del polipropilene puro isotattico, spesso si aggiungono degli additivi, oppure si combinano le catene di propilene con altre catene di monomeri puri (come ad esempio l'etilene) ottenendo dei polimeri composti (PP+PE in questo caso), ai quali si possono aggiungere ulteriori additivi.

3.1.1. Copolimeri etilene-propene random (EP-RACOs)

Simile alla variazione di densità e di proprietà meccaniche nel passaggio da polietilene ad alta densità (HDPE) al polietilene lineare a bassa densità (LLDPE), le caratteristiche meccaniche del PP possono essere modificate già nella fase di polimerizzazione proprio come nel caso del polietilene.

Una classica modifica apportata al polipropilene omopolimero è quella di incorporare una certa quantità di etilene all'interno della catena principale; questo può essere schematizzato come segue:

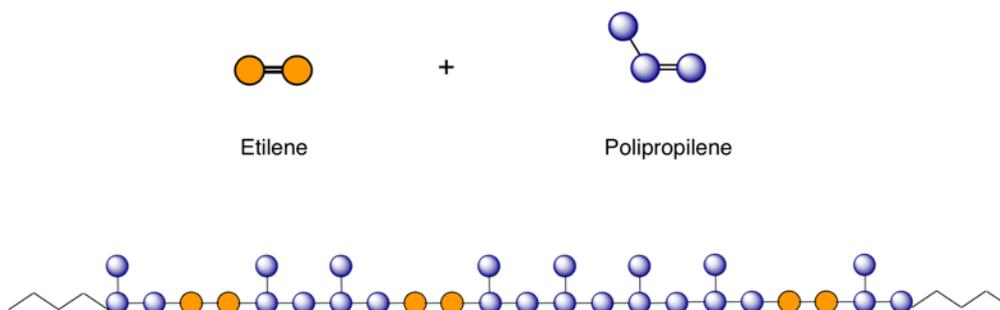


Figura 31: Esempio di Polimero ottenuto mescolando l'Etilene e il polipropilene.

Per esempio, l'incorporazione di circa il 2-5% in peso di etilene nella catena di polipropilene abbassa la cristallinità complessiva, fornendo così un intervallo di rammollimento più ampio con punti di fusione ridotti (vedi figura 32). Inoltre, abbassa la temperatura di transizione vetrosa, aumenta la frazione di polimero solubile e migliora la trasparenza e la brillantezza superficiale.

I **copolimeri etilene-propene random** (EP-RACOs) sono un po' più duri degli omopolimeri e non mostrano il familiare comportamento di sbiancamento da sforzo dei copolimeri più duri. Questi cambiamenti per gli EP-RACOs sono determinati dalla quantità di co-monomero e dalla sua distribuzione lungo la catena, con differenze significative dovute al tipo di catalizzatore e di donatore.

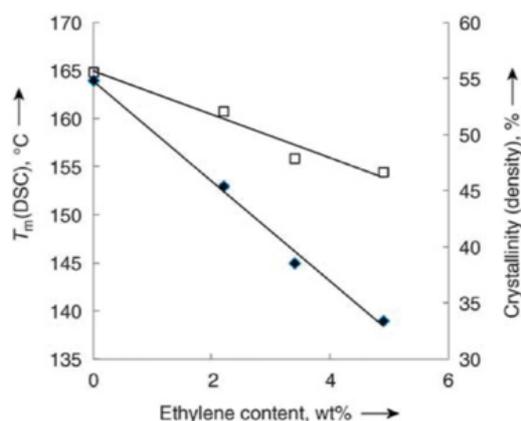


Figura 32: Variazione della T di fusione e della % di cristallinità al variare del contenuto percentuale in peso dell'etilene.

Tutti i cambiamenti nelle proprietà meccaniche e ottiche sono dovuti alla riduzione della velocità di cristallizzazione e ad una diminuzione dello spessore lamellare grazie all'introduzione nella catena dei difetti legati al co-monomero. Questo, si traduce anche in una migliore temprabilità delle EP-RACO, rendendole materiali ideali per film cast altamente trasparenti, dove anche l'ampio intervallo di fusione è ritenuto un vantaggio.

3.1.2. Copolimeri ad impatto in PP/copolimeri eterofasici (EP-HECOs)/TPO

Commercialmente PP è disponibile in diverse forme, a seconda delle proprietà desiderate. Con l'aggiunta di una fase elastomerica la resistenza agli urti del materiale alle basse temperature è aumentata; l'entità della variazione dipende dal tipo, dalla quantità e dalla morfologia della fase elastomerica, mentre la matrice polipropilenica ne determina la rigidità.

La spiegazione fisica di tale miglioria è che il copolimero disperso dissipa l'energia durante l'impatto, aumentando quindi la tenacità del materiale.

Questi materiali generalmente sono formati da una matrice cristallina di polipropilene che incorpora particelle di gomma etilene-propene (EPR), dalle quali dipenderà la resistenza agli urti e alle basse temperature. La corretta denominazione di tali composti è copolimeri ad impatto eterofasici (EP-HECOs) o semplicemente copolimeri ad impatto PP.

Generalmente tali copolimeri multifase sono ottenuti da impianti di polimerizzazione aventi almeno due reattori in serie. Nel primo reattore viene infatti realizzata la matrice polipropilene isotattico, mentre il secondo produce un copolimero elastomerico etilene-propene (EP).

Da un confronto rapido si può affermare che il copolimero random EP-RACO è responsabile del mantenimento di buone prestazioni alle alte temperature e di un'adeguata rigidità, mentre il EPR/PE favorisce una buona tenacità. A seconda della composizione del componente EPR, la temperatura di transizione vetrosa può scendere fino a meno 60°C, con un conseguente miglioramento delle prestazioni agli urti a temperature inferiori allo zero.

La quantità massima di EPR/PE che può essere contenuta nel granulo polimerico senza causare appiccicosità sembra dipendere principalmente dalla porosità della particella del catalizzatore.

Dal seguente grafico si può osservare come aumentando la quantità di EPR presente all'interno del polimero, diminuisca il modulo di trazione ma allo stesso il materiale cambia il suo comportamento passando da fragile a duro.

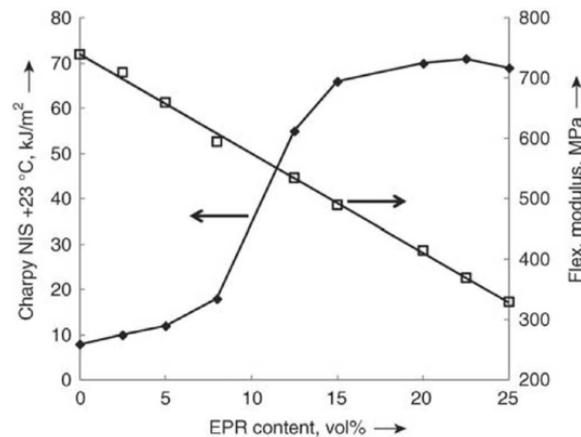


Figura 33: Effetti della concentrazione di EPR sul modulo a flessione e sulla tenacità.

Un'estensione o addirittura un'alternativa alla polimerizzazione multistadio con la produzione di EPR può essere l'aggiunta di elastomeri esterni.

I copolimeri EP ad impatto hanno trovato vasta applicazione nel settore automobilistico, sia per le finizioni interne che per gli elementi esterni. Le applicazioni esterne automobilistiche sono iniziate con finiture laterali e gradini delle portiere, sono progredite in paraurti e, ora includono parafanghi e altre parti della carrozzeria.

Uno dei più antichi campi di applicazione del PP nel design automobilistico è il segmento sotto il cofano, dove i condotti dell'aria, i contenitori delle batterie e i contenitori dei fluidi erano già prodotti a partire dagli omopolimeri in PP negli anni '60. L'innovazione più recente in questo segmento sono i collettori di aspirazione dell'aria in PP rinforzato con GF, che sostituiscono il PA-6 rinforzato con GF con vantaggi in termini di assorbimento dell'acqua e smorzamento del suono. Per l'utilizzo del PP nel settore automotive, risulta di fondamentale importanza curare la struttura interna del polimero poiché da questa dipenderà la finitura superficiale del componente.

Riassumendo il tutto si può dire che nel settore automobilistico, i materiali di base per i compositi sono copolimeri ad impatto EP con un contenuto di EPR del 20-30% in peso e spesso una matrice ad alta cristallinità, e le prestazioni meccaniche sono ulteriormente bilanciate da elastomeri esterni e rinforzi minerali. Tali materiali così composti prendono il nome di elastomeri termoplastici olefinici o più brevemente TPO (thermoplastic polyolefin). Tali materiali sono quindi composti:

- Polimero termoplastico come il polipropilene o il polietilene;
- Riempitivi (tra i più comuni talco, fibre di vetro e fibre di carbonio);
- Elastomeri come la gomma etilene propilene (EPR), EPDM (gomma EP-diene), etilene-octene (EO), etilbenzene (EB) e stirene etilene-butadiene stirene (SEBS).

3.2. Il talco come additivo minerale per il polipropilene

Il talco puro risulta essere il più morbido di tutti i minerali con una durezza Mohs pari a 1, è inoltre un minerale idrorepellente e chimicamente inerte. È caratterizzato da una lamina di magnesio silicato idrato e ha come formula chimica: $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$.

Osservando nel dettaglio la struttura del talco, si può affermare che è costituito da uno strato o foglio di brucite ($Mg(OH)_2$) inserito tra due fogli di silice (SiO_2), come si può evincere dalla seguente figura:

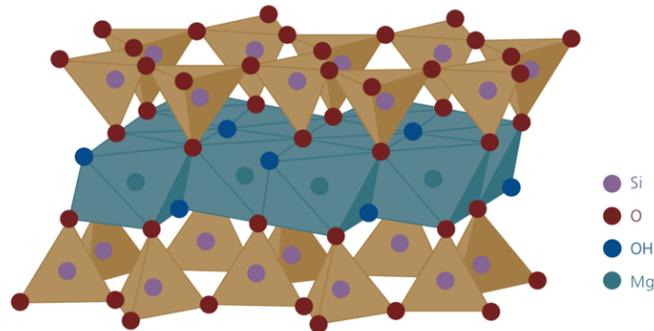


Figura 34: Struttura 3D del talco.

Il reticolo cristallino di tale minerale è tenuto insieme dai deboli legami di Van der Waal, i quali, possono essere rotti molto facilmente rendendo così il minerale altamente reattivo e pronto a formare nuovi legami con i polimeri.

Il termine "talco" copre una vasta gamma di prodotti, ma i più diffusi nell'industria delle materie plastiche sono fondamentalmente due, ovvero quello puro e quello lamellare (platy).

Il talco maggiormente utilizzato è quello lamellare, ma il suo rapporto d'aspetto, ovvero il rapporto tra le due dimensioni principali del singolo cristallo, può variare considerevolmente. Maggiore sarà questo rapporto d'aspetto, maggiore sarà l'incremento delle proprietà che il minerale fornirà al polimero.

Nel settore delle materie plastiche, viene utilizzato per irrigidire principalmente i termoplastici, come il polipropilene, ma anche il polietilene e la poliammide (nylon). Le principali applicazioni sono componenti automobilistici, applicazioni domestiche e plastiche ingegneristiche.

Di seguito verrà analizzata nel dettaglio la variazione di alcune tra le principali proprietà meccaniche, in base alla quantità di talco aggiunto al polimero e al variare del rapporto d'aspetto dei cristalli del minerale.

1. Rigidezza in termini di modulo elastico a trazione

Il motivo principale per cui si aggiunge il talco nella plastica è per aumentare la rigidezza e in particolare il modulo elastico. Tale incremento ovviamente dipenderà dal quantitativo di minerale aggiunto, dal rapporto d'aspetto e dalla finezza del talco come si può osservare dalla seguente figura:

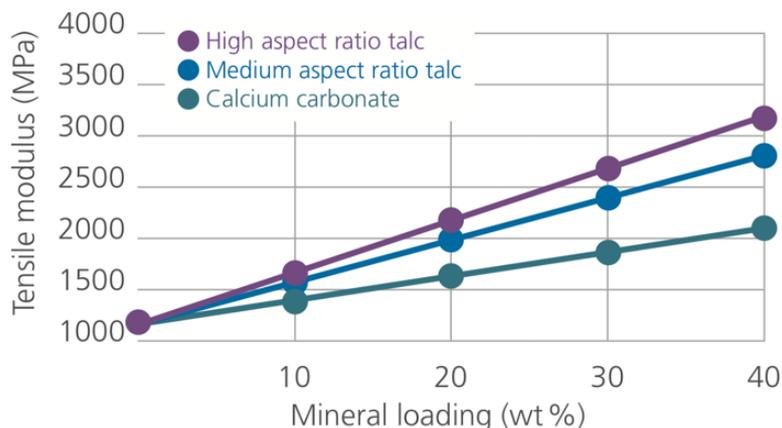


Figura 35: Variazione del modulo elastico in base alla percentuale in peso di talco e al rapporto d'aspetto.

2. Conducibilità termica

Grazie alla maggiore conducibilità termica del talco (rispetto al polimero), il calore introdotto e generato durante la lavorazione viene trasmesso più rapidamente attraverso la miscela.

L'incorporazione del talco in un composto aumenta la conducibilità termica, con conseguente aumento del tasso di produzione dovuto proprio al fatto che viene accelerato il processo di raffreddamento nello stampo che, come già spiegato precedentemente, è proprio la fase più delicata dalla quale dipenderà la struttura interna del materiale.

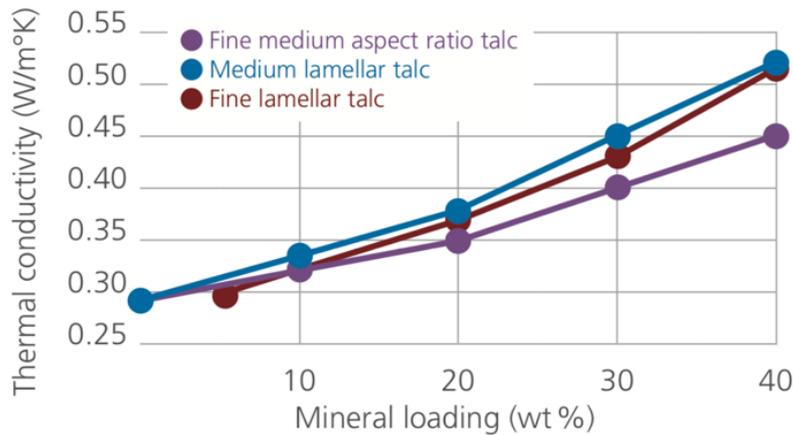


Figura 36: Variazione della conducibilità termica al variare della percentuale in peso di talco e al rapporto d'aspetto.

3. Nucleazione dei cristalli

La cristallizzazione del polipropilene è favorita inserendo nel composto già in fase di produzione piccole quantità di talco, preferibilmente fine, che fungerà da agente nucleante. L'inserimento del talco, anche in piccole quantità, favorirà l'inizio della cristallizzazione a temperature più elevate, se paragonato al PP non riempito. Si nota anche un miglioramento della resistenza all'urto dovuto principalmente all'aumento del grado di cristallizzazione del PP e non alle proprietà meccaniche del talco stesso.

Per lo stesso motivo si assisterà anche a un incremento del modulo di elasticità come si può evincere dai seguenti grafici:

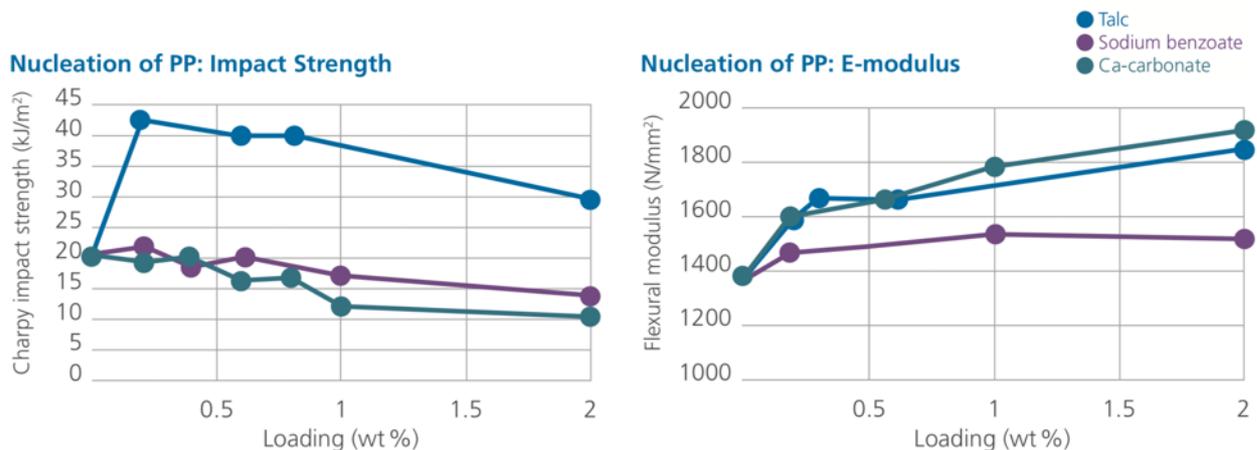


Figura 37: Variazione dell'energia assorbita a impatto e del modulo a flessione al variare della percentuale in peso di talco.

4. Resistenza a impatto

L'aggiunta di cariche minerali in generale non migliora la resistenza agli urti. L'unica eccezione è costituita proprio dalla produzione di paraurti delle automobili, in cui l'aggiunta di talco nei composti PP, in quantità intorno al 5/10% in peso, produce un aumento della resistenza all'urto. Come si può osservare dal grafico infatti, se si continua ad aumentare la carica di talco, la resistenza ad impatto incomincia a diminuire.

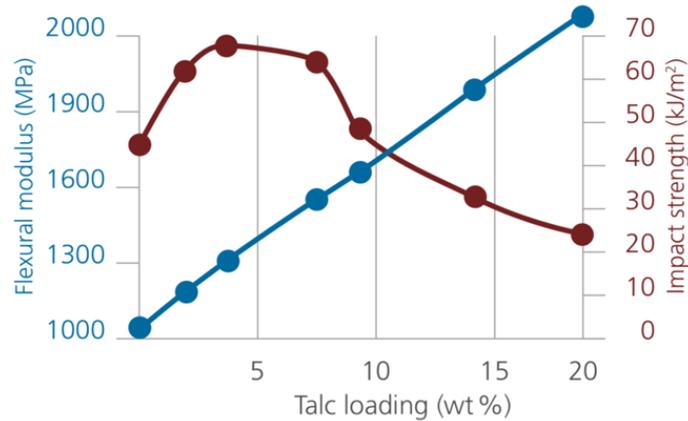


Figura 38: Variazione del modulo flessionale e dell'energia assorbita a impatto in base alla percentuale in peso di talco.

5. Temperatura di deformazione

In molte applicazioni, come nel caso di componenti plastici prodotti per gli imballaggi o per il settore automotive, è richiesta una buona rigidezza a temperature elevate. La temperatura di distorsione termica (HDT) è fortemente influenzata dalla presenza del talco e dalle cariche minerali in genere, difatti l'aggiunta di tali additivi, provoca in ogni caso un aumento della temperatura alla quale il polimero inizia a deformarsi. Il talco lamellare con un elevato rapporto di aspetto, come si può osservare dal seguente diagramma, ha un effetto ancora più benefico sulla temperatura di deflessione, infatti incrementa maggiormente tale temperatura rispetto al talco fine.

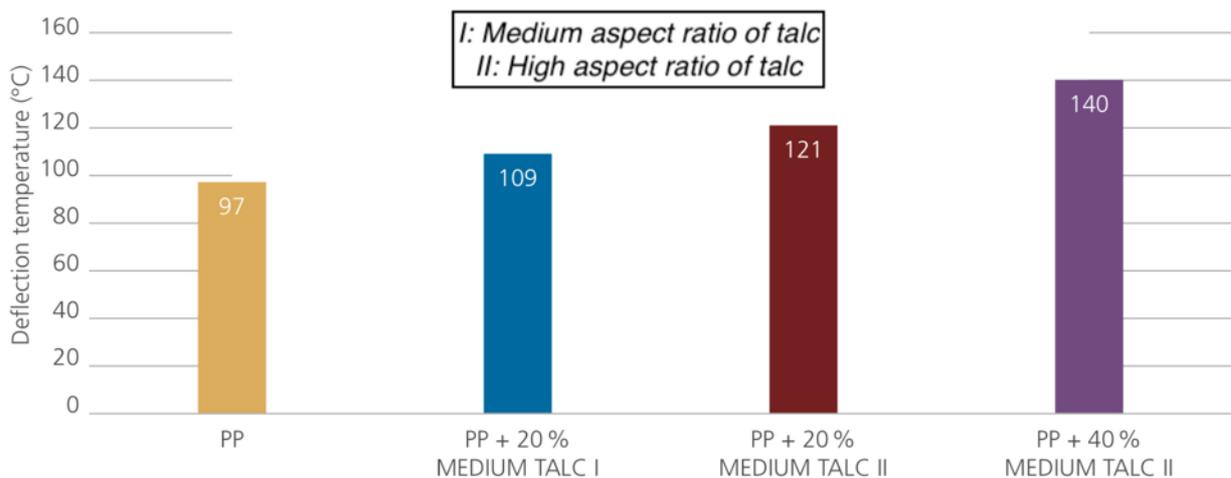


Figura 39: Variazione della temperatura di distorsione termica al variare della percentuale in peso di talco e al rapporto d'aspetto

Per concludere questo paragrafo si può affermare che, in generale e se aggiunto in basse concentrazioni (meno del 3 % in peso), il talco agisce come agente nucleante, riducendo le dimensioni della sferulite e accorciando i tempi di lavorazione. A carichi più elevati (dal 10 al 40% in peso) agisce come riempitivo di rinforzo, aumentando il modulo di trazione e la rigidità, ma riducendo la resistenza alla rottura e all'urto.

Nel settore automobilistico è ampiamente utilizzato come additivo per il polipropilene in quanto tale polimero ha già di per sé una buona resistenza agli urti e lavorabilità, quindi la diminuzione della resistenza a impatto dovuta all'introduzione del talco, è accettata come compromesso per poter aumentare tutte le altre caratteristiche meccaniche.

4. METODI SPERIMENTALI

4.1. Piano prove e reperimento provini

Sono stati valutati gli andamenti di diverse proprietà meccaniche e non, tipiche dei polimeri al variare delle ore di invecchiamento. Tra queste si ricordano: modulo elastico a flessione e a trazione, energia assorbita a impatto, coefficiente di smorzamento del materiale, l'andamento della densità e la resistenza al fuoco.

Le varie prove sperimentali sono state ripetute ogni 200 ore di invecchiamento al fine di constatare e monitorare la variazione delle proprietà analizzate. I provini rappresentativi del materiale sono stati ottenuti a partire da componenti automobilistici interni e esterni, prodotti dalla stessa azienda:

- PP puro è stato ricavato da un pannello che riveste il bordo del bagagliaio;
- PP TD 10 (caricato con talco al 10%) ottenuto da un rivestimento del montante A;
- PP TD 30 (caricato con talco al 30%) ricavato da una modanatura parafrangente.

Le dimensioni dei provini sono state scelte in quanto indicate nella normativa della prova di impatto tramite pendolo Charpy e perché si è verificato che possano andar bene anche per la prova di trazione, in quanto sono in grado di garantire la lunghezza minima del tratto compreso tra le due morse, pari a 60 mm. Anche per quanto riguarda i provini sottoposti alla resistenza al fuoco, sono stati meccanizzati in modo tale che le dimensioni rispettassero la normativa.

Nella seguente tabella, sono riportati il numero di campioni necessario per ogni prova e il conseguente numero totale di provini meccanizzati:

MATERIALE	TEMPO DI INVECCHIAMENTO (h)	NUM. PROVINI PER CIASCUNA PROVA			NUM. TOTALE PROVINI
		TRAZIONE	CHARPY	RES. FUOCO	
PP	0	3	3	1	42
	200	3	3	1	
	400	3	3	1	
	600	3	3	1	
	800	3	3	1	
	1000	3	3	1	
PP TD 10	0	3	3	1	42
	200	3	3	1	
	400	3	3	1	
	600	3	3	1	
	800	3	3	1	
	1000	3	3	1	
PP TD 30	0	3	3	1	42
	200	3	3	1	
	400	3	3	1	
	600	3	3	1	
	800	3	3	1	
	1000	3	3	1	

Tabella 3: Piano prove sperimentali.

4.2. Banco di prova per invecchiamento accelerato agli UV

L'invecchiamento delle tre tipologie di provini è stato effettuato presso lo stabilimento di CSI e il banco di prova è stato allestito in modo tale da essere il più fedele possibile alla normativa che regola questo particolare processo.

Vi sono due normative che regolano l'invecchiamento accelerato dei componenti, queste sono la MIL-STD810G e l'ISO 4892-2. Alla fine, si è optato per la seconda perché, oltre ad essere più idonea alla mia situazione, poteva essere riprodotta in maniera più fedele proprio perché in azienda si disponeva di tutta la strumentazione necessaria; di seguito verrà analizzata nel dettaglio:

La **EN ISO 4892-2**, ha come argomento principale l'invecchiamento dei materiali polimerici tramite le radiazioni UV. Vi sono due differenti procedure che, a loro volta, sono ulteriormente divise in 4 alternative, per un totale di 8 processi diversi. Tutte queste procedure sono riassunte nella seguente tabella:

Method A					
Cycle No.	Exposure period	Irradiance ^a		Chamber temperature °C	Relative humidity %
		Broadband (300 nm to 400 nm) W/m ²	Narrowband (340 nm) W/(m ² ·nm)		
1	102 min dry	60 ± 2	0,51 ± 0,02	38 ± 3	50 ± 10 ^b
	18 min water spray	60 ± 2	0,51 ± 0,02	—	—
2	102 min dry	60 ± 2	0,51 ± 0,02	Not controlled	Not controlled
	18 min water spray	60 ± 2	0,51 ± 0,02	—	—
3	102 min dry	60 ± 2	0,51 ± 0,02	65 ± 3	20 ± 10
	18 min water spray	60 ± 2	0,51 ± 0,02	—	—
4	102 min dry	60 ± 2	0,51 ± 0,02	Not controlled	Not controlled
	18 min water spray	60 ± 2	0,51 ± 0,02	—	—
Method B					
Cycle No.	Exposure period	Irradiance ^a		Chamber temperature °C	Relative humidity %
		Broadband (300 nm to 400 nm) W/m ²	Narrowband (420 nm) W/(m ² ·nm)		
5	Continuously dry	50 ± 2	1,10 ± 0,02	38 ± 3	50 ± 10 ^b
6	Continuously dry	50 ± 2	1,10 ± 0,02	Not controlled	Not controlled
7	Continuously dry	50 ± 2	1,10 ± 0,02	65 ± 3	20 ± 10
8	Continuously dry	50 ± 2	1,10 ± 0,02	Not controlled	Not controlled

Tabella 4: Casistiche della norma EN ISO 4892-2.

Non disponendo della strumentazione per umidificare i provini in modo uniforme e ad intervalli di tempo regolari, si è optato per il metodo B, in cui è previsto che i campioni siano sempre asciutti. Le lampade UV disponibili nell'azienda dove è stata svolta tale attività, sono a banda larga (Broadband), difatti emettono una radiazione UV con lunghezza d'onda compresa tra i 280 e i 400 nm. Come conseguenza si è fatto in modo da avere un'energia per unità di superficie pari a 50 ± 2 W/m². L'energia emessa dalle lampade è costante quindi, l'unico modo per poter controllare la radiazione che raggiunge la superficie dei provini, è regolando l'altezza delle lampade rispetto al piano sul quale sono stati disposti i provini. Un'ulteriore accortezza è stata quella di monitorare la temperatura superficiale dei provini affinché questa sia prossima ai 70°C, da un lato per essere sicuri che non si verifichino fusioni parziali o totali del materiale e dall'altro poiché questa è la temperatura che potrebbero raggiungere i componenti interni della vettura non direttamente esposti al sole; Difatti, i componenti interni dell'autovettura, esposti alla radiazione diretta, possono raggiungere temperature anche superiori ai 100°C (cruscotto e volante per esempio). Un altro aspetto importante da tenere in considerazione è che secondo tale

normativa l'irradianza in qualsiasi punto dell'area utilizzata per l'esposizione dei campioni deve essere almeno pari all'80% dell'irradianza massima.

Come già indicato nel paragrafo precedente ogni 200 ore di permanenza ai raggi UV verranno prelevati un numero ben definito e costante di campioni al fine di valutare l'andamento e il degrado delle proprietà meccaniche. Verranno quindi effettuati 5 prelievi per poter arrivare a un monte ore totali di 1000.

Il banco allestito si presenta come segue:



Figura 40: Banco per l'invecchiamento tramite UV (vista 1).



Figura 41: Banco per l'invecchiamento tramite UV (vista 2).



Figura 42: Banco per l'invecchiamento tramite UV (vista 3).

La strumentazione utilizzata per la realizzazione del banco di prova è la seguente:

- **4 Lampade Osram ULTRA VITALUX 300W 230V E27:**



Figura 43: Lampada Osram ULTRA VITALUX utilizzata come fonte di UV.

si tratta di lampade UV utilizzabili per applicazioni tecniche a funzionamento diretto ovvero senza necessità di un alimentatore esterno. Le principali applicazioni per cui vengono utilizzate sono:

- Simulazione della luce solare;
- Indurimento di collanti;
- Invecchiamento artificiale del materiale;
- Esposizione di rivestimenti fotoresistenti sensibili agli UV.

Di seguito verranno anche riportati i dati elettrici e fotometrici relativi a tali lampade:

Dati elettrici	
Tensione nominale	230 V
Tensione di lampada	230 V
Tensione di costruzione	230,00 V
Corrente di lampada	1,3 A
Potenza nominale	300,00 W
Dati fotometrici	
Potenza irradiata 315 - 400 nm (UVA)	13.6 W
Potenza irradiata 280 - 315 nm (UVB)	3.0 W

- **Termocamera Fluke Ti25:** utilizzata per controllare la temperatura superficiale dei provini al fine di accertarsi che non superi i 70°C.



Figura 44: Termocamera Fluke Ti25.

Specifiche del prodotto:

Dati tecnici	
Sensibilità termica	$\leq 90\text{mK}$
Gamma misure di temperatura	$-20 \rightarrow +350 \text{ }^\circ\text{C}$
Campo visivo H x V	23° orizzontale x 17° verticale
Precisione migliore di misura temperatura	$\pm 2^\circ\text{C}$
Frequenza di aggiornamento	9Hz
Distanza di minima di messa a fuoco	15 (Thermal Lens) cm, 46 (Visual Lens) cm
Risoluzione rilevatore	160 x 120 pixel
Tipo di messa a fuoco	Manuale
Dimensioni display	3.7 pollici
Risoluzione display	640 x 480 pixel

- Il foto/radiometro e termometro **DO 9721 PRODOTTO DALLA DELTA OHM**: è uno strumento utilizzabile per la rilevazione dell'illuminamento, radianza, luminanza e temperatura. DO 9721 è in grado di eseguire misure di illuminamento in lux e in fcd (foot-candle), di irradiazione in W/m^2 e in $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, di luminanza in cd/m^2 e di temperatura in $^\circ\text{C}$ o $^\circ\text{F}$. In questo particolare caso è stato utilizzato sia per rilevare il valore dell'energia per unità di superficie che giungeva in un determinato punto, ovvero dove veniva posto il particolare sensore necessario per misurare tale grandezza, che per misurare la temperatura dell'ambiente in cui sono stati posti i provini.



Figura 45: Foto/radiometro utilizzato più vari sensori.

DATI TECNICI

Ingressi / tipo di misura Connettore	2: fotometriche / radiometriche o temperatura
Range di misura fotometrico	0.1 - 200.000 lux 1 - 20.000 fcd 1 - 2.000.000 cd/m^2
Range di misura radiometrico	$1 \cdot 10^{-3}$ - 2000 W/m^2 0.1 - 200.000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 0.1 - 20.000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Tempo di integrazione	19 ore, 59 minuti, 59 secondi
Nr. Conversioni al secondo	2
Temperatura di lavoro	$-5 \rightarrow +50^\circ\text{C}$
Umidità relativa di lavoro	$0 \rightarrow 90\%$ U.R. (non condensante)

La misura dei W/m^2 è stata ottenuta collegando a tale strumento un sensore specifico per il range di lunghezze d'onda che si vuole analizzare. Nel particolare caso analizzato è stato utilizzato il sensore denominato: **LP 9021 UVA**.

Questa è una sonda radiometrica per la misura dell'irradianza nel campo ultravioletto difatti il suo campo spettrale di misura è compreso tra i 315÷400 nm, con picco a 365 nm. Il suo range di misurazione invece parte da 1 mW/m^2 fino ad arrivare a 2000 W/m^2 .



Figura 46: Sonda radiometrica per la misura dell'irradianza nel campo degli UV.

- **2 termocoppie a stelo e relativo visore:** tali termocoppie sono state utilizzate per monitorare la temperatura dell'ambiente all'interno del quale erano posti i provini. Tali sensori sono stati collocati alla stessa altezza dei provini in modo tale da monitorare con precisione la temperatura dell'aria che lambisce direttamente la superficie dei provini.



Figura 47: Esempio di termocoppia a stelo.

4.3. Test sperimentali

4.3.1. Misura del modulo elastico flessionale in modo non distruttivo

Lo scopo di questa prova è la determinazione del modulo di Young dinamico di un materiale elastico a temperatura ambiente. La norma a cui questa procedura fa riferimento è la ASTM E1876-15.

L'idea si basa sul fatto che tutti i provini avranno delle specifiche frequenze di risonanza meccanica che dipendono dal modulo elastico, dalla massa e dalla geometria del provino. Ne risulta che le proprietà elastiche dinamiche di un materiale possono essere calcolate conoscendo la geometria, la massa e la frequenza di risonanza meccanica di un provino avente una geometria adatta alla prova e costituito da un determinato materiale. Le prime due grandezze sono ottenibili facilmente tramite un calibro e una bilancia di precisione, mentre la frequenza di risonanza fondamentale dei provini la si ottiene eccitandoli meccanicamente tramite dei colpi elastici per mezzo di uno strumento ad impulso.

I vantaggi di tale procedura sono:

- È un test dinamico e non statico, difatti sono sufficienti un numero ridotto di colpi elastici, mentre nel secondo caso si richiede un'eccitazione continua;
- È una prova non distruttiva e quindi può essere usata per provini che successivamente andranno sottoposti ad altri test;
- È sufficiente una minima sollecitazione per poter stimare il modulo elastico quindi la possibilità che si verifichino fratture o microlesioni interne al materiale è molto remota.

Ovviamente tale tecnica presenterà anche dei limiti, tra i quali è opportuno citare:

- La relazione che lega il modulo elastico dinamico con la frequenza di risonanza è valida solo per materiali omogenei, elastici e isotropi;
- Il materiale sottoposto a tale procedura non deve presentare uno smorzamento troppo elevato in quanto ci potrebbe essere il rischio che la vibrazione si estingua prima che il trasduttore possa captare il segnale;
- La presenza di specifici trattamenti superficiali (rivestimenti, lavorazioni meccaniche, rettifica, nervature etc.) può modificare le proprietà elastiche del materiale in prossimità della superficie. Come conseguenza la prova potrebbe fornire dei risultati leggermente falsati che non si verificherebbero nel caso in cui si eseguissero le prove statiche (prove di trazione o compressione), in quanto lo strato superficiale avrebbe un'influenza marginale.
- Questo metodo di prova è limitato a campioni con geometrie regolari (parallelepipedo rettangolare, cilindri e dischi), per i quali sono disponibili equazioni analitiche in grado di mettere in relazione geometria, massa e modulo con la frequenza di vibrazione risonante. Tale prova non risulta quindi appropriata per determinare le proprietà elastiche di materiali che non possono essere fabbricati in tali geometrie.
- Trattamenti dei bordi come smussi o raggi non sono considerati nelle equazioni analitiche. Gli smussi sui bordi difatti, cambieranno la frequenza di risonanza delle barre di prova introducendo errori nei calcoli del modulo elastico dinamico. Sarebbe quindi preferibile che i campioni sottoposti a questa prova non abbiano bordi smussati o arrotondati.
- Per i campioni con superfici grezze o irregolari, le variazioni di dimensioni possono avere un effetto significativo nei calcoli. Per dare l'idea della loro importanza, basti pensare che nel calcolo del modulo elastico dinamico, il valore del modulo è inversamente proporzionale al cubo dello spessore. Conseguentemente è consigliato avere dimensioni uniformi dei campioni e di misurarle nella maniera più precisa possibile.
- Questo metodo di prova presuppone che il campione vibri liberamente, senza restrizioni o impedimenti significativi. I supporti dei campioni devono essere progettati e posizionati correttamente in accordo con le istruzioni dettate dalla normativa in modo che il campione possa vibrare liberamente e nella modalità desiderata.

- La corretta posizione del punto di impulso e del trasduttore è importante per introdurre e misurare il modo di vibrazione desiderato. Le posizioni del punto di impulso e del trasduttore non devono essere modificate in letture multiple; cambiamenti di posizione possono sviluppare e rilevare modi di vibrazione alternativi. Allo stesso modo, la forza usata nell'impatto dovrebbe essere coerente in letture multiple.

Il banco di prova che è stato attrezzato è composto da:

- Impulsore: l'impulso eccitante viene trasmesso colpendo leggermente il provino con uno strumento adatto. Questo attrezzo deve avere la maggior parte della sua massa concentrata nel punto d'impatto e deve possedere una massa sufficiente per indurre una vibrazione meccanica misurabile, ma non così grande da spostare o danneggiare fisicamente il campione. In pratica, le dimensioni e la geometria dell'impulsante dipendono dalle dimensioni e dal peso del provino e dalla forza necessaria per produrre la vibrazione. Nel mio caso è stato utilizzato un piccolo martelletto in acciaio.
- Il trasduttore pickup ha il compito di rilevare le vibrazioni meccaniche provenienti del campione e di trasformare in segnali elettrici; può essere a diretto contatto con il campione o no. I trasduttori a contatto sono comunemente accelerometri che usano metodi piezoelettrici o ad estensimetri per misurare la vibrazione. I trasduttori senza contatto sono generalmente dei microfoni acustici, ma possono anche esser usati metodi laser, magnetici o capacitivi. La gamma di frequenza del trasduttore deve essere sufficiente a misurare le frequenze previste dei campioni di interesse. Una gamma adatta sarebbe da 100 Hz a 50 kHz per i campioni in ceramica più avanzati. La risposta in frequenza del trasduttore nella gamma di frequenza di interesse deve avere una larghezza di banda di almeno il 10 % della massima frequenza libera misurata prima che si verifichi una perdita di potenza di -3 dB. Nel mio caso è stato utilizzato un microfono prodotto dalla PCB Piezotronics (modello 387C20) avente le seguenti caratteristiche tecniche:

CARATTERISTICHE	VALORE (S.I.)
Nominal Microphone Diameter	1/2"
Frequency Response Characteristic	Random Incidence
Sensitivity	50 mV/Pa
Sensitivity (± 1.5 dB)	-26 dB re 1 V/Pa
Frequency Range (± 2 dB)	3.75 to 16000 Hz
Frequency Range (± 1 dB)	7 to 6300 Hz
Lower Limiting Frequency	1.0 to 3.0 Hz
Inherent Noise	16 dB(A) re 20 μ Pa
Dynamic Range (3% Distortion Limit)	137 re 20 μ Pa

Tabella 5: Scheda tecnica del microfono utilizzato.

- Il sistema elettronico è costituito da un condizionatore/amplificatore di segnale, da un analizzatore di segnale e da un dispositivo di lettura della frequenza. Il sistema deve avere un'accuratezza e una precisione sufficiente a misurare le frequenze di interesse con una precisione dello 0,1%. Il condizionatore/amplificatore di segnale deve essere adatto ad alimentare il trasduttore e fornire un segnale amplificato appropriato all'analizzatore di segnale. Il sistema di analisi del segnale è costituito da un dispositivo di conteggio della frequenza e da un dispositivo di lettura. L'azienda nella quale ho svolto la tesi possedeva come sistema di acquisizione LMS Mobile SCM05 a 16 canali con schede di acquisizione v8. Altre caratteristiche tecniche di tale strumento sono: fornisce fino a 102,4 kHz di frequenza di campionamento per canale, con una risoluzione a 24 bit, rapporto segnale/rumore di 105 dB, e una velocità di trasmissione che supera i 2,2 Msps. Tale amplificatore di segnale è collegato ad un computer sul quale c'è installato il software LMS grazie al quale, impostando e settando i

parametri nel modo corretto, si ottiene la frequenza di risonanza di ogni provino. Il grafico di acquisizione in tempo fornito dal software è il seguente:

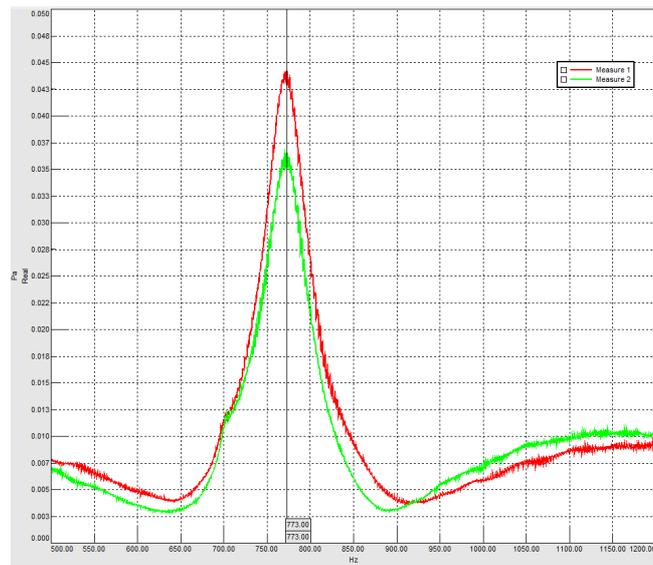


Figura 48: Esempio di acquisizione in tempo registrata.

Le due linee di diverso colore corrispondono a due diverse acquisizioni fatte sullo stesso provino. È stato scelto proprio questo grafico in quanto si può apprezzare quanto sia fedele e ripetibile questo metodo in quanto, i due valori di frequenza di risonanza ottenuti, sono identici.

- Il supporto deve isolare il campione dalle vibrazioni estranee senza limitare le oscillazioni libere dello stesso. I materiali di supporto appropriati possono essere morbidi o rigidi, ma la cosa importante è che siano stabili alla temperatura di prova. Se viene usato un materiale morbido come un elastomero, si deve fare in modo che tali supporti abbiano superfici semplici e piatte su cui il campione possa poggiare. I materiali rigidi invece, come il metallo o la ceramica, devono avere spigoli vivi come coltelli o superfici cilindriche su cui il campione deve poggiare, in modo tale da limitare il contatto del provino con il supporto ad una sola retta. In questo secondo caso, ovvero quello in cui vengono utilizzati dei supporti rigidi, questi devono poggiare su piastre isolanti per evitare che le vibrazioni ambientali vengano captate dal trasduttore.

Di seguito viene riportato il banco di prova da me allestito con tutti i componenti collegati e posizionati correttamente:

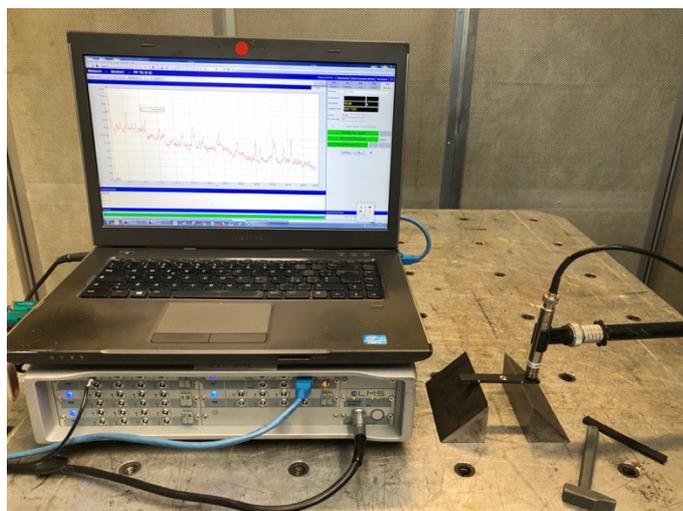


Figura 49: Banco di prova allestito per la misurazione del modulo elastico flessionale.

Come già accennato precedentemente i provini sottoposti a questa tipologia di prova devono avere delle precise geometrie e caratteristiche, ovvero o sezione rettangolare o circolare.

Per un'asta sottile, il rapporto tra lunghezza e dimensione minima della sezione trasversale deve avere un valore di almeno cinque. Tuttavia, per facilitare il calcolo, è preferibile un rapporto di circa $20 \approx 25$. Nel caso in cui presenti una sezione rettangolare, tutte le superfici devono essere piatte. Le superfici opposte per tutta la lunghezza, lo spessore e la larghezza devono essere parallele entro lo 0,1%.

È importante mantenere le tolleranze così basse in quanto, quando questi valori verranno inseriti all'interno della formula per la determinazione del modulo elastico, saranno elevati al quadrato o al cubo e quindi si assisterà ad una forte propagazione dell'errore.

Dopo aver illustrato i contenuti principali della normativa di prova si può passare alla spiegazione della reale procedura che è stata eseguita.

Come prima si sono effettuati tutti i vari collegamenti e sono stati settati i vari parametri; successivamente sono stati posizionati i supporti in acciaio in corrispondenza di quelli che saranno i nodi. I nodi sono localizzati ad una distanza di 0,224 volte la lunghezza del provino dalle estremità libere del campione. Dopo aver determinato la direzione di massima sensibilità del trasduttore, lo si è orientato in tale direzione rispetto al provino, in modo che sia in grado di rilevare la vibrazione desiderata. Nel mio caso è stato utilizzato un trasduttore senza contatto, ovvero un classico microfono da laboratorio. Tale microfono deve essere posizionato su un anti-nodo e, abbastanza vicino al provino da rilevare la vibrazione desiderata, ma non così vicino da interferire con la vibrazione libera.

Infine, il campione è stato colpito in modo leggero ed elastico, al centro del provino e si è ottenuto tramite software il valore della frequenza di risonanza.

I supporti dei campioni, le posizioni degli impulsi e il punto di posizionamento del trasduttore sono scelti in modo da mandare in risonanza il sistema. Per ogni provino sono state effettuate 2 misurazioni della frequenza di risonanza e, solo dopo essersi accertati che questi si trovino entro 1% di errore, verrà fatta la media di queste 2 misurazioni al fine di ottenere il valore della frequenza fondamentale di risonanza che verrà inserito all'interno della formula.

Di seguito è riportato uno schema esplicativo dei punti significativi di tale prova:

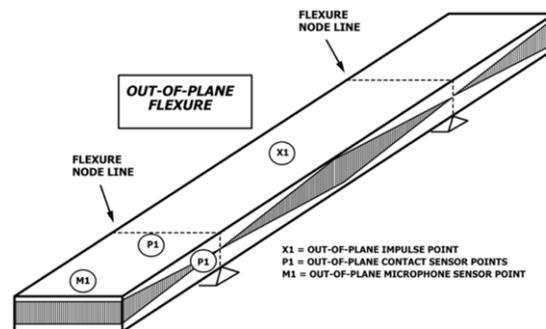


Figura 50: Posizionamento del provino e localizzazione dei punti significativi.

Essendo note le dimensioni del provino in millimetri, la massa dello stesso in grammi e la frequenza di risonanza espressa in Hz, tramite la seguente formula è possibile calcolare il modulo elastico flessionale:

$$E = 0,9465 \left(\frac{m \cdot f_f}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T_1 \quad (4.1)$$

Con:

E = modulo elastico dinamico [Pa];

L = lunghezza del provino [mm];

t = spessore del provino [mm];

b = larghezza del provino [mm];

f_f = frequenza di risonanza fondamentale in flessione [Hz];

T_1 = è un fattore correttivo che nel caso in cui $L/t \geq 20$ sarà possibile ottenerlo tramite la seguente formula:

$$T_1 = \left[1,000 + 6,585 \left(\frac{t}{L} \right)^2 \right] \quad (4.2)$$

4.3.2. Prova di trazione

Il metodo classico per misurare le principali caratteristiche meccaniche dei materiali è la prova di trazione. Grazie a questa prova si otterrà la curva tensione-deformazione attraverso la quale si può estrapolare, direttamente o utilizzando alcune formule, il modulo di Young, il carico di snervamento, la resistenza del provino, ovvero il massimo carico applicabile, la tensione e la deformazione a rottura e la quantità di energia assorbita fino alla rottura.

Come si può evincere dalla seguente figura ci sono due tipi di curve tensione-deformazione:

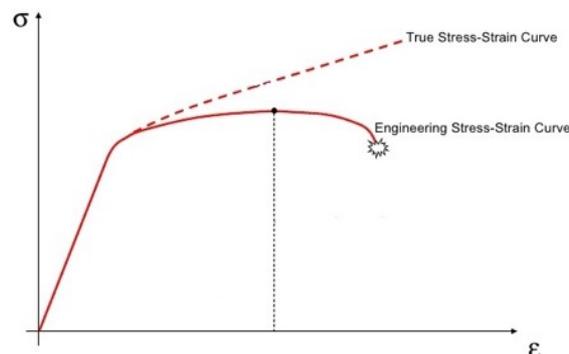


Figura 51: Differenza tra curva ingegneristica e reale.

Generalmente, si lavora con la curva ingegneristica perché è più facile da ricavare e perché da questa si può facilmente ottenere quella reale, se necessario.

La diminuzione delle sollecitazioni ingegneristiche oltre il punto di massima tensione, si verifica a causa della definizione stessa delle sollecitazioni ingegneristiche infatti, per calcolare tali sollecitazioni, si divide il carico applicato ad ogni istante per l'area originale A_0 . Questo non è un valore preciso perché l'area cambia continuamente a causa della strizione, difatti, osservando l'andamento della curva reale, si nota come la sollecitazione reale continui ad aumentare, in quanto il carico è diviso per la sezione reale che è più piccola di quella iniziale.

Con lo stress ingegneristico il massimo che si raggiunge in termini di carico è solo un massimo apparente perché, considerando che ad un certo punto la sezione inizia a ridursi, non sarà necessario applicare un carico così alto per deformare il campione, in quanto la sezione resistente residua sarà sempre minore.

Si deve tener presente il fatto che i valori di carico ottenuti dal macchinario a fine prova, non sono direttamente utilizzabili per generare il grafico tensione deformazione, proprio perché nel grafico andrà inserita la tensione applicata e non il carico. Lo sforzo lo si otterrà, normalizzando il carico con la sezione trasversale iniziale del campione (larghezza moltiplicata per lo spessore) in quanto, in una semplice prova di trazione, il carico applicato è mono assiale. L'unità di misura risultante della sollecitazione sarà N/mm^2 ovvero Mpa:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (4.3)$$

Come si può notare dalla formula, al denominatore si inserisce S_0 che, come già accennato, rappresenta la sezione iniziale del campione la quale verrà considerata costante nonostante sia soggetta a variazioni nel corso della prova.

Invece, per quanto riguarda la deformazione, quella fornitaci dal macchinario di prova è proprio quella cercata, difatti è calcolata in automatico dalla macchina fornendoci semplicemente il valore del tratto di provino compreso tra i due afferraggi (l_0):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.4)$$

Come si può evincere dalla formula, la deformazione è definita come il rapporto tra la variazione della lunghezza e la lunghezza iniziale del campione. Essendo un rapporto di due quantità aventi la stessa unità di misura, risulta essere una quantità adimensionale.

Una cosa importante da sottolineare è che la prova è stata condotta a temperatura ambiente e che, il macchinario da me utilizzato, aveva come traversa mobile solo quella superiore la quale si muoveva verso l'alto a velocità costante e pari a 10mm/min, ponendo così in trazione il provino.

Una volta ottenuta la curva tensione-deformazione, come già accennato, si possono determinare diversi parametri come il modulo elastico che quantifica la rigidità del materiale, la resistenza che sarà la parte più alta della curva, la duttilità e il carico di rottura. Nel nostro caso però, essendo interessati solo al modulo elastico, non si è portato a rottura il provino in quanto, per determinare tale grandezza, si ha bisogno solo e soltanto del tratto in cui la deformazione è ancora di tipo elastico. È ben noto infatti, che il modulo elastico corrisponde al coefficiente angolare della retta tangente alla curva tensione-deformazione nel tratto iniziale. Per poterlo calcolare in maniera univoca nel corso di tutte le prove, ci si è attenuti alla norma EN ISO 527 che illustra la metodologia per effettuare una prova di trazione nel campo specifico dei materiali plastici; secondo tale normativa appunto, il modulo elastico può essere calcolato tramite la seguente formula:

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (4.5)$$

Nella quale E è il modulo elastico espresso in MPa, σ_1 è la tensione in MPa misurata per una deformazione ε_1 pari a 0,0005, mentre σ_2 è la tensione in MPa misurata per una deformazione ε_2 pari a 0,0025. Utilizzando questa formula non si fa altro che calcolare il coefficiente angolare della retta compresa tra le due deformazioni, le quali, essendo piccolissime, rientrano sicuro nel tratto elastico.

La strumentazione utilizzata per la prova di trazione è stata:

- Macchina per prove di trazione MTS con traversa superiore mobile mentre quella inferiore fissa. Come velocità di salita della traversa superiore non è stato possibile utilizzare quella raccomandata da normativa per il calcolo del modulo elastico (1 mm/min) a causa dell'elevato numero di campioni da testare; come compromesso è stata scelta una velocità pari a 10 mm/min. Di seguito si può osservare la disposizione del provino tra le morse e come è stato posizionato l'estensimetro:



Figura 52: Posizionamento del provino tra le due morse e dell'estensimetro.

- Cella di carico montata tra la traversa superiore della MTS e le morse, grazie la quale si è ottenuto il valore del carico applicato in ogni momento. Il carico massimo raggiungibile attraverso la cella di carico da me utilizzata è pari a 10 kN.
- Estensimetro MTS (modello: 634.12F-25) il quale è stato fissato nella parte centrale del provino, dove si dovrebbe verificare la maggiore elongazione. Lo strumento in questione è visibile nella figura 52, già posizionato sul provino. Per evitare la rottura dello stesso, in ogni prova deve essere rimosso quando si raggiunge la deformazione di 0,005.

4.3.3. Test di resilienza

In generale, possiamo dire che la differenza principale tra la prova di trazione e la prova d'urto è il tempo e la velocità con cui viene applicato lo stimolo; nella prova d'urto la velocità è molto più alta di quella utilizzata durante la prova di trazione.

La modalità principale con cui si effettua questa tipologia di test è tramite un pendolo che va ad impattare sul provino posizionato su degli appositi supporti. Tra questa tipologia di prove d'impatto abbiamo due diverse alternative, a seconda del modo in cui viene posizionato il campione e in base al modo in cui il pendolo impatta sul campione. Il più usato è il test SHARPY ma esiste anche il test IZOD. La differenza principale tra le due tipologie rimane comunque la disposizione del campione, infatti la prova SHARPY è molto simile alla flessione a 3 punti e quindi il campione sarà solo supportato e non fissato sulla macchina di prova mentre, nel caso dell'IZOD, il campione viene posizionato verticalmente e fissato nella parte inferiore rispetto al pendolo.

Nella seguente foto si può vedere la macchina di tipo digitale, presente nel DIMEAS e utilizzata per tale prova:



Figura 53: Macchinario per prova di resilienza Charpy.

Il principio di funzionamento di entrambe le modalità è lo stesso, infatti, non si fa altro che trasformare l'energia potenziale, dipendente dal peso e dall'altezza alla quale si lascia cadere la massa, in energia cinetica nel momento dell'impatto con il campione.

C'è da dire che con queste due prove non si è in grado di ottenere proprietà intrinseche del materiale cosa che invece succede per la prova di trazione; si possono però ottenere parametri utilizzabili per confrontare diversi materiali o provini dello stesso materiale che però hanno subito diversi trattamenti.

Il parametro principale ottenibile tramite questo tipo di prova è la resistenza all'urto, che rappresenta l'energia che il materiale può assorbire fino a rottura e, quindi, è necessario rompere lo stesso affinché la prova sia valida. Ovviamente, questo parametro dipende fortemente dalla geometria del campione e dalle condizioni di prova infatti, proprio per questo si usa fornire il valore della resistenza ad impatto in J/m^2 proprio per normalizzarlo rispetto alla sezione considerata e per poter quindi ottenere un parametro realmente confrontabile. Per poter ottenere tale valore è stato necessario dividere l'energia in Joule misurata dalla macchina per la sezione trasversale del provino (spessore per larghezza):

$$E_i = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (4.6)$$

Dove E_i rappresenta l'energia assorbita in seguito all'impatto [kJ/m^2], E_c è l'energia cinetica al momento dell'impatto [J], mentre h e b sono le due dimensioni trasversali espresse in mm.

Il pendolo utilizzato è dotato di una mazza che, posta nel punto più alto e, appena prima di esser lasciata cadere, possiede un'energia pari a 15 Joule. Ovviamente tale energia potrà essere variata aggiungendo delle masse supplementari o variando l'altezza del punto di partenza.

Come già detto, per il test di resilienza con il pendolo SHARPY, il campione viene posto sulla macchina senza essere fissato; essendo i provini lunghi 80 mm la normativa prevede che la distanza tra i due supporti debba essere di 62 mm. Inoltre, un'altra accortezza consiste nel fare in modo che il coltello del pendolo impatti esattamente nella metà del tratto di provino compreso tra i due supporti. Non essendo necessario fissare il provino alla macchina, non esiste un modo univoco per disporli e, conseguentemente, potranno essere disposti in modo tale che il coltello del pendolo vada ad impattare o sulla faccia larga 10 mm o su quella più piccola. Con lo scopo di confrontare i vari valori ottenuti dalle varie prove si è fatto in modo di disporre i provini sempre nello stesso modo. Nel mio caso i provini sono stati posizionati sempre nel seguente modo:



Figura 54: Disposizione del provino sui supporti (1).

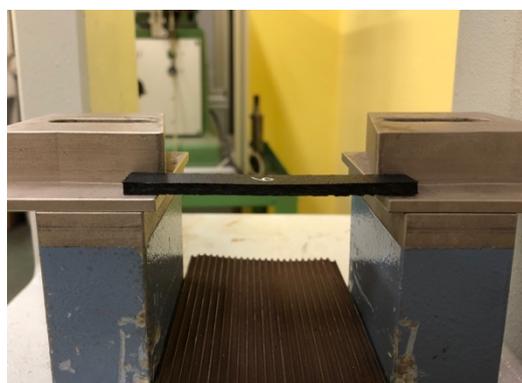


Figura 55: Disposizione del provino sui supporti (2).

Prima di effettuare le vere e proprie misurazioni, all'inizio di ogni sessione di laboratorio è stato necessario effettuare una prova in bianco al fine di stimare l'attrito con l'aria e tra i vari organi meccanici. Ovviamente tale valore andrà poi sottratto da quelle che sono le misure dell'energia assorbita a impatto per tutti i singoli provini. Tutti i provini sono stati testati nel seguente modo:

- Temperatura ambiente;
- Disposizione laterale dei provini;
- Inizialmente si è provato a testare i vari provini senza intaglio; successivamente si è preferito intagliarli in modo tale da poter arrivare a rottura con una minore energia. L'intaglio effettuato presenta una profondità di 2mm. Tale valore dovrà essere sottratto alla larghezza reale del provino, in quanto la sezione resistente residua nel punto di impatto, non sarà più quella di partenza proprio a causa dell'intaglio realizzato.

- L'energia posseduta dal pendolo prima di essere rilasciato variava in base al tipo di campione testato, in quanto con alcuni provini erano sufficienti anche 4 Joule, mentre per altri si è fatto in modo da avere 7 Joule al momento dello sgancio.

In seguito all'impatto del pendolo con i campioni si possono verificare 4 differenti situazioni:

1. Rottura completa nella quale il provino si rompe completamente in due o più pezzi; in questo caso non è detto che il valore leggibile sul display dello strumento indichi sempre e comunque l'energia assorbita a impatto nel modo più rigoroso possibile. Va infatti detto che per essere sicuri di aver ottenuto un valore attendibile si deve verificare che il valore di energia ottenuto, dopo averci sottratto anche le varie dissipazioni dovute all'attrito, sia comunque compreso tra il 10 e l'80% del valore di energia posseduto dal pendolo prima di essere sganciato. Se per esempio si considerasse un'energia di partenza pari a 4 Joule si avrebbe:

$$0,4 \text{ J} < (\text{Energia misurata dallo strumento} - \text{attriti vari}) < 3,2 \text{ J}$$

Solo nel caso in cui venga rispettata tale condizione la prova può ritenersi valida e attendibile. Per risolvere quest'eventuale problematica si deve cambiare il valore di energia iniziale, o variando il punto di partenza del pendolo, oppure riducendo/aumentando le masse ad esso collegate.

2. Senza evidente rottura. In questo caso non compare nessuna forma di rottura e il provino risulta essere solo un po' storto o deformato nel punto in cui poggiava sui supporti e dove è stato colpito dal coltello, con l'eventuale possibilità che compaiano anche delle linee bianche dovute alla deformazione plastica in seguito all'impatto. In questo caso significa che il materiale ha assorbito l'energia deformandosi in modo elastico e plastico ma senza rompersi. Considerando che, il valore ottenuto da una prova in cui non si giunge a rottura non rappresenta la resistenza a impatto del provino, si può o aumentare la massa o l'altezza iniziale del pendolo al fine di avere più energia nell'impatto;
3. Rottura incompleta, nella quale le due parti di provini formatesi in seguito all'impatto rimangono unite sono da una sottile lamina posizionata sul bordo del provino;
4. Rottura parziale in cui si assiste ad una rottura che però non può definirsi né completa né incompleta.

Anche in questi ultimi due casi si dovrebbe incrementare l'energia in modo tale da arrivare a rottura completa (sempre se possibile arrivarci).

Di seguito, una foto in cui si può apprezzare una rottura completa (a sinistra) e una incompleta (a destra):



Figura 56: Esempio di rottura incompleta e completa.

4.3.4. Calcolo del fattore di smorzamento

Lo smorzamento è la capacità che possiede un corpo o un materiale di dissipare energia se sottoposto a una determinata forzante. Lo smorzamento fa sì che il sistema, messo in moto da una forzante, si arresti gradualmente nel tempo. Maggiore è lo smorzamento presente in un sistema meccanico, più breve sarà il tempo di arresto del moto.

Un metodo classico per determinare lo smorzamento, avendo la funzione di risposta in frequenza (FRF), è quello di utilizzare il "metodo dei 3 dB" (detto anche "metodo della mezza potenza").

In una FRF, lo smorzamento è proporzionale all'ampiezza del picco risonante intorno alla frequenza centrale del picco. Osservando tre dB più in basso rispetto al livello di picco, si può determinare lo smorzamento associato.

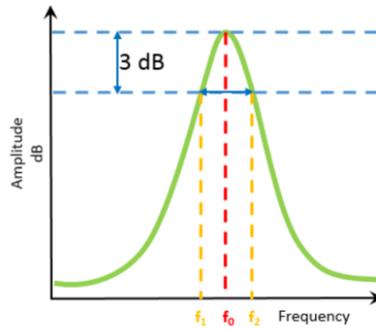


Figura 57: Metodo dei 3 dB.

Tramite questo metodo verrà quindi calcolato il parametro Q , ovvero il “fattore di qualità” oppure “fattore di smorzamento”:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (4.7)$$

dove:

- f_0 = frequenza del picco di risonanza in Hertz;
- f_2 = valore di frequenza in Hertz, superiore a f_0 , in cui si rileva un abbassamento dell'ampiezza di 3 dB rispetto al valore di picco;
- f_1 = valore di frequenza in Hertz, inferiore a f_0 , in cui si rileva un abbassamento dell'ampiezza di 3 dB rispetto al valore di picco.

Lo smorzamento può essere espresso in diverse forme, tra cui "fattore di perdita", "fattore di smorzamento", "smorzamento critico percentuale", "fattore di qualità", ecc. Si noti che, se il valore di una di queste forme di smorzamento è noto, le altre forme possono essere derivate matematicamente.

In questa trattazione verrà tenuta in considerazione la seguente relazione grazie alla quale, conoscendo Q , si può risalire ad altri due parametri che esprimono lo smorzamento:

$$\eta = \frac{1}{Q} = 2\zeta = \frac{\%Cr}{50} \quad (4.8)$$

Dove:

- η = fattore di perdita;
- Q = fattore di smorzamento o fattore di qualità;
- ζ = rapporto di smorzamento;
- $\%Cr$ = smorzamento critico percentuale.

Invertendo la relazione si può calcolare il rapporto di smorzamento ζ e lo smorzamento critico percentuale, che rappresenterà un altro parametro di studio.

Il vantaggio di utilizzare quest'ultimo è che a variazioni importanti del fattore di smorzamento corrispondono piccole variazioni dello smorzamento critico percentuale. Questo per evitare di pensare che lo smorzamento di un materiale stia cambiando tanto quando in realtà non è così.

È da tenere a mente però, che il "fattore di qualità" o "fattore di smorzamento" diminuirà con uno smorzamento maggiore, mentre "fattore di perdita" e "percentuale di smorzamento critico" aumenteranno con uno smorzamento maggiore.

Esempio di calcolo:
 Si parte dall'acquisizione in tempo acquisita in Pascal:

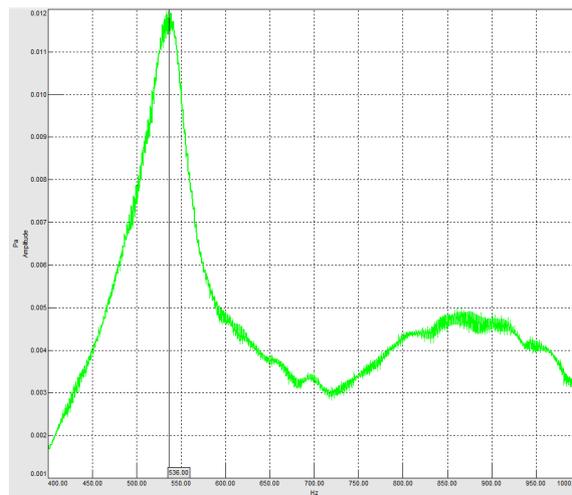


Figura 58: Acquisizione in tempo in Pascal.

Si converte l'acquisizione in dB:

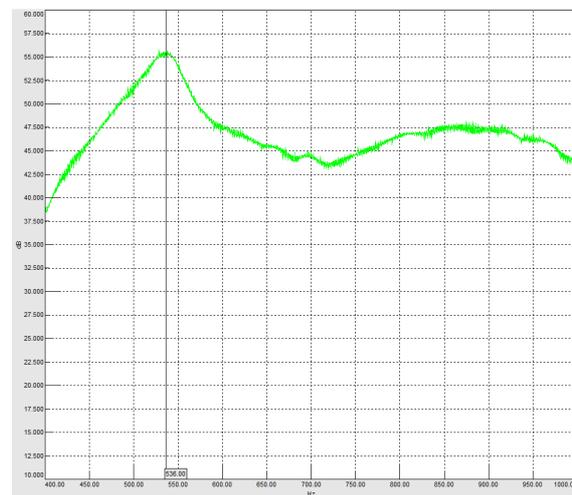


Figura 59: Acquisizione in tempo in decibel.

Zoomando in prossimità della frequenza di risonanza:

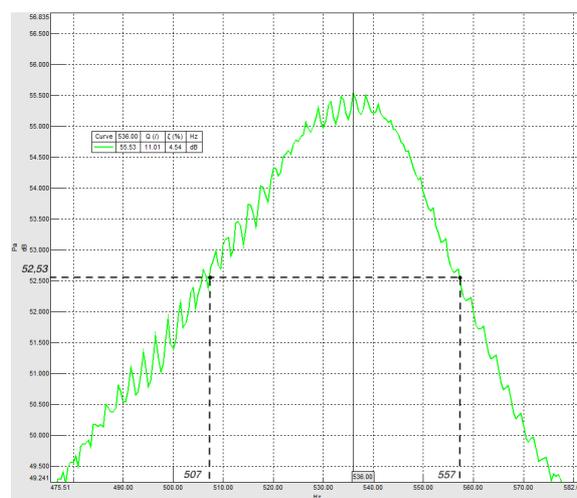


Figura 60: Esempio di calcolo del fattore di qualità.

Ampiezza [dB]	Frequenza [Hz]
55,53	536
52,53	507
52,53	557

$$Q = \frac{536}{557-507} = 10,72 \quad (4.9)$$

$$\zeta = \frac{1}{2 \cdot 10,72} = 0,0466 \quad (4.10)$$

$$\%Cr = 0,0466 \cdot 100 = 4,66\% \quad (4.11)$$

4.3.5. Misura di densità

Le reazioni chimiche generate dall'esposizione dei polimeri alle radiazioni ultraviolette causeranno dei cambiamenti nella struttura e nell'organizzazione delle macromolecole provocando così una variazione della densità dei campioni analizzati.

La densità è stata banalmente valutata dividendo la massa per il volume. La misura della massa è avvenuta tramite una bilancia di precisione presente nel laboratorio di meccanica del Politecnico di Torino. Tramite questo strumento è stato possibile ottenere misure con un'elevata precisione, difatti si è potuto apprezzare fino al decimillesimo di grammo.

La misura del volume dei provini, è stata ottenuta misurando le 3 dimensioni principali tramite un calibro centesimale digitale.

I valori, inizialmente ottenuti in g/mm^3 , sono stati convertiti nelle unità di misura del sistema internazionale, ovvero in kg/m^3 .

4.3.6. Resistenza al fuoco

Un'altra proprietà misurata, al fine di apprezzare la sua variazione in funzione del tempo di invecchiamento, è la resistenza al fuoco. Per poter fare questo ci si è attenuti alla norma 7-G2000: "Determinazione della resistenza alla combustione dei materiali non metallici per particolari interno abitacolo autoveicoli".

I provini da sottoporre a tale test devono essere piani, e con le seguenti dimensioni: 100 mm di larghezza, 350mm di lunghezza e uno spessore inferiore a 13mm.

Nel caso di provette che, data la configurazione dei campioni da cui sono ricavate, non risultino perfettamente piane, si deve controllare con particolare attenzione che in ogni punto lo spessore non sia ≥ 13 mm.

Qualora però, non sia possibile meccanizzare provini con tali dimensioni, a causa della ridotta grandezza del campione originale, è ammessa l'esecuzione della prova su provini più piccoli purché di lunghezza $\geq 150\text{mm}$ e larghezza $\geq 60\text{mm}$.

Nel mio caso i miei provini rispettavano quest'ultime dimensioni, difatti presentavano una lunghezza pari a 176mm, una larghezza uguale a 60mm e uno spessore di gran lunga inferiore ai 16mm imposti da normativa:

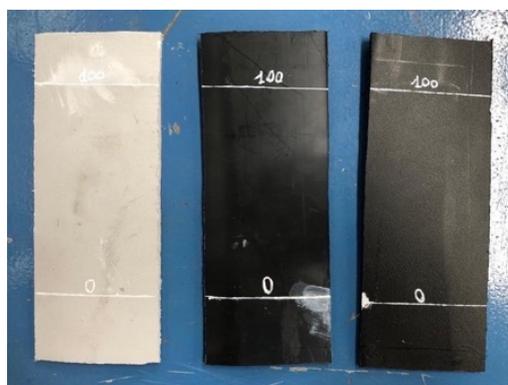


Figura 61: Provini meccanizzati per il test di resistenza al fuoco.

La linea identificata dal numero zero, è stata tracciata ad una distanza pari a 38mm dall'estremità libera del provino in quanto, secondo normativa, questo sarà il tratto nel quale si lascerà stabilizzare la fiamma, in modo tale che nel tratto rimanente, il fronte di fiamma avanzi in maniera regolare.

La prova è stata svolta nel seguente modo:

- ogni provino, indipendentemente dal suo stato (nuovo di produzione, invecchiato, ricavato da componenti già esistenti) è stato condizionato per 24 h alla temperatura di 23 ± 1 °C ed umidità relativa del 50%;
- Si è verificato che all'interno della camera di combustione si abbiano le seguenti condizioni ambientali: temperatura 23 ± 1 °C; umidità relativa 50%;
- Si è acceso il bruciatore, regolato la fiamma e lasciata stabilizzare per $1 \div 3$ minuti;
- Si è posizionata l'estremità libera del provino 19 mm al di sopra del centro del becco del bruciatore e, si è lasciato bruciare quest'ultimo per 15 secondi;
- Il cronometraccio è iniziato quando la fiamma ha raggiunto il primo riferimento, ovvero la tacca identificata col numero zero. Se la fiamma dovesse spegnersi prima che raggiunga tale riferimento, il materiale dovrà essere classificato ininfiammabile o autoestinguente in base a quanto prescritto nel modulo di elaborazione dati;
- Si è terminato il cronometraccio quando la fiamma ha raggiunto l'altra tacca posta a 100mm dalla prima.

La normativa classifica i materiali in base alla loro velocità di combustione. La velocità di combustione espressa in mm/min è stata calcolata con la seguente formula:

$$V_c = 60 \cdot \frac{S}{T} \quad (4.12)$$

Dove:

- S = spazio percorso dalla fiamma in mm;
- T = tempo in secondi impiegato dalla fiamma a percorrere S.

In base al valore di tale parametro, i materiali potranno essere classificati come segue:

- Ininfiammabili: Il materiale brucia solo nella zona lambita dalla fiamma d'innescò e, allo spegnimento della stessa, non sia ha proseguimento della combustione;
- Autoestinguenti: Allo spegnimento della fiamma d'innescò, la combustione procede ma si propaga solo nella zona adiacente a quella lambita dalla fiamma, cioè non raggiunge il primo riferimento di misura posto a 38 mm dall'estremità del provino;
- Autoestinguenti con tempo di spegnimento prefissato: La fiamma supera la tacca di riferimento, ma la combustione cessa entro i 60 s dall'inizio della misura ed il tratto percorso è inferiore ai 50 mm;
- A lenta velocità di combustione: Il materiale brucia con una velocità $V_c < 100$ mm/min;
- Non conformi allo standard U.S.A. 302: Il materiale brucia con una velocità $V_c > 100$ mm/min.

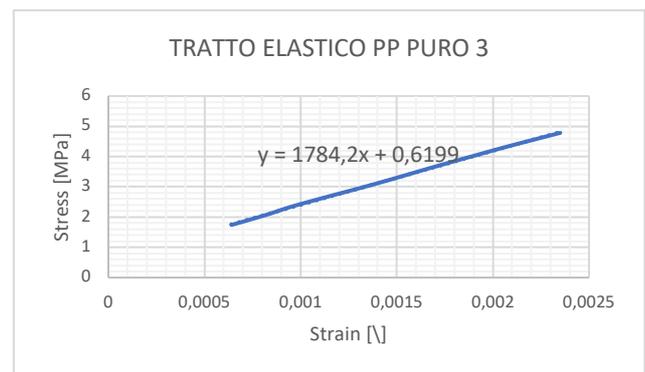
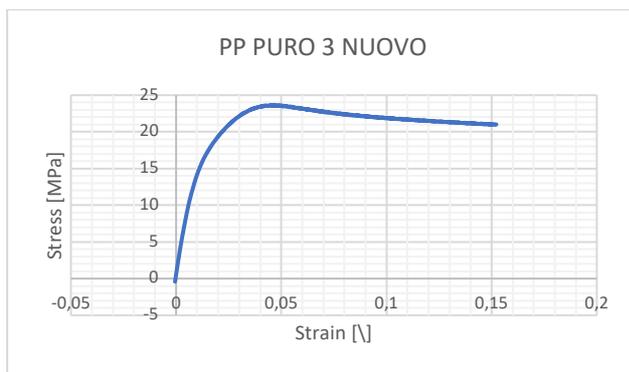
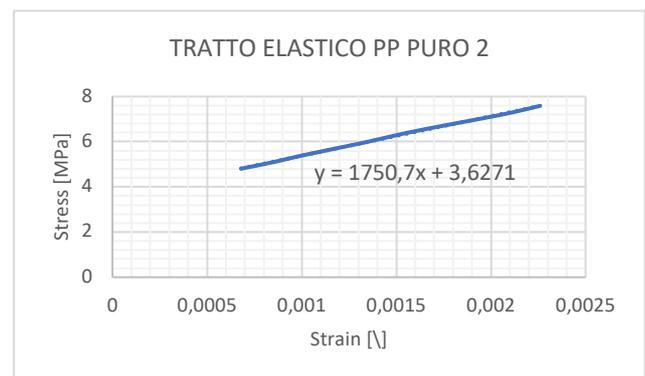
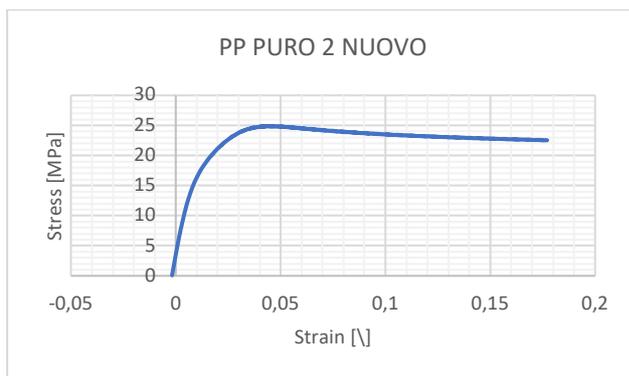
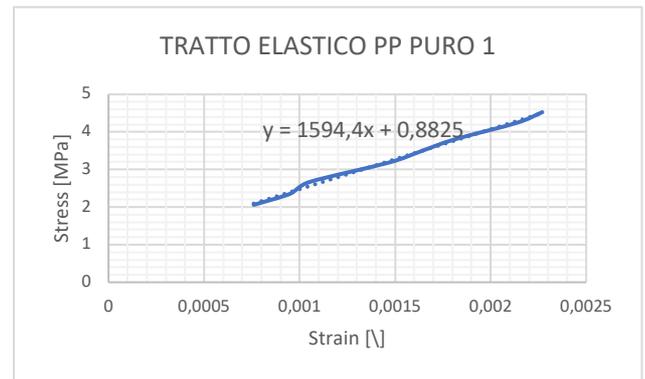
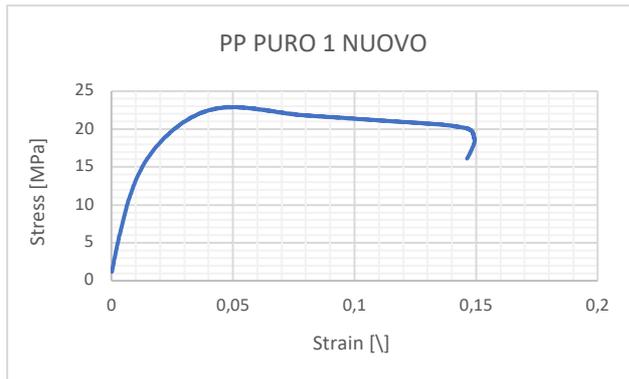
5. ELABORAZIONE DEI DATI E CALCOLO DEI PARAMETRI

In questo capitolo verranno presentati i grafici e calcolati i parametri ottenibili da ciascuna prova. In questa fase, i risultati verranno presentati senza effettuare nessun confronto, cosa che invece verrà fatta nel successivo capitolo. Si partirà dal polipropilene puro per poi proseguire in ordine crescente di percentuale di talco presente all'interno del polimero.

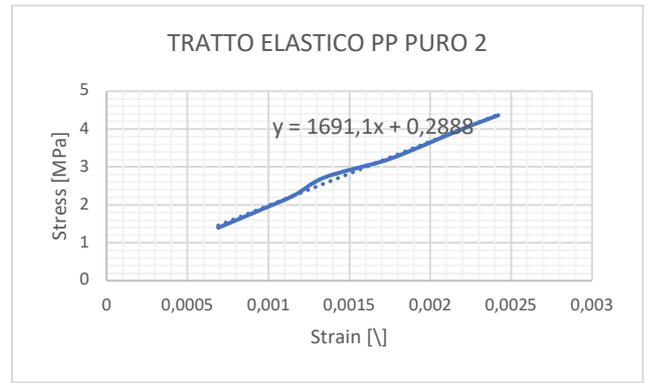
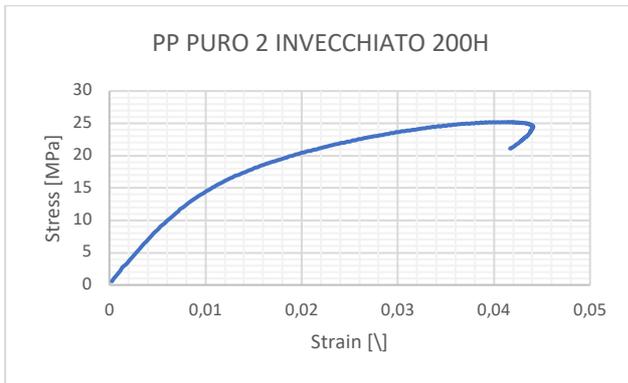
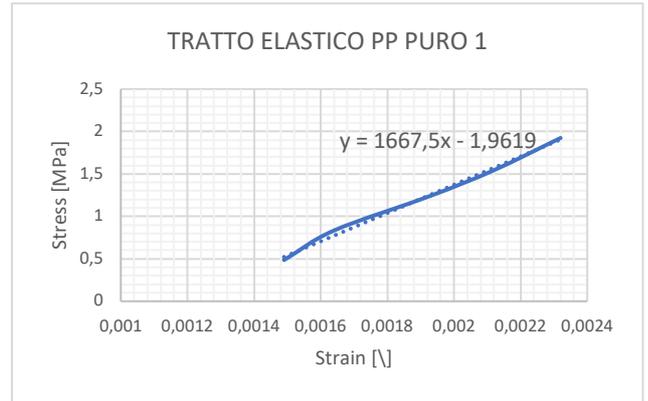
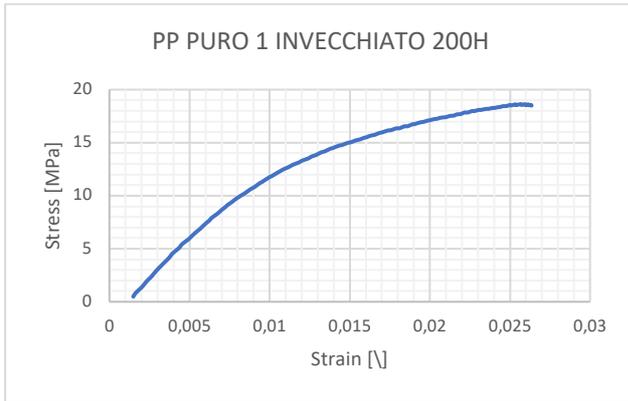
5.1. Polipropilene "puro"

• MODULO ELETSTICO A TRAZIONE

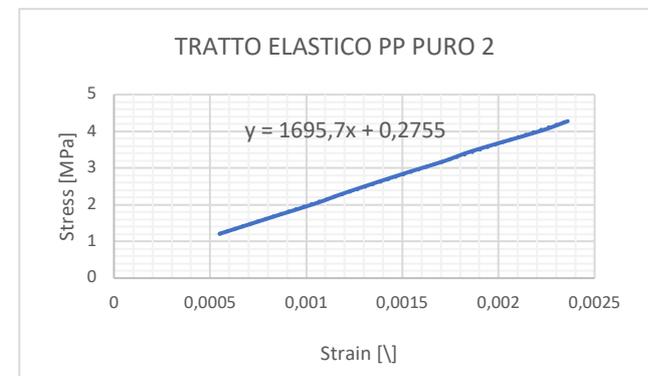
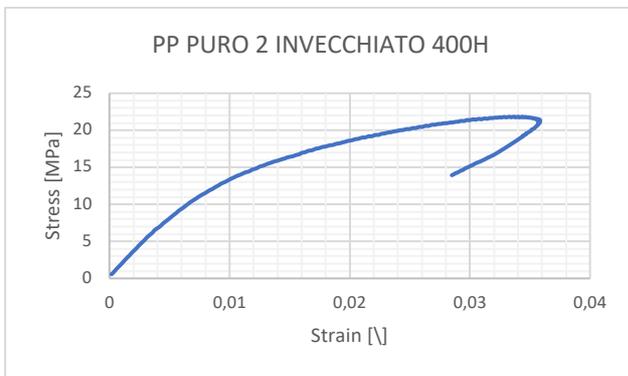
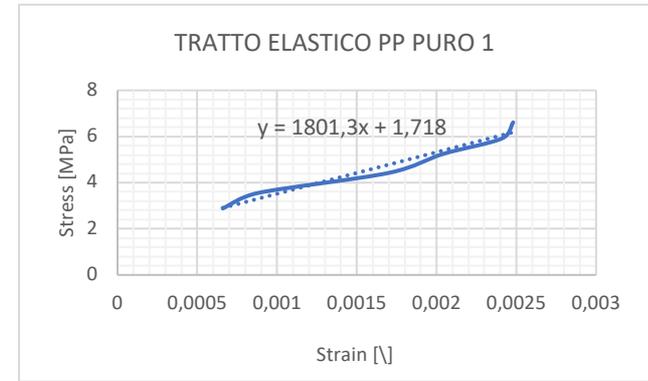
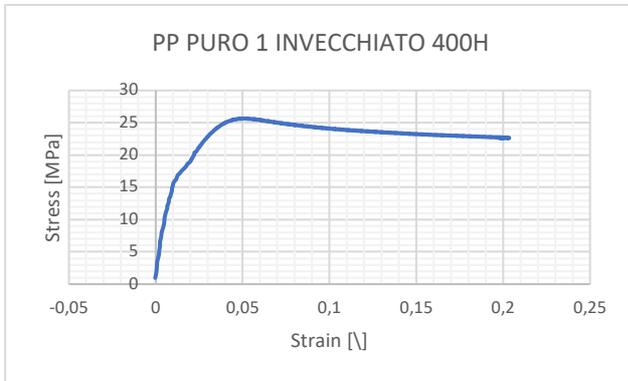
1. NUOVI

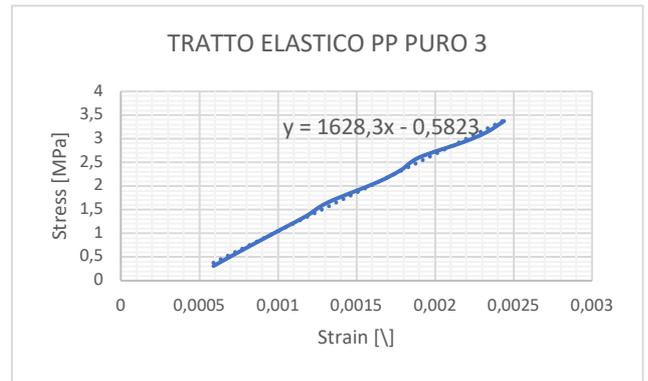
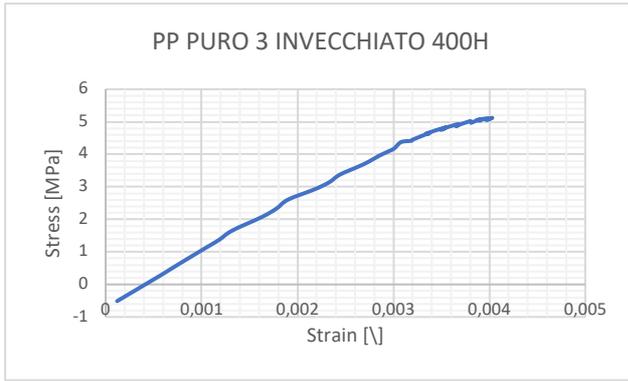


2. INVECCHIATI 200H

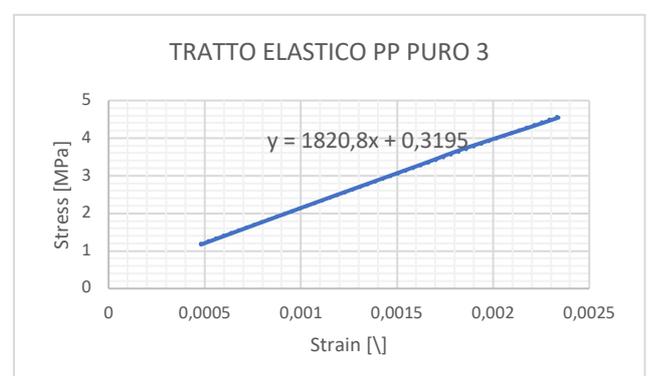
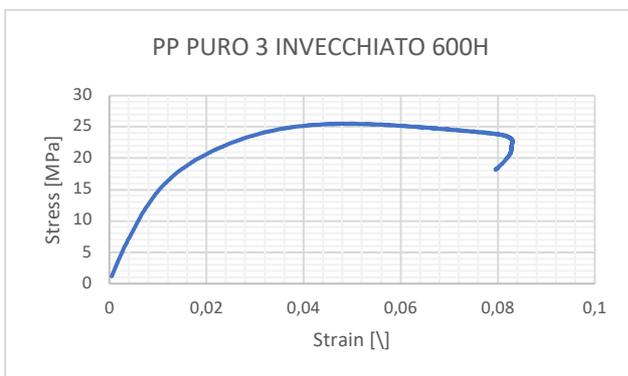
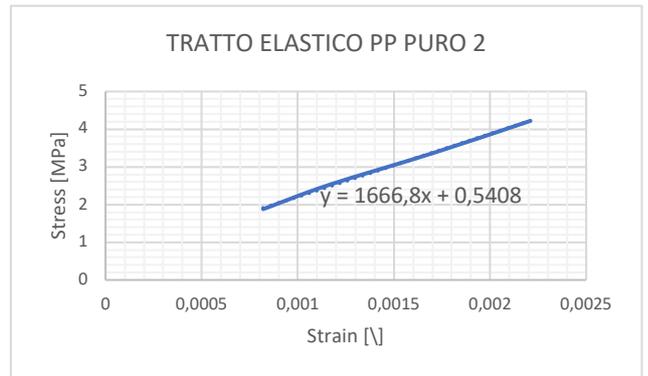
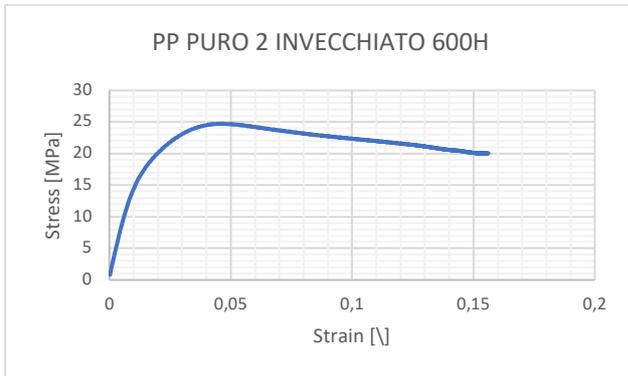
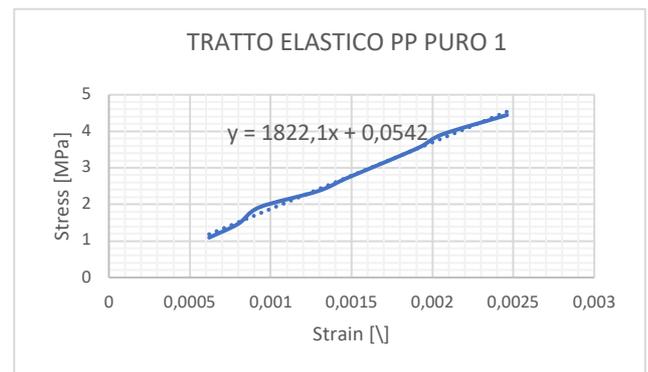
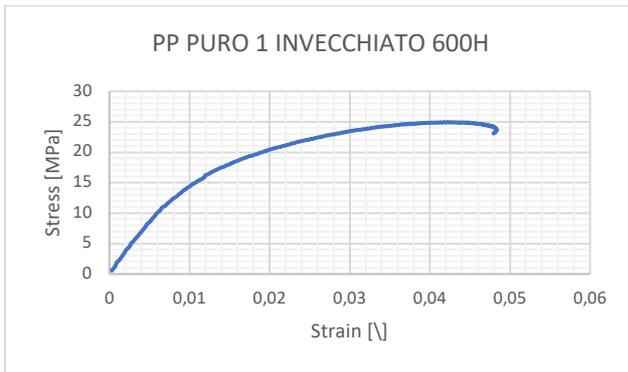


3. INVECCHIATI 400H

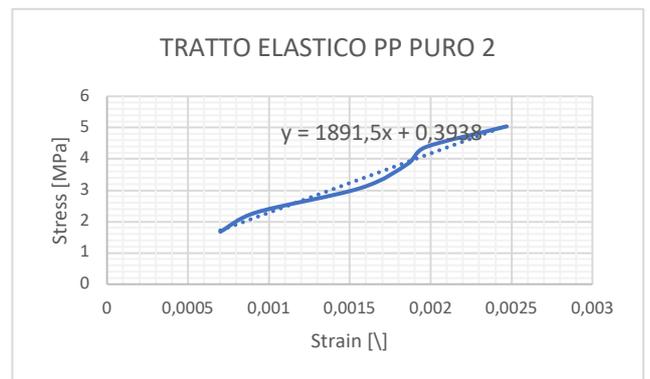
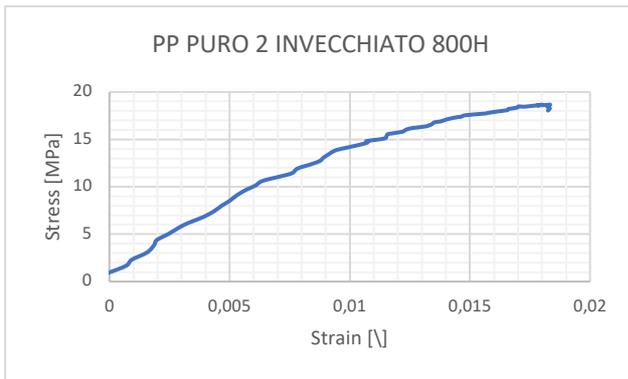
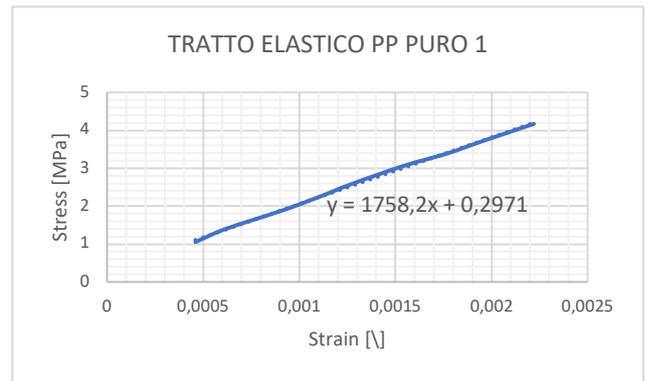
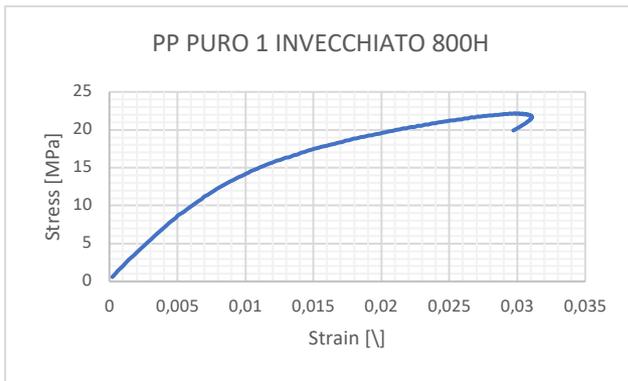




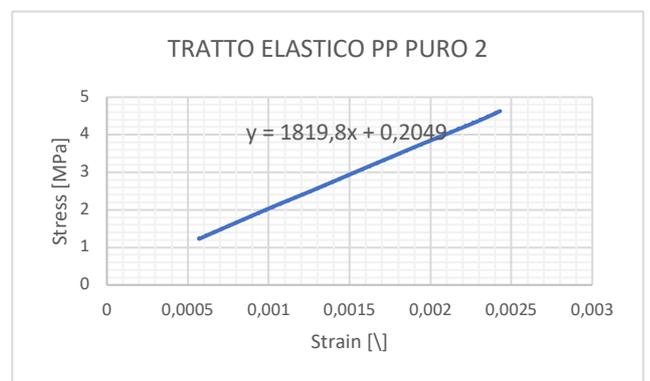
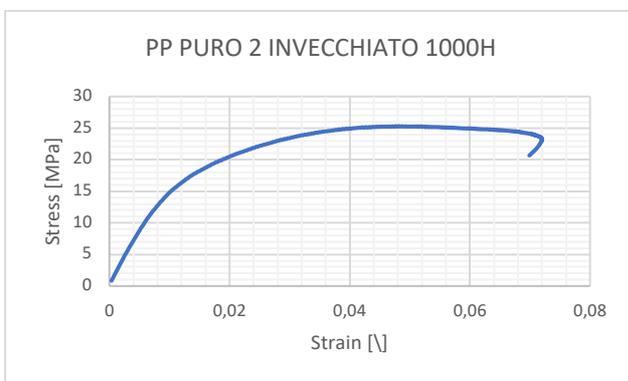
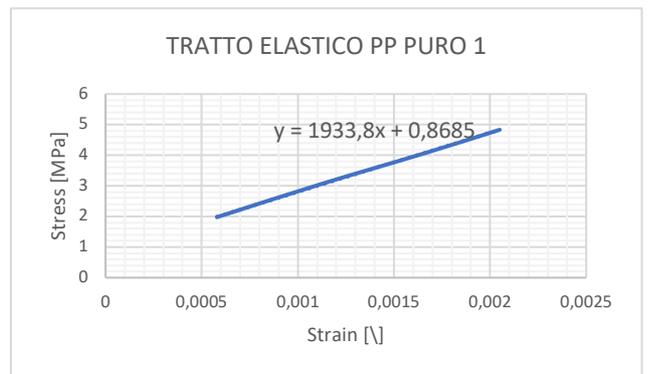
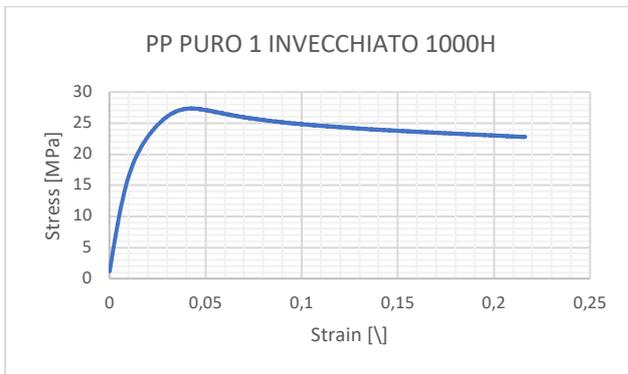
4. INVECCHIATI 600H



5. INVECCHIATI 800H



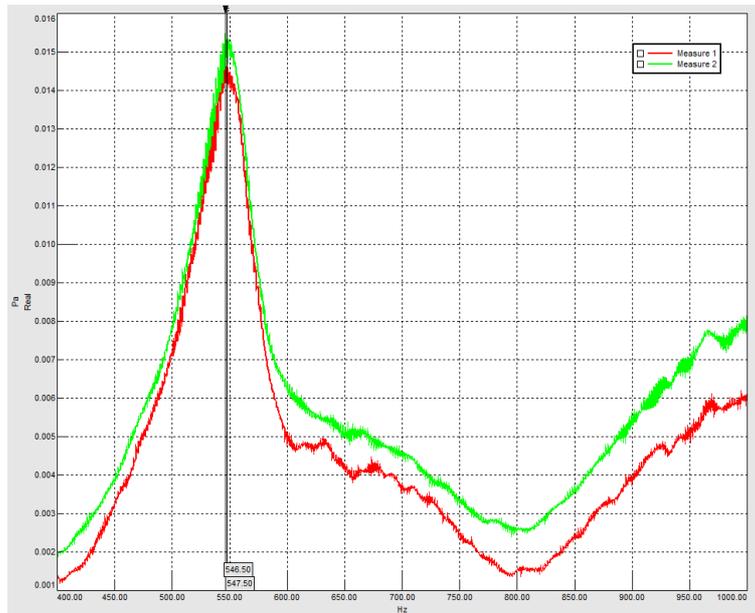
6. INVECCHIATI 1000H



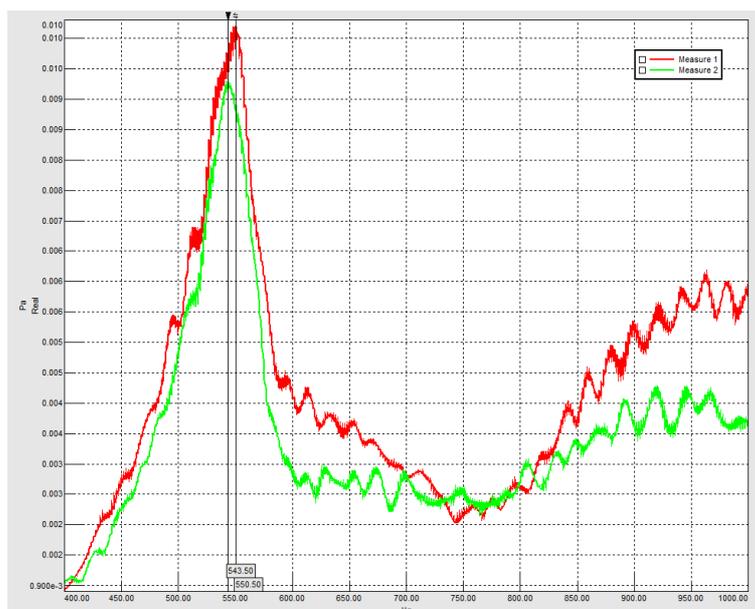
- MODULO ELASTICO FLESSIONALE**

1. NUOVI

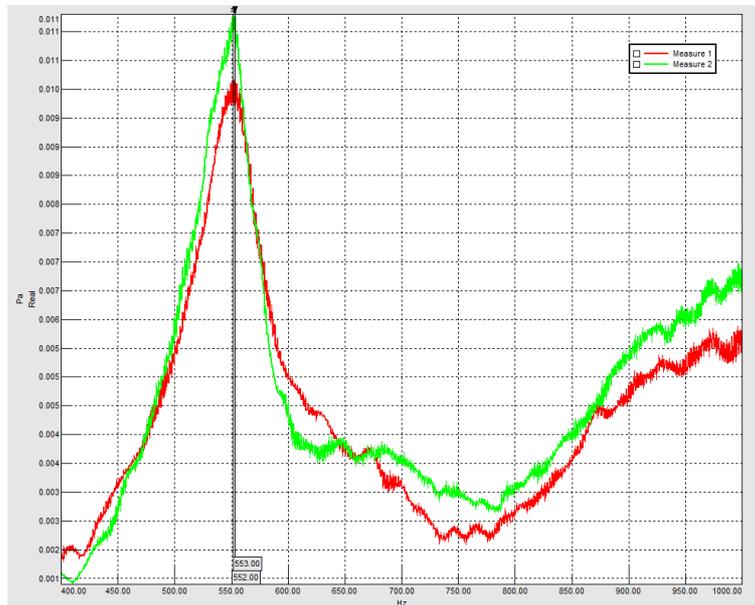
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,6668	9,7	80,93	2,46	547	1,006084248	1745,111893



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,7312	9,862	82,01	2,485	547	1,006046095	1799,596967

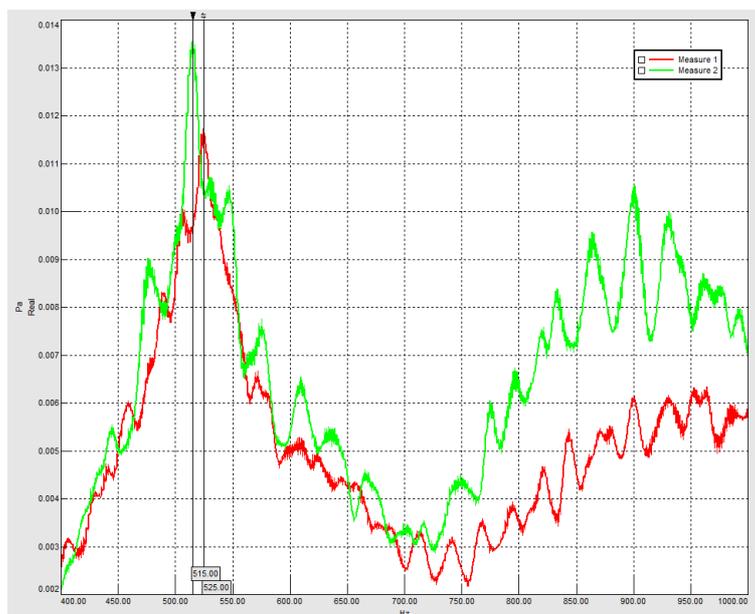


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,7469	9,978	81,68	2,51	552,5	1,006218301	1755,84657

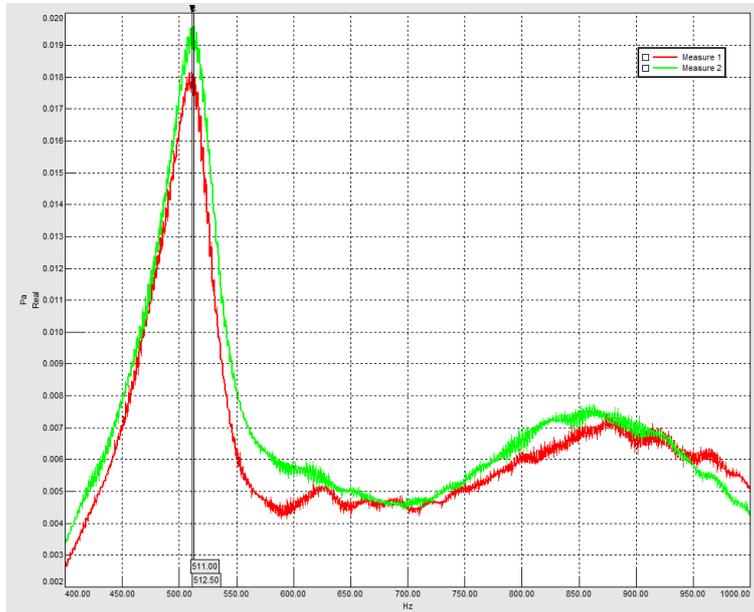


2. INVECCHIATI 200H

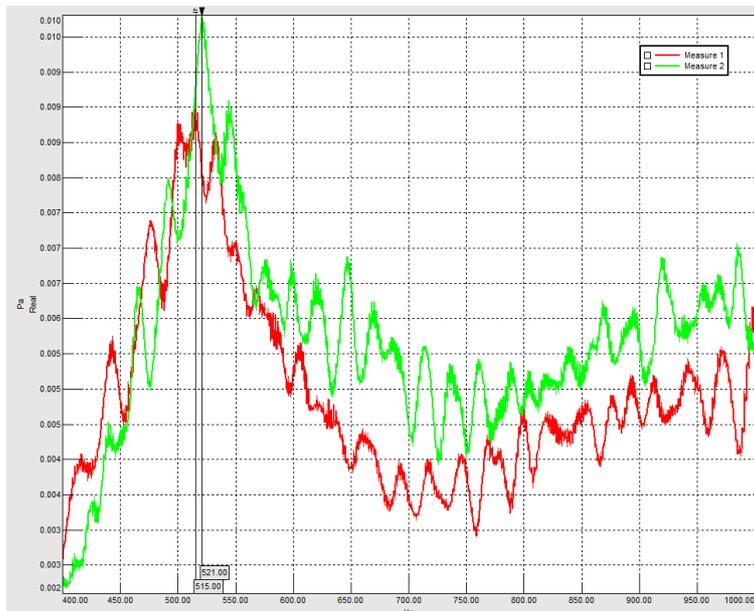
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,7122	10,21	80,96	2,3603	520	1,005596921	1743,606466



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,5191	9,271	80,71	2,3217	511,75	1,005448956	1717,427723

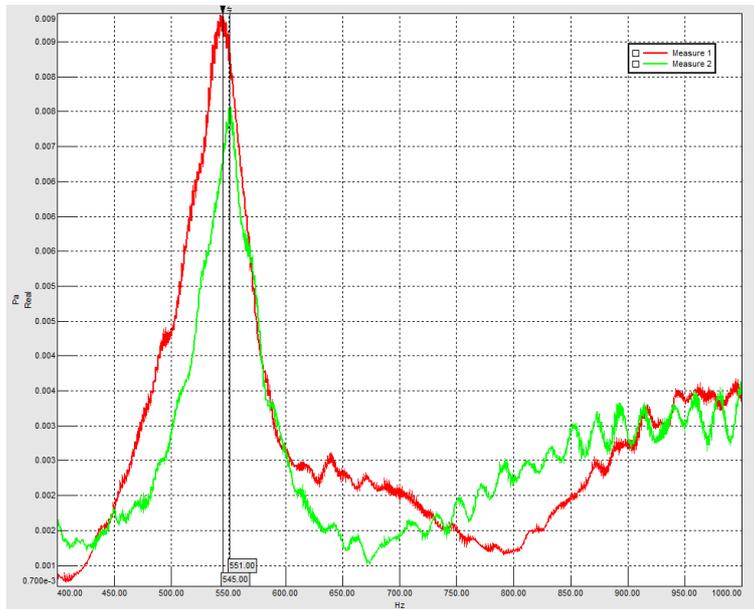


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,7803	10,485	80,85	2,3923	518	1,005765368	1675,920156



3. INVECCHIATI 400H

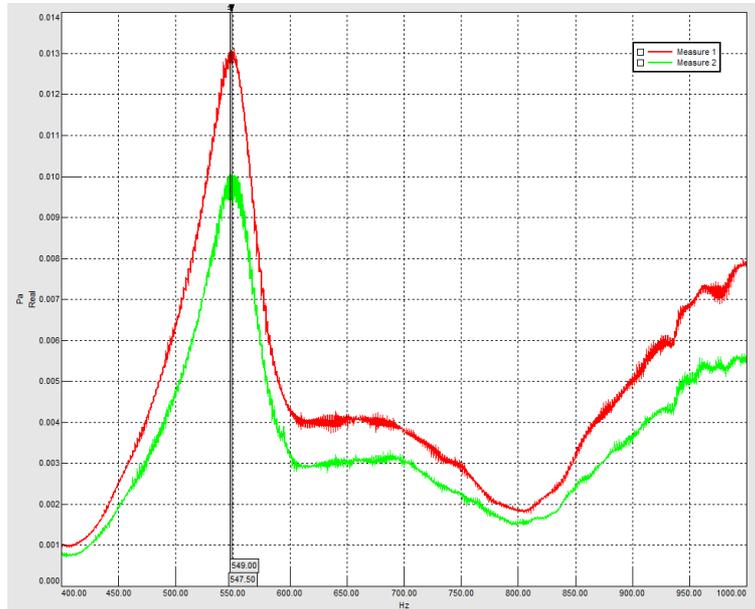
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,7411	9,9816	80,01	2,431	548	1,00607907	1803,033744



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,5437	8,978	79,65	2,4	551	1,005978699	1818,771414

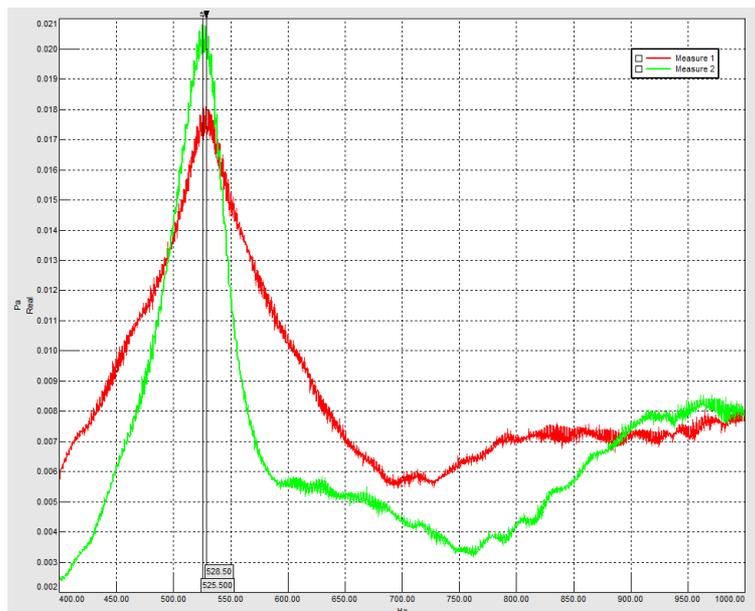


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,6595	9,64	80	2,41	548,25	1,00597599	1804,027573

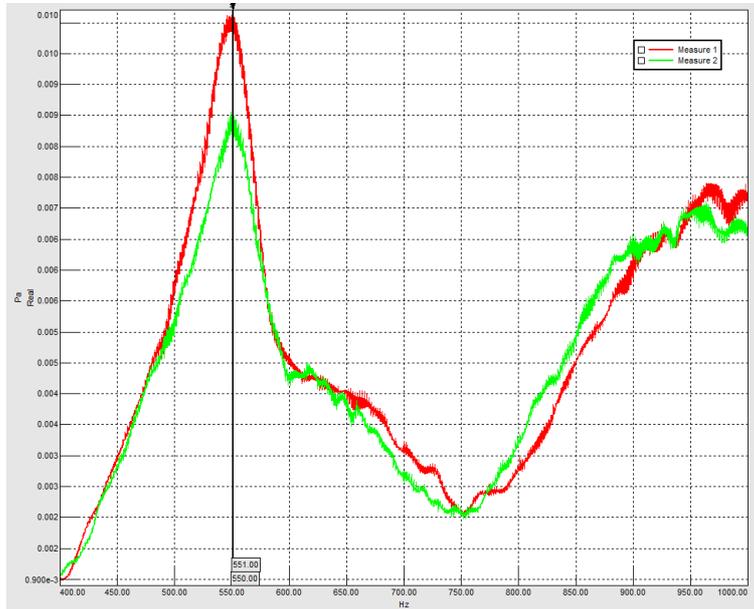


4. INVECCHIATI 600H

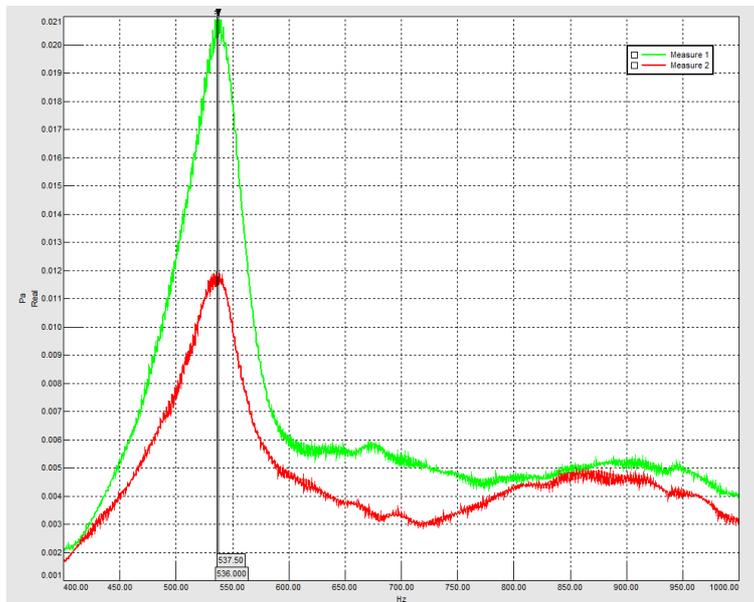
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,6403	9,292	81,74	2,395	527	1,005653242	1857,163491



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,6776	9,49	80,47	2,413	550,5	1,0059211	1893,694974

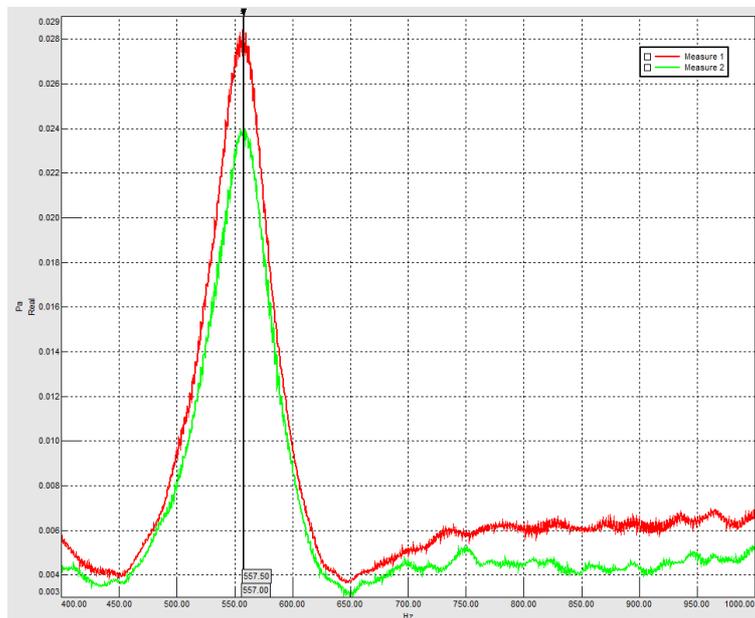


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,6165	9,43	80,19	2,36	536,75	1,005703473	1846,2135

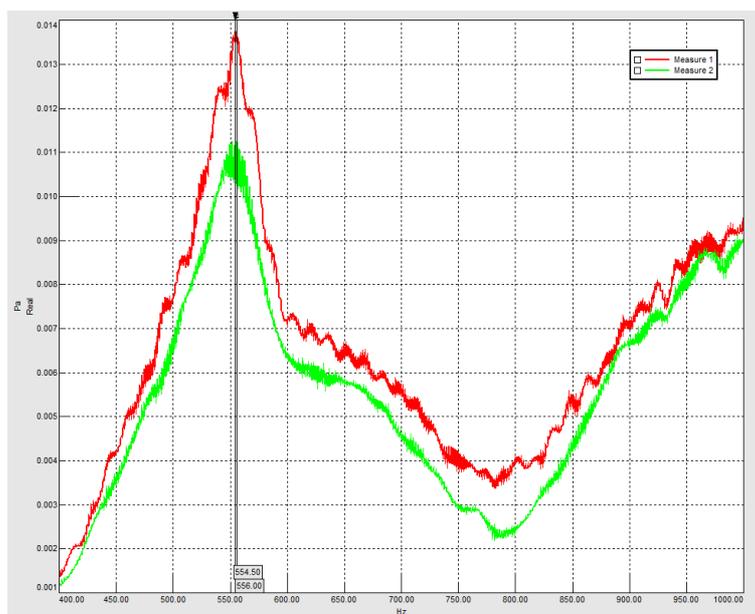


5. INVECCHIATI 800H

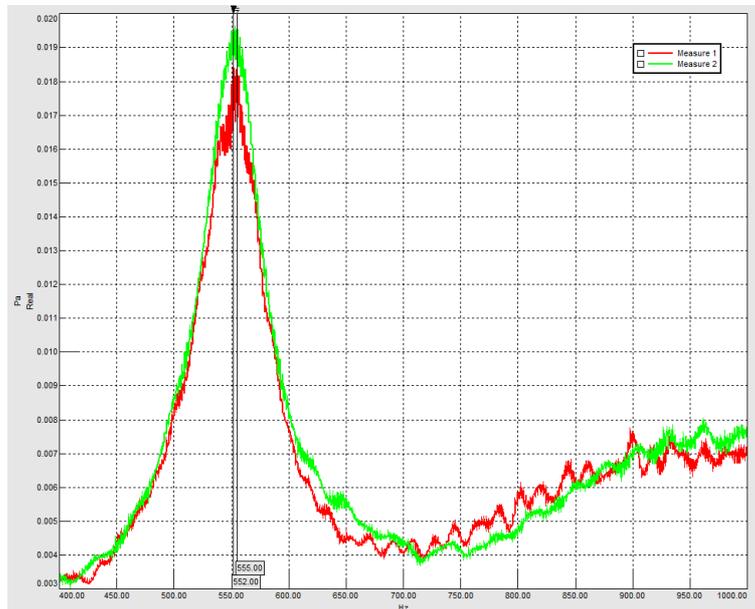
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,6765	9,54	79,73	2,42	557,25	1,006066567	1860,289211



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,6499	9,34	80,11	2,426	555,25	1,006038984	1869,260011

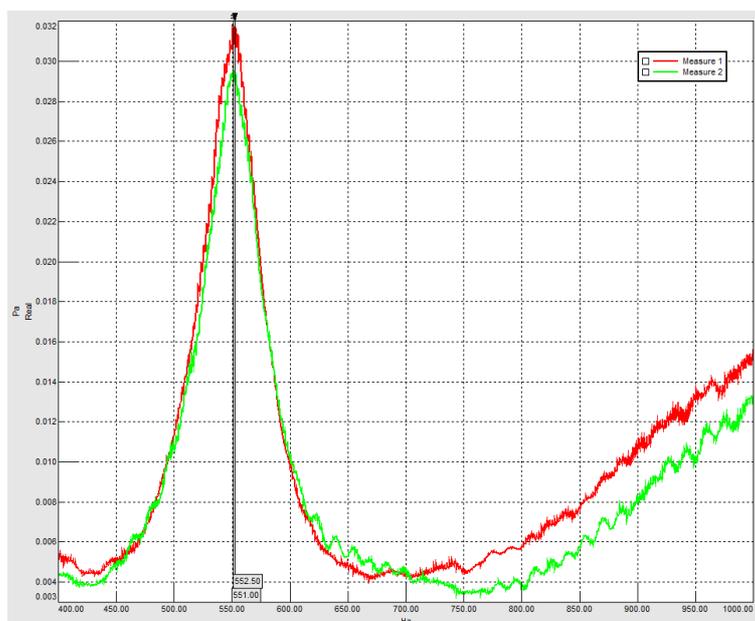


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,7528	9,95	80,03	2,42	553,5	1,00602117	1860,558053

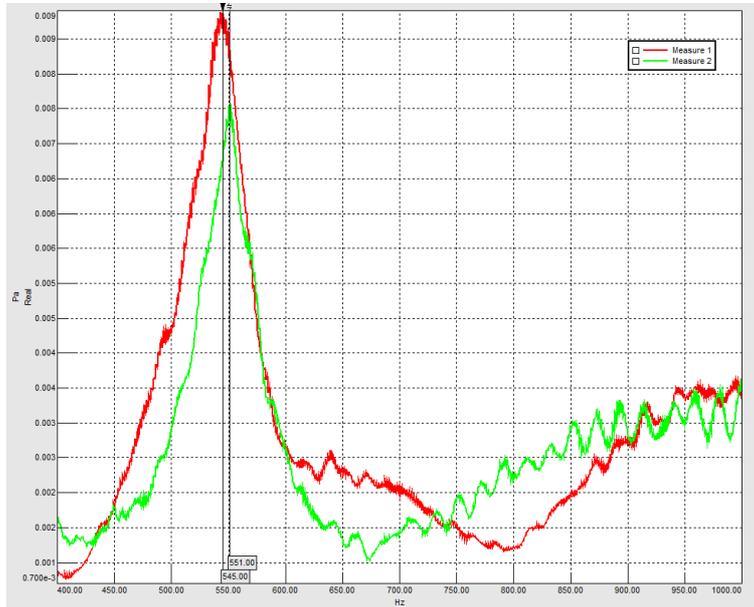


6. INVECCHIATI 1000H

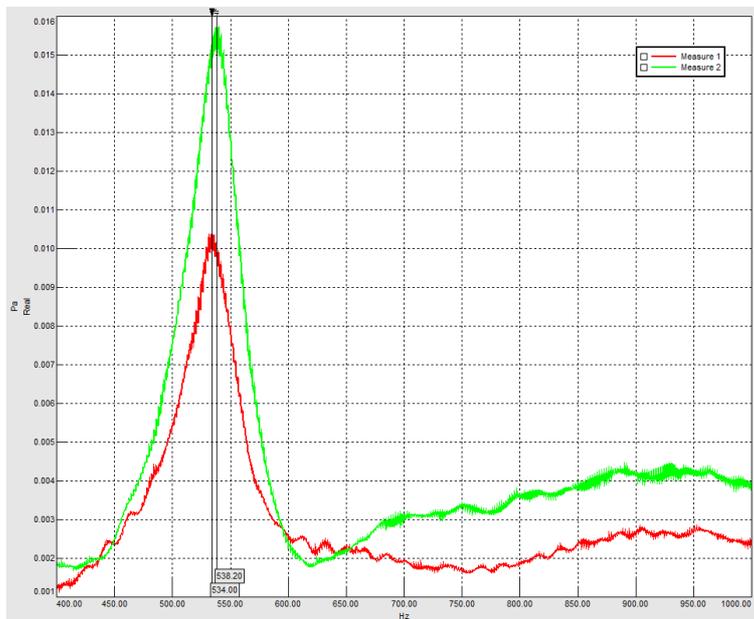
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,6686	9,49	80,21	2,4	551,75	1	1904,384428



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,8148	10,4675	79,88	2,366	547,5	1,00577709	1905,921255



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
1,8573	10,6767	80,59	2,37	536,1	1,005694953	1873,184485



- **ENERGIA ASSORBITA A IMPATTO**

In questo caso, il pendolo possedeva un'energia pari a 4 Joule al momento dello sgancio.

PROVINI NUOVI	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
61	2,402	7,905	0,39	\	24,85
72	2,410	8,083	0,47	24,13	
83	2,353	7,979	0,48	25,57	

PROVINI INV. 200H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
3	2,422	8,358	0,52	25,69	24,71
5	2,378	7,460	0,43	24,24	
7	2,388	7,612	0,44	24,21	

PROVINI INV. 400H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
17	2,383	7,582	0,44	24,35	23,80
35	2,387	6,949	0,37	\	
37	2,363	7,648	0,42	23,24	

PROVINI INV. 600H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
12	2,422	8,145	0,5	25,35	23,98
14	2,407	7,782	0,46	24,56	
16	2,390	7,978	0,42	22,03	

PROVINI INV. 800H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
8	2,438	7,815	0,45	23,62	23,24
9	2,448	7,908	0,44	22,73	
20	2,42	7,248	0,41	23,37	

PROVINI INV. 1000H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
23	2,417	8,547	0,49	23,72	22,98
25	2,392	8,082	0,43	22,24	
28	2,398	7,413	0,38	\	

• **FATTORE DI SMORZAMENTO**

PP PURO				
ORE INVECCHIAMENTO	PROVINO NUMERO		RAPPORTO SMORZAMENTO (%)	MEDIA RAPPORTO SMORZAMENTO (%)
NUOVI	60	ROSSO	3,97	4,22
		VERDE	4,18	
	61	ROSSO	4,62	
		VERDE	3,82	
	62	ROSSO	4,66	
		VERDE	4,07	
200	1	ROSSO	3,85	4,17
		VERDE	4,51	
	3	ROSSO	4,11	
		VERDE	4,47	
	38	ROSSO	3,93	
		VERDE	4,15	
400	18	ROSSO	4,07	4,19
		VERDE	3,85	
	35	ROSSO	5,04	
		VERDE	4,78	
	37	ROSSO	3,56	
		VERDE	3,83	
600	10	ROSSO	4,43	4,16
		VERDE	4,02	
	13	ROSSO	3,93	
		VERDE	4,15	
	41	ROSSO	4,04	
		VERDE	4,37	
800	19	ROSSO	3,91	4,14
		VERDE	3,96	
	21	ROSSO	4,49	
		VERDE	4,42	
	22	ROSSO	4,01	
		VERDE	4,07	
1000	24	ROSSO	3,98	4,15
		VERDE	4,29	
	30	ROSSO	4,23	
		VERDE	3,99	
	31	ROSSO	4,08	
		VERDE	4,32	

- **VELOCITA' DI COMBUSTIONE**

PP PURO		
ORE DI INVECCHIAMENTO [h]	TEMPO PER BRUCIARE 50 mm [s]	VELOCITA' DI COMBUSTIONE [mm/min]
NUOVI	136	22,1
200	125	24,0
400	132	22,7
600	143	21,0
800	128	23,4
1000	151	19,9

- **DENSITA'**

1. NUOVI

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m³]
60	1,6668	9,7	80,93	2,46	863,1	859,5
61	1,7312	9,862	82,01	2,485	861,4	
62	1,7469	9,978	81,68	2,51	854,0	

2. INVECCHIATI 200H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m³]
1	1,7122	10,21	80,96	2,3603	877,6	876,6
38	1,5191	9,271	80,71	2,3217	874,4	
3	1,7803	10,485	80,85	2,3923	877,9	

3. INVECCHIATI 400H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m³]
18	1,7411	9,9816	80,01	2,431	896,8	896,4
35	1,5437	8,978	79,65	2,402	899,5	
37	1,6595	9,64	80	2,41	892,9	

4. INVECCHIATI 600H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m³]
10	1,6403	9,292	81,74	2,395	901,7	906
13	1,6776	9,49	80,47	2,413	910,4	
41	1,6165	9,43	80,19	2,36	905,8	

5. INVECCHIATI 800H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
19	1,6765	9,54	79,73	2,42	910,8	909,8
21	1,6499	9,34	80,11	2,426	908,9	
22	1,7528	9,95	80,03	2,42	909,6	

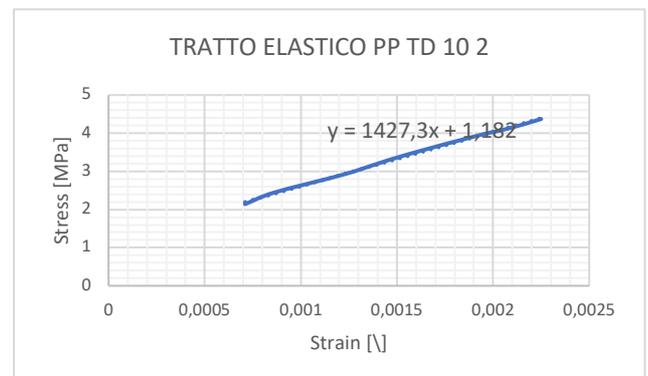
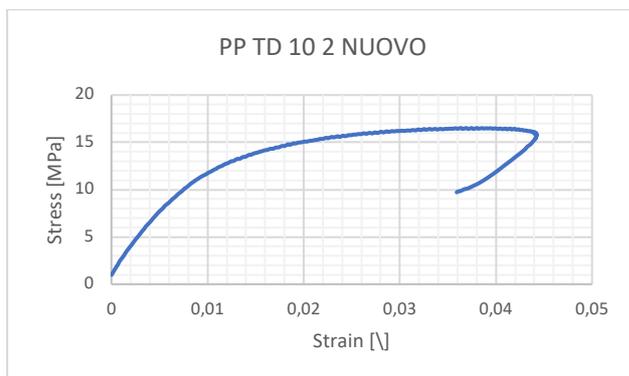
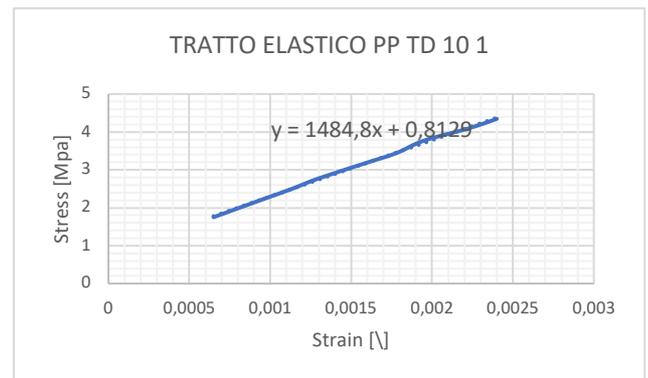
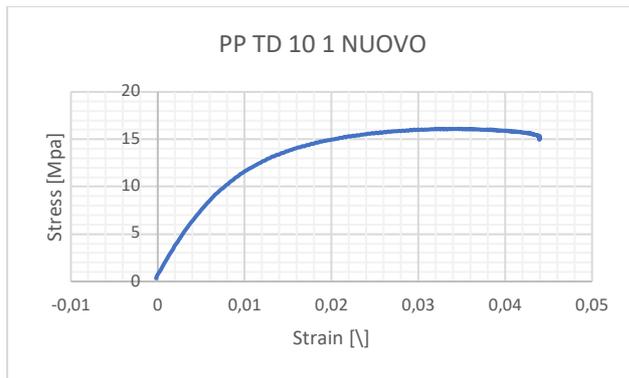
6. INVECCHIATI 1000H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
24	1,6686	9,49	80,21	2,4	913,4	913,8
30	1,8148	10,4675	79,88	2,366	917,3	
31	1,8573	10,6767	80,59	2,37	910,8	

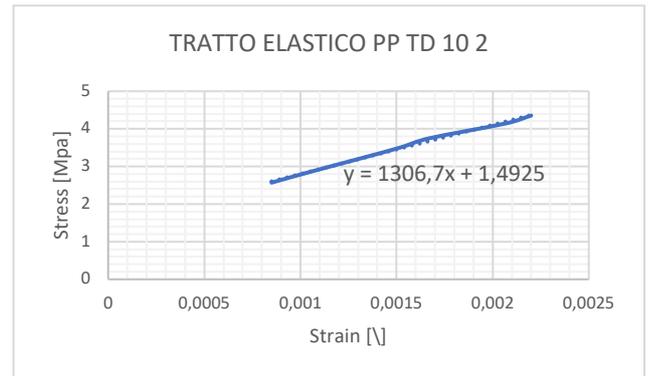
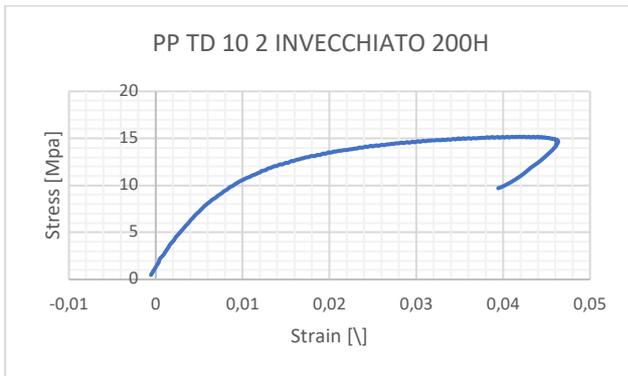
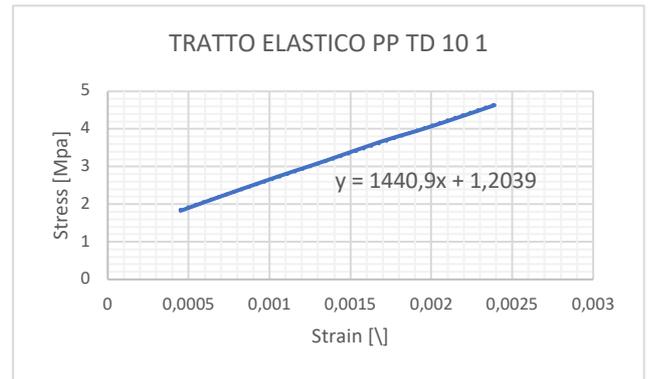
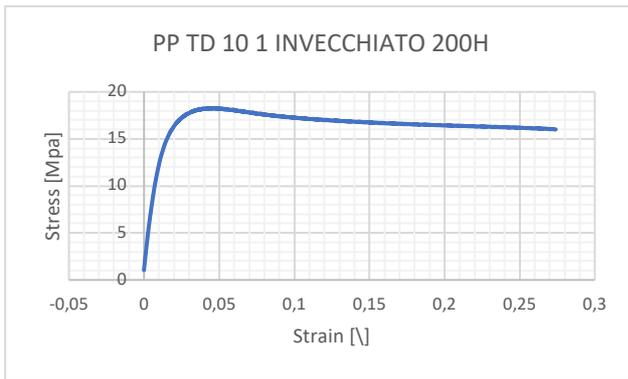
5.2. Polipropilene con talco al 10%

• MODULO ELETSTICO A TRAZIONE

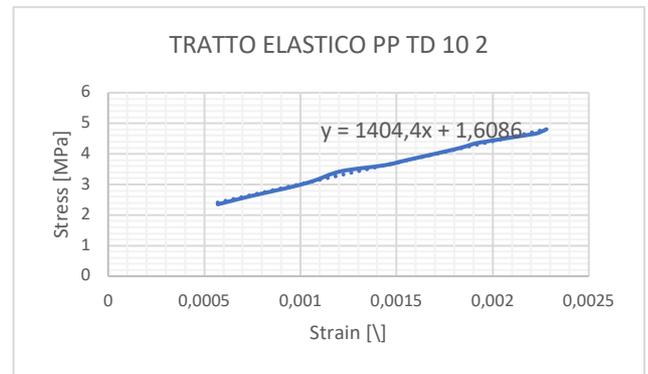
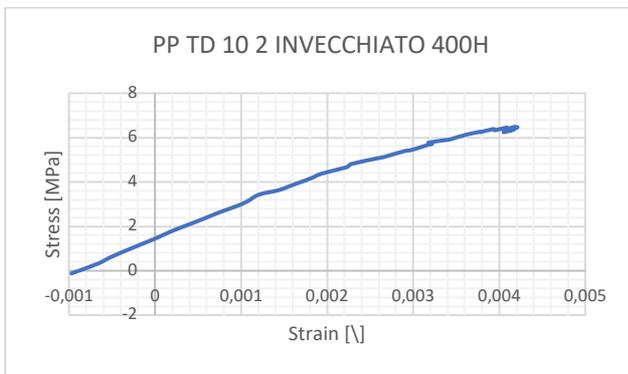
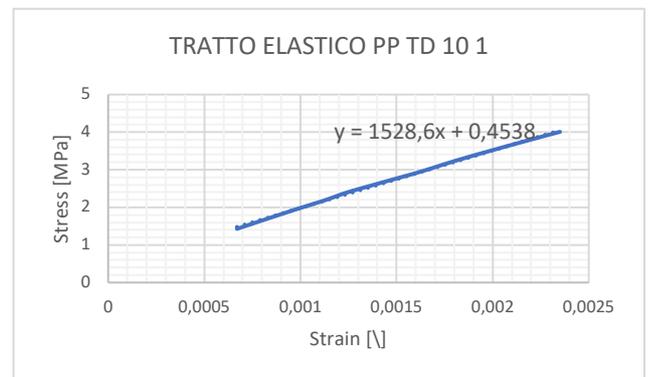
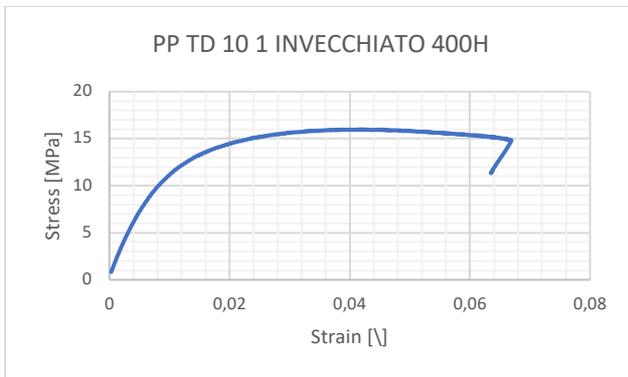
1. NUOVI

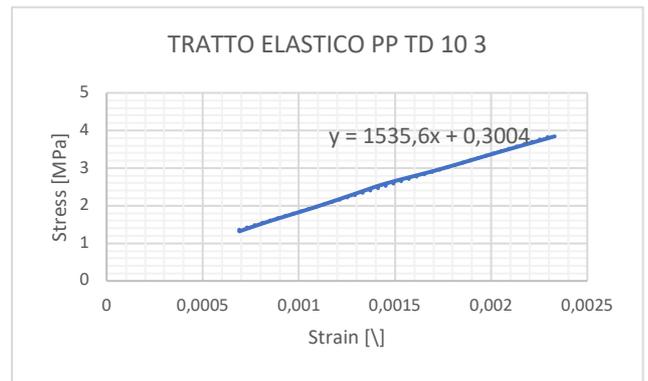
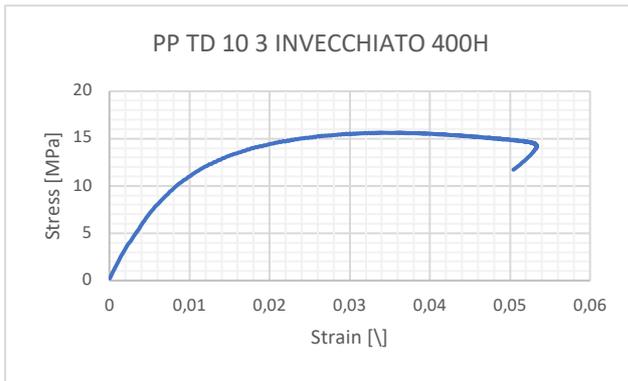


2. INVECCHIATI 200H

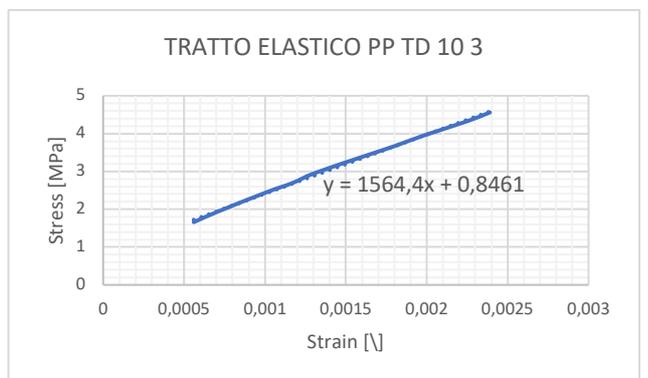
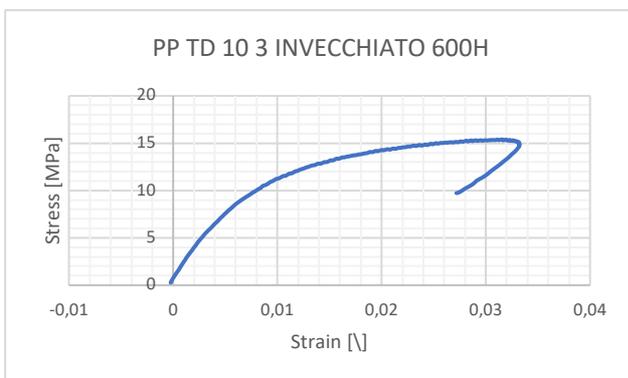
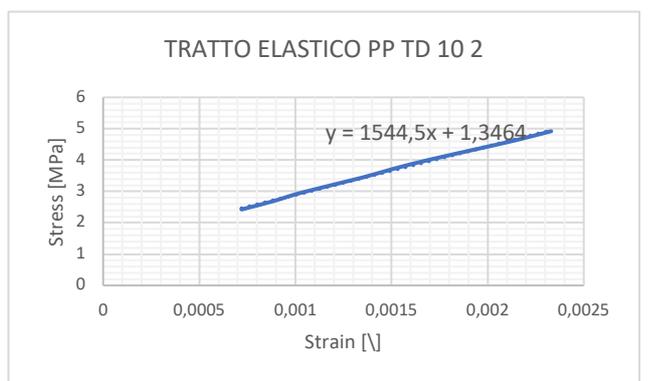
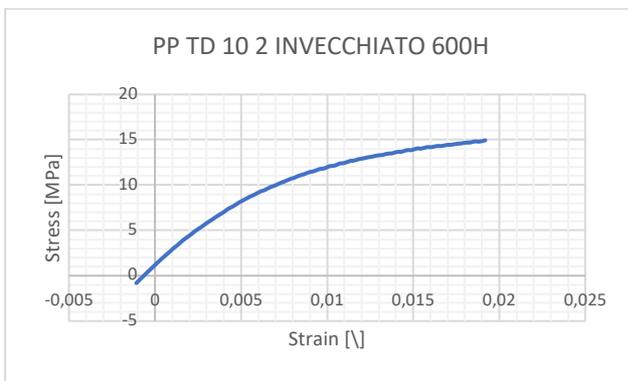
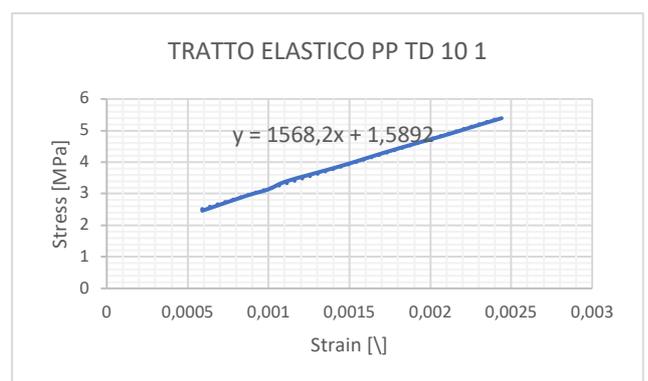
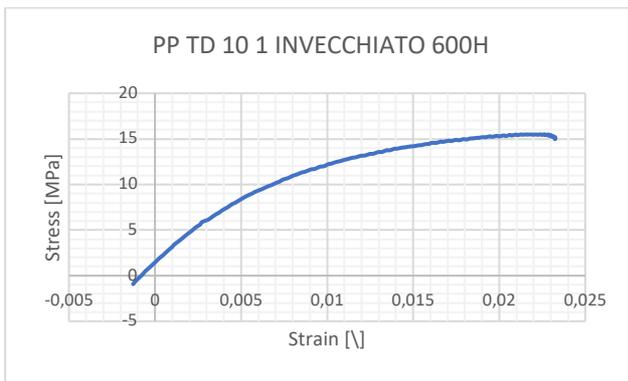


3. INVECCHIATI 400H

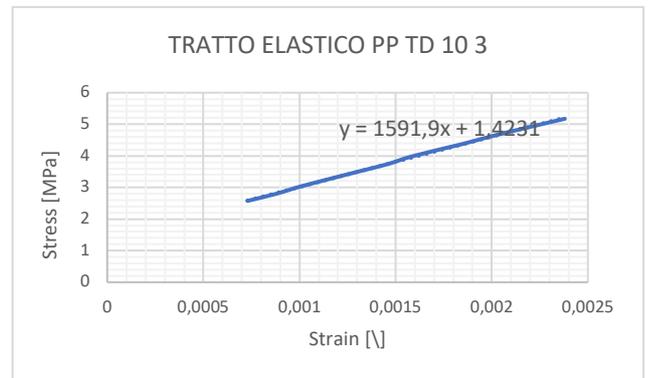
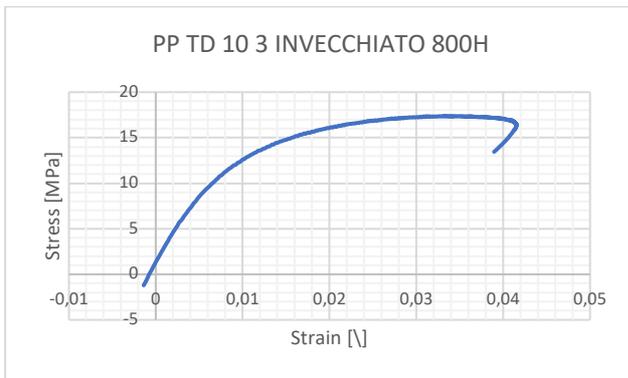
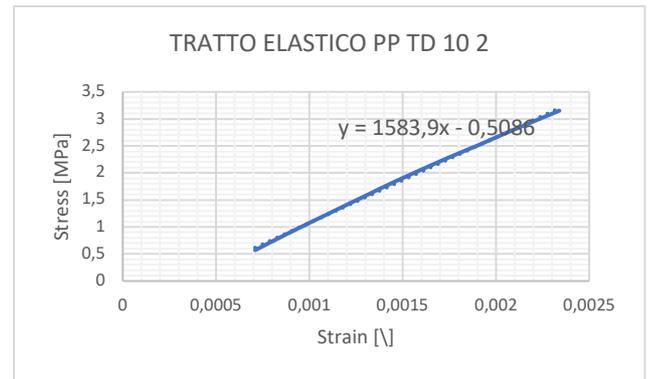
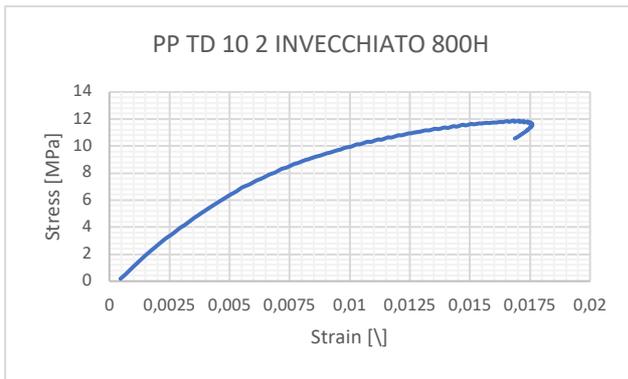
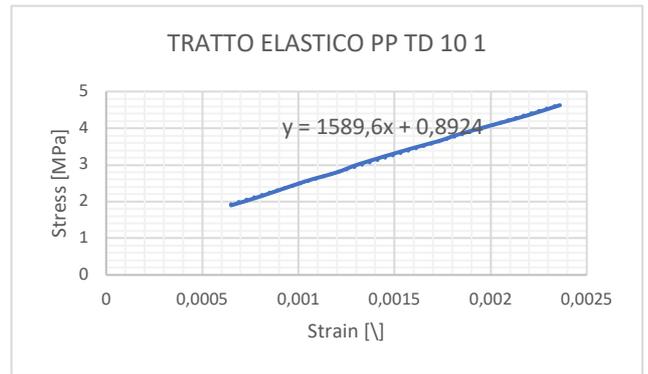
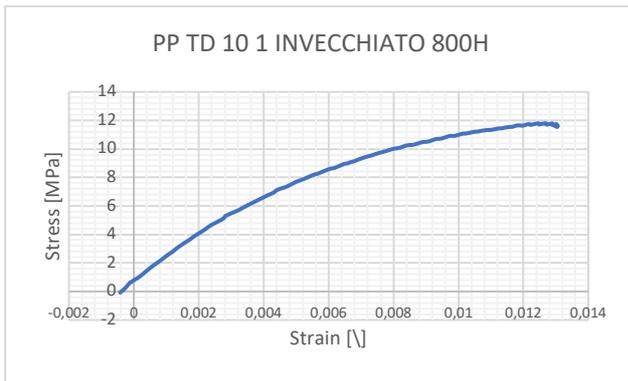




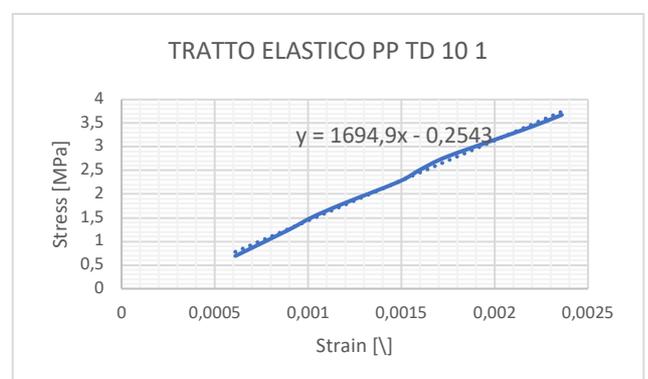
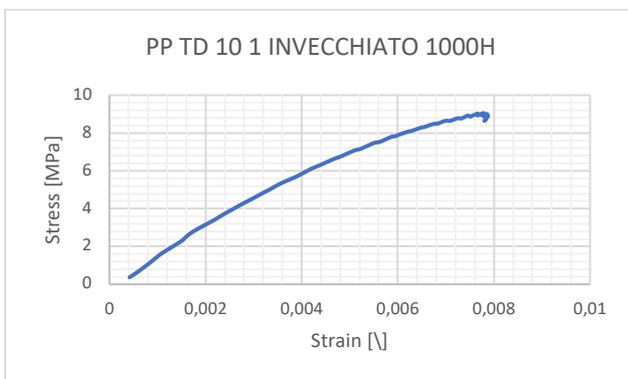
4. INVECCHIATO 600H

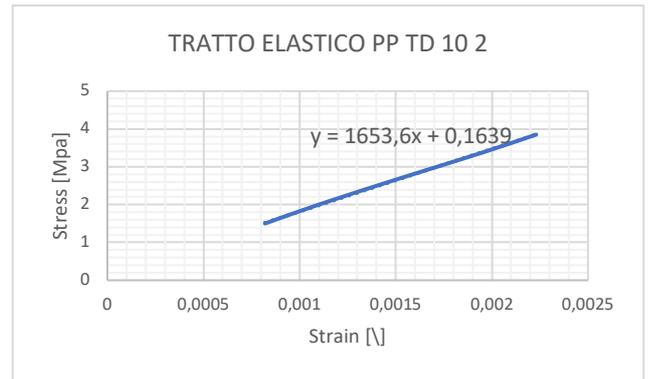
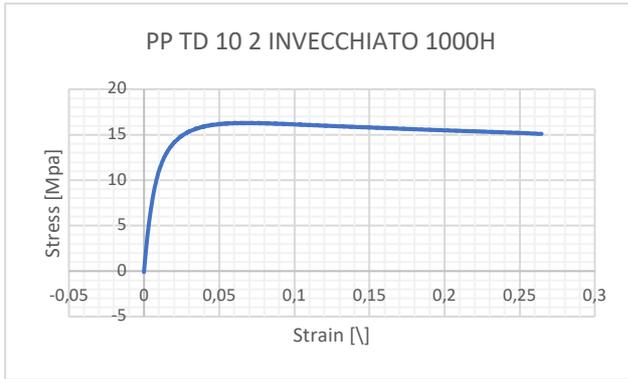


5. INVECCHIATI 800H



6. INVECCHIATI 1000H

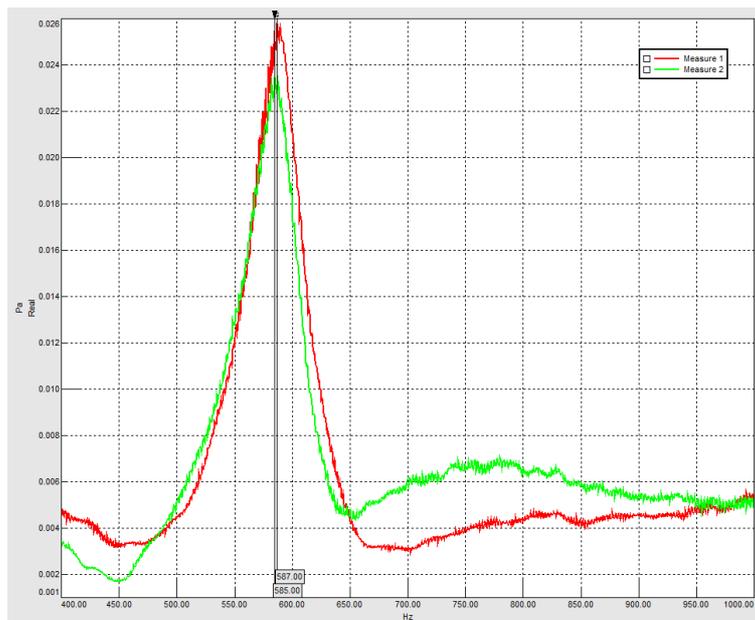




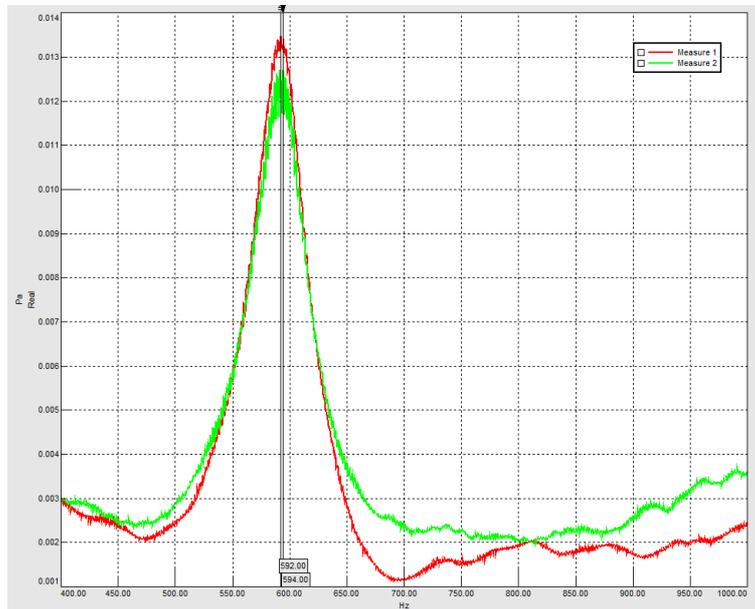
- MODULO ELASTICO FLESSIONALE**

1. NUOVI

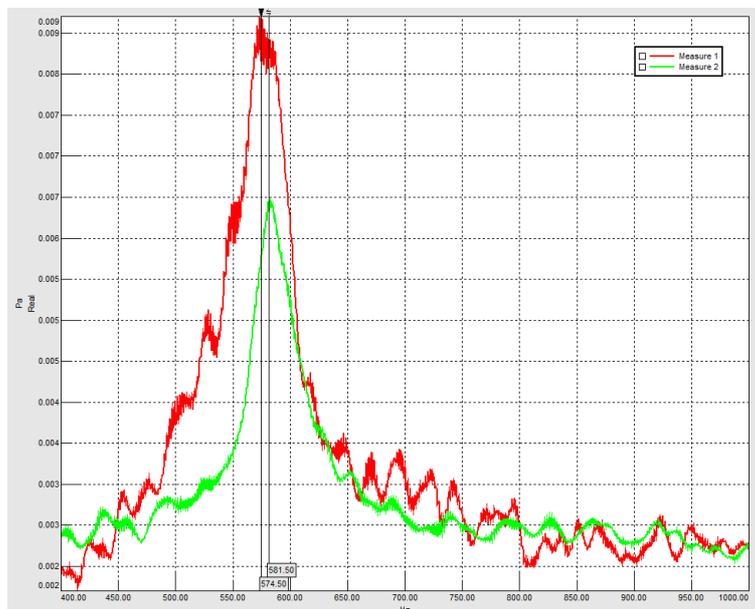
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,2318	10,187	80,93	2,867	586	1,008264034	1616,602461



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,2132	9,9757	80,82	2,9123	593	1,008550476	1593,352013

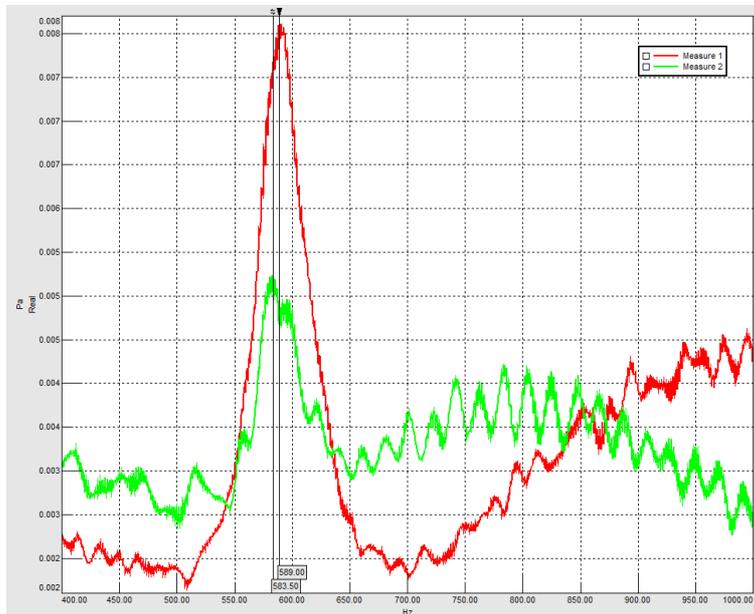


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,1218	10,0286	80,87	2,765	578	1,00769788	1688,520348

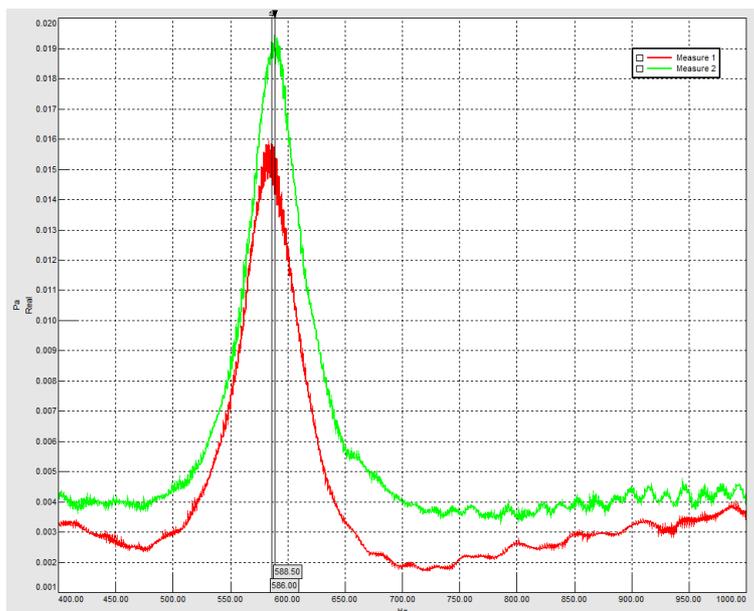


2. INVECCHIATI 200H

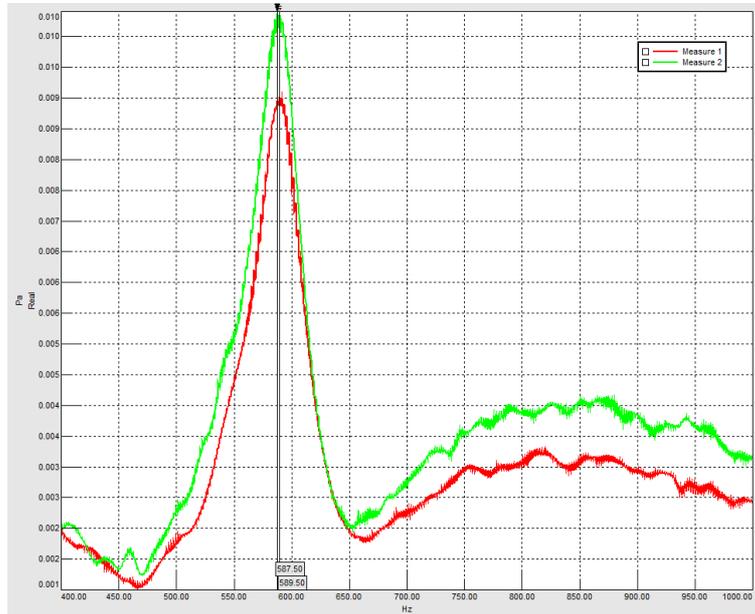
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,2295	9,97	80,99	2,903	586,25	1,008460325	1594,66387



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,1151	9,89	80,95	2,797	587,25	1,007861529	1707,394631

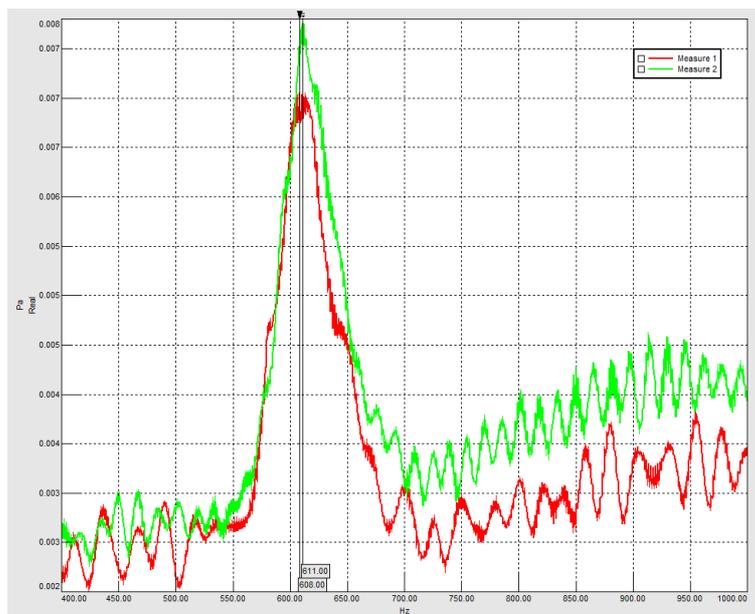


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,26851	10,134	80,87	2,901	588,5	1,008473764	1604,780721

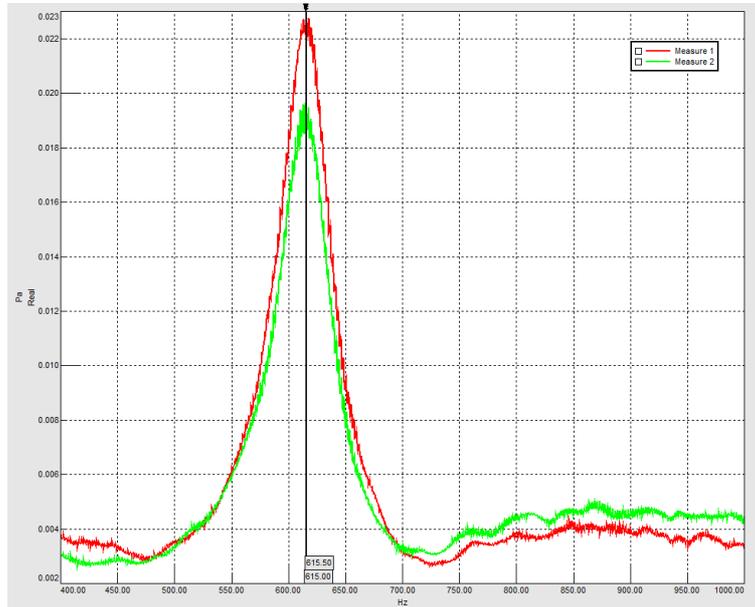


3. INVECCHIATI 400H

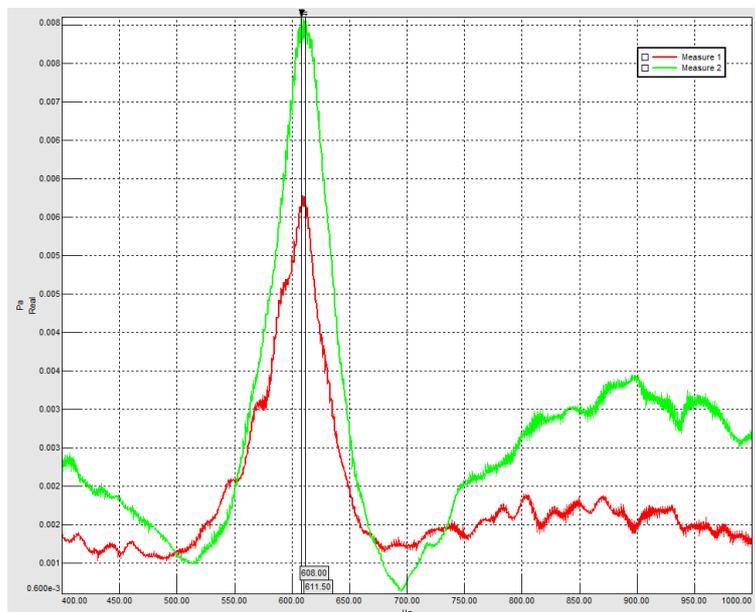
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,2971	10,153	80,44	2,955	609,5	1,008886416	1620,683306



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,1949	9,703	80,62	2,954	615,25	1,008840792	1663,836753

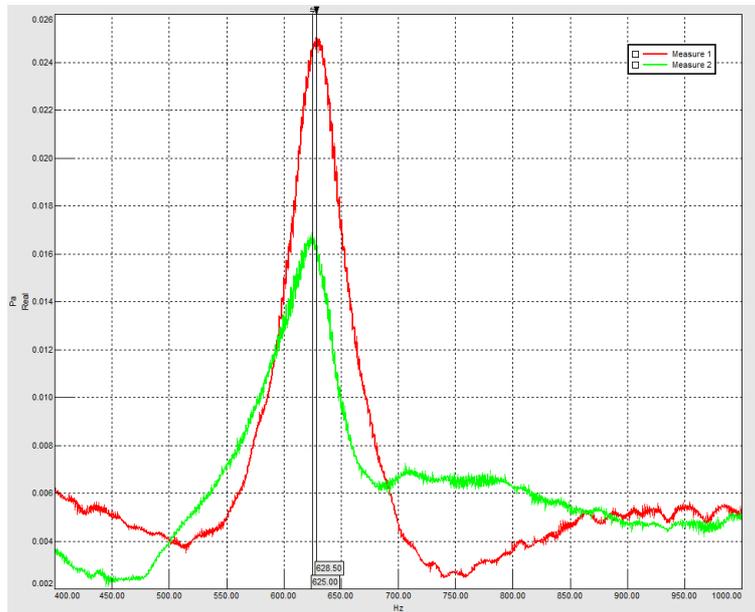


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,2724	10,026	81,35	2,952	609,75	1,008671084	1685,439237

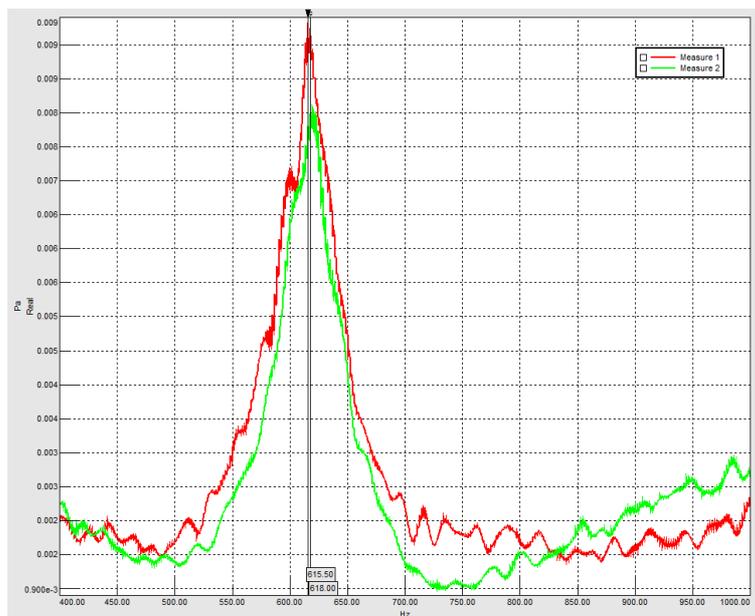


4. INVECCHIATI 600H

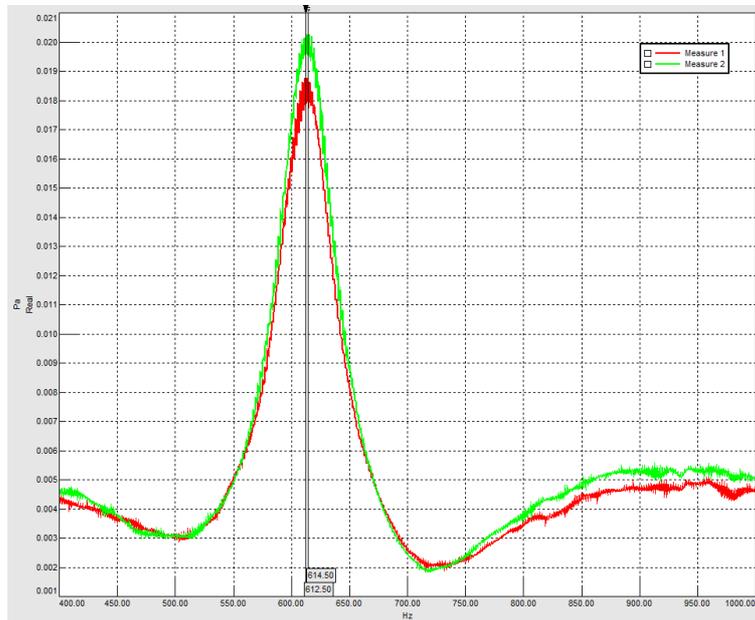
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,286	10,338	80,19	2,874	626,75	1,008458413	1802,876362



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,3129	10,144	80,57	2,985	616,75	1,009038528	1630,572015

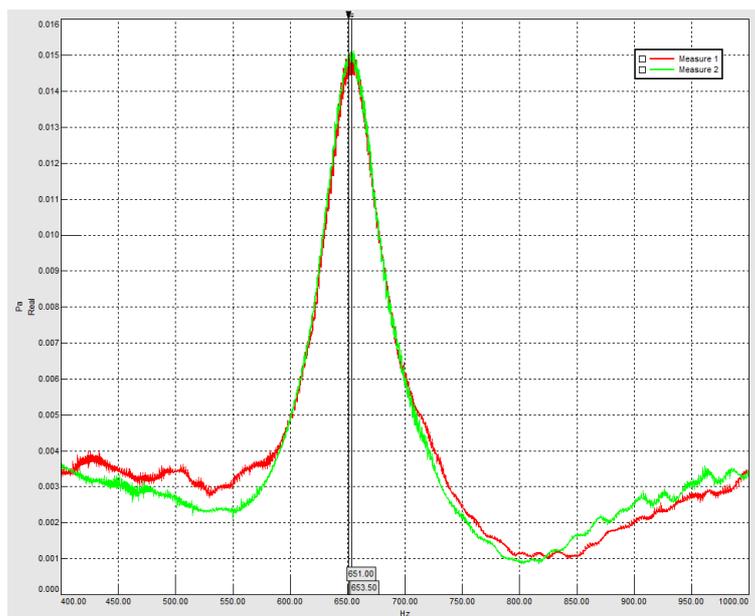


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,2805	10,35	79,64	2,873	613,5	1,008569678	1688,071599

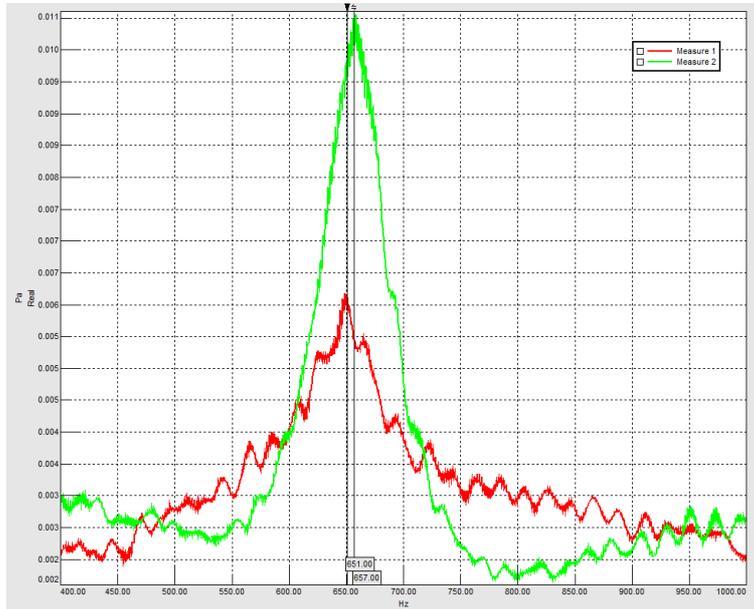


5. INVECCHIATI 800H

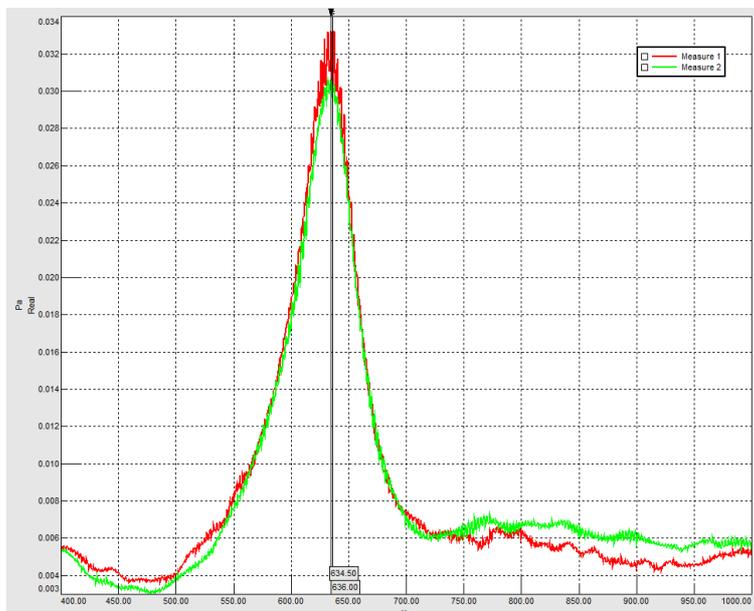
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,3978	10,115	80,58	3,045	652,25	1,009403204	1787,471146



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,5721	10,184	80,99	3,213	654	1,01036369	1656,318775

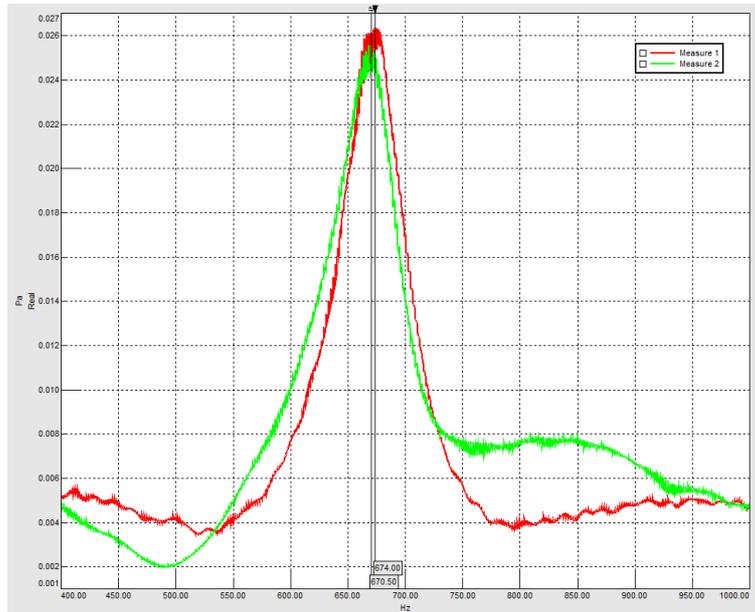


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,3485	10,39	80,96	2,949	635,25	1,00873704	1803,884521

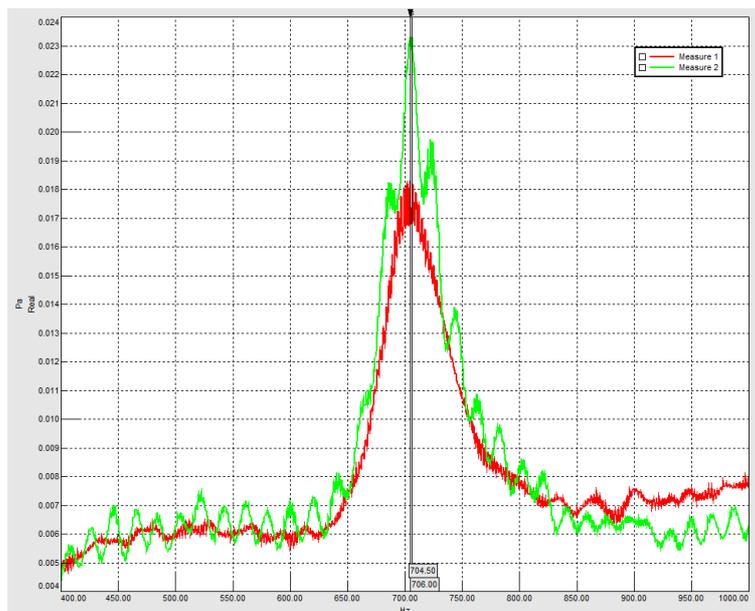


6. INVECCHIATI 1000H

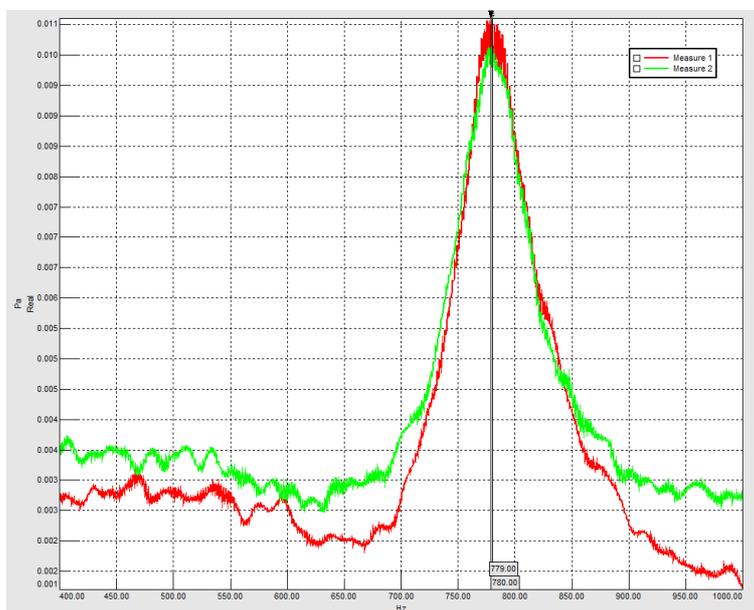
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,389	10,056	79,51	3,1043	672,25	1,010037826	1726,408515



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,5361	10,05	79,83	3,2614	705,25	1,010990859	1763,190093



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,5679	10,011	79,27	3,398	779,5	1,012099984	1897,544514



- ENERGIA ASSORBITA A IMPATTO**

In questo caso, il pendolo al momento dello sgancio, possedeva un'energia di 7 Joule.

PROVINI NUOVI	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
43	2,998	8,525	0,83	32,48	32,04
46	2,998	8,125	0,77	31,61	
50	2,955	7,888	0,95	\	

PROVINI INV. 200H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
4	2,934	7,488	0,7	31,86	31,32
7	2,942	7,954	0,72	30,77	
19	2,676	8,596	0,98	\	

PROVINI INV. 400H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
14	2,900	8,117	0,74	31,44	31,53
28	2,893	7,673	0,69	\	
33	2,895	7,972	0,73	31,63	

PROVINI INV. 600H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
12	2,658	8,472	0,71	31,53	31,08
25	2,700	9,192	0,76	30,62	
36	2,875	7,755	0,87	\	

PROVINI INV. 800H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
23	2,760	8,907	0,99	\	30,68
29	2,898	8,998	0,80	30,68	
31	2,923	8,608	0,66	\	

PROVINI INV. 1000H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
1	2,848	7,725	0,65	\	30,25
22	2,952	8,195	0,70	28,94	
37	2,695	8,347	0,71	31,56	

- FATTORE DI SMORZAMENTO**

PP TD 10					
ORE INVECCHIAMENTO	PROVINO NUMERO		RAPPORTO SMORZAMENTO (%)		MEDIA RAPPORTO SMORZAMENTO (%)
NUOVI	46	ROSSO	3,08		3,36
		VERDE	3,22		
	47	ROSSO	3,22		
		VERDE	3,33		
	50	ROSSO	3,7		
		VERDE	3,58		
200	7	ROSSO	3,39		3,37
		VERDE	3,46		
	19	ROSSO	3,29		
		VERDE	3,4		
	30	ROSSO	3,27		
		VERDE	3,28		
400	14	ROSSO	3,23		3,30
		VERDE	3,39		
	28	ROSSO	3,33		
		VERDE	3,22		
	33	ROSSO	3,45		
		VERDE	3,16		

600	3	ROSSO	3,12	3,25
		VERDE	3,41	
	38	ROSSO	3,13	
		VERDE	3,39	
	40	ROSSO	3,24	
		VERDE	3,22	
800	6	ROSSO	3,24	3,27
		VERDE	3,24	
	13	ROSSO	3,42	
		VERDE	3,45	
	16	ROSSO	3,11	
		VERDE	3,18	
1000	2	ROSSO	3,17	3,24
		VERDE	3,26	
	11	ROSSO	3,19	
		VERDE	3,14	
	24	ROSSO	3,31	
		VERDE	3,35	

- **VELOCITA' DI COMBUSTIONE**

PP TD 10		
ORE DI INVECCHIAMENTO [h]	TEMPO PER BRUCIARE 50 mm [s]	VELOCITA' DI COMBUSTIONE [mm/min]
NUOVI	99	30,3
200	81	37,0
400	116	25,9
600	103	29,1
800	107	28,0
1000	108	27,8

- **DENSITA'**

1. NUOVI

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
46	2,2318	10,1870	80,93	2,8670	944,22	944,33
47	2,2132	9,97570	80,82	2,9123	942,59	
50	2,1218	10,0286	80,87	2,7650	946,20	

2. INVECCHIATI 200H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
7	2,22950	9,9700	80,99	2,903	951,12	949,95
19	2,11510	9,8900	80,95	2,797	944,55	
30	2,26851	10,134	80,87	2,901	954,17	

3. INVECCHIATI 400H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
14	2,2971	10,153	80,44	2,955	951,82	948,49
28	2,1949	9,7030	80,62	2,954	949,85	
33	2,2724	10,026	81,35	2,952	943,81	

4. INVECCHIATI 600H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
3	2,2860	10,338	80,19	2,874	959,47	956,84
38	2,3129	10,144	80,57	2,985	948,05	
40	2,2805	10,350	79,64	2,873	963,00	

5. INVECCHIATI 800H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
6	2,3978	10,115	80,58	3,045	966,12	961,14
13	2,5721	10,184	80,99	3,213	970,57	
16	2,3485	10,390	80,96	2,949	946,74	

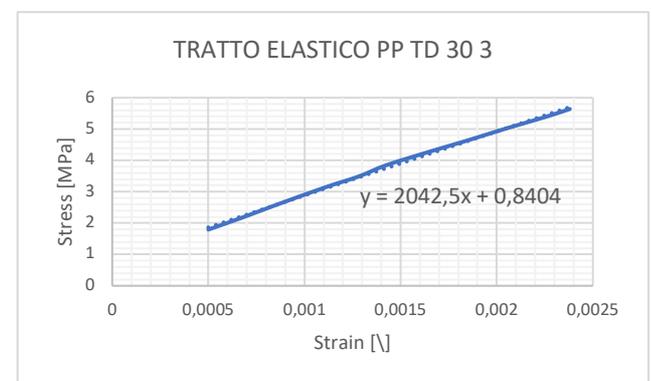
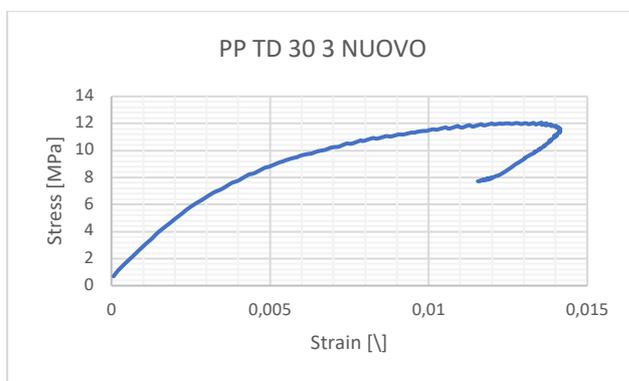
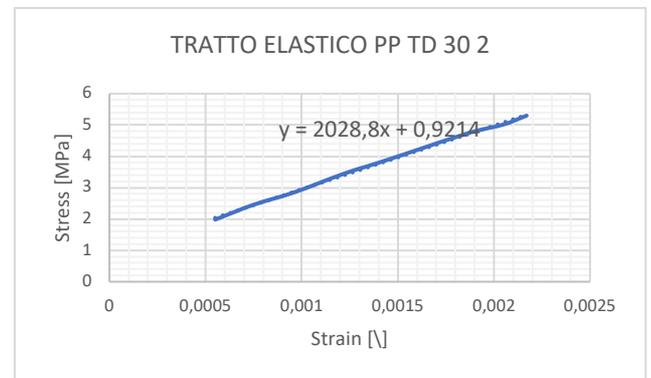
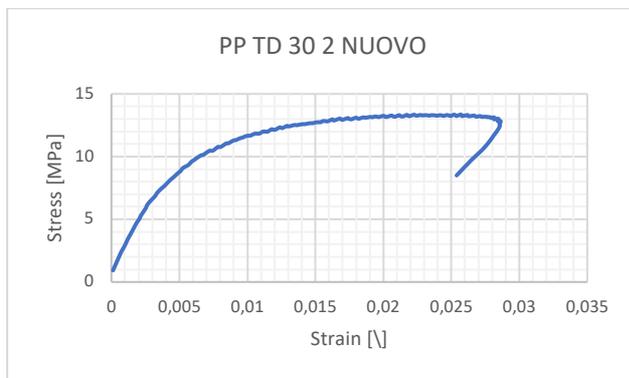
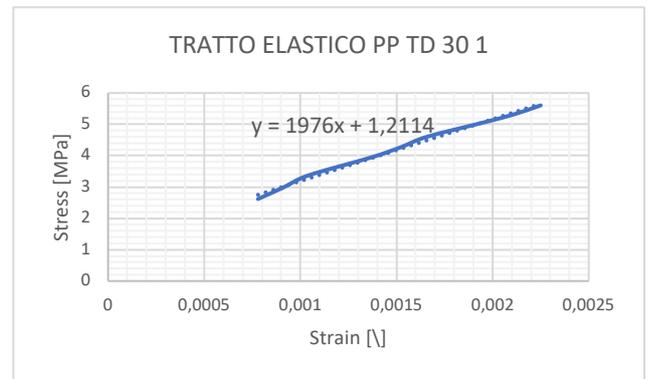
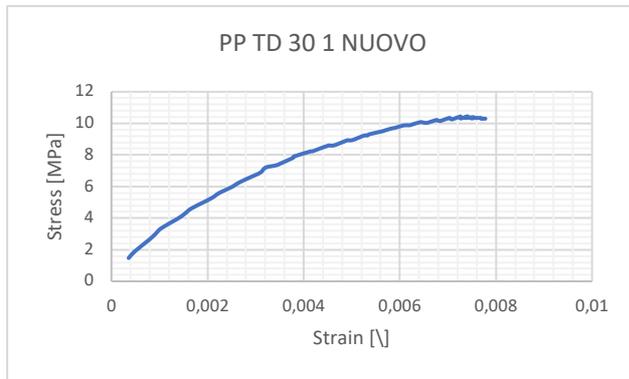
6. INVECCHIATI 1000H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
2	2,3890	10,056	79,51	3,1043	962,51	961,34
11	2,5361	10,050	79,83	3,2614	969,24	
24	2,5679	10,011	79,27	3,3980	952,29	

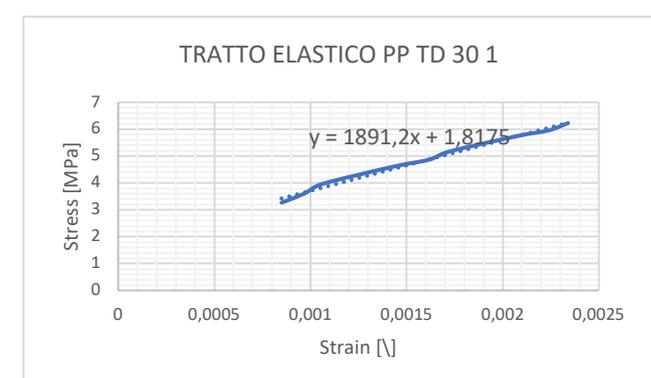
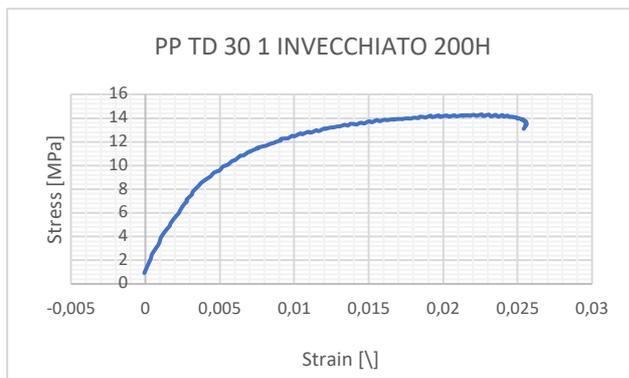
5.3. Polipropilene con talco al 30%

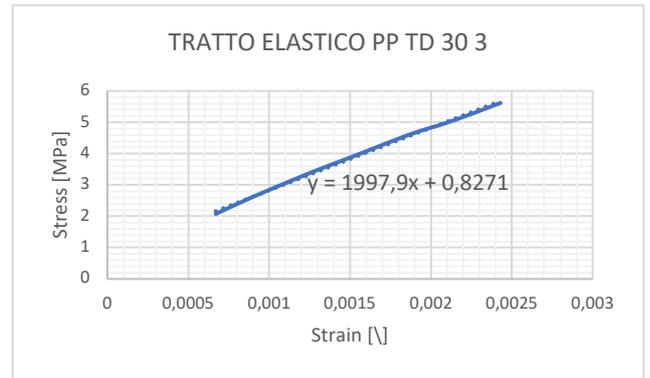
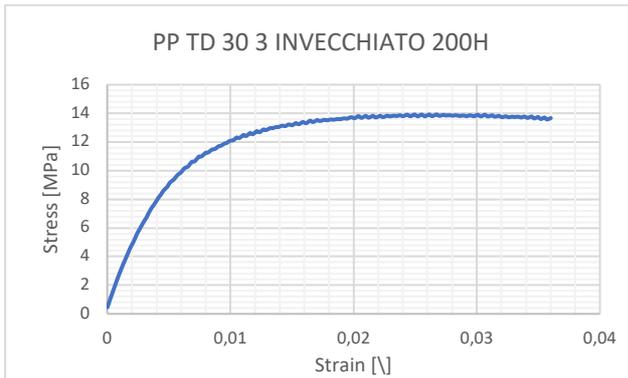
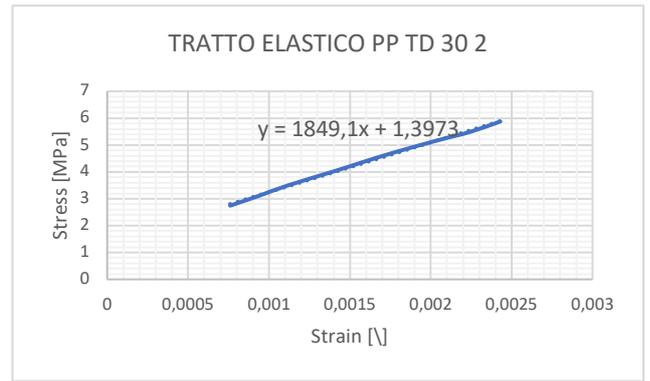
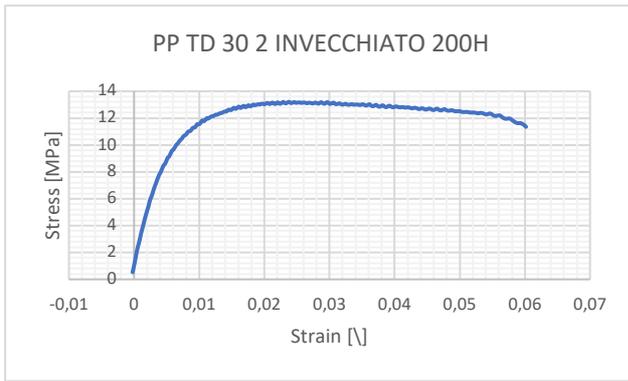
• MODULO ELETSTICO A TRAZIONE

1. NUOVI

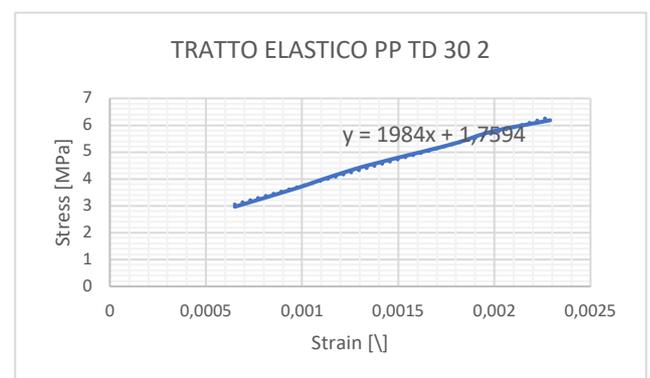
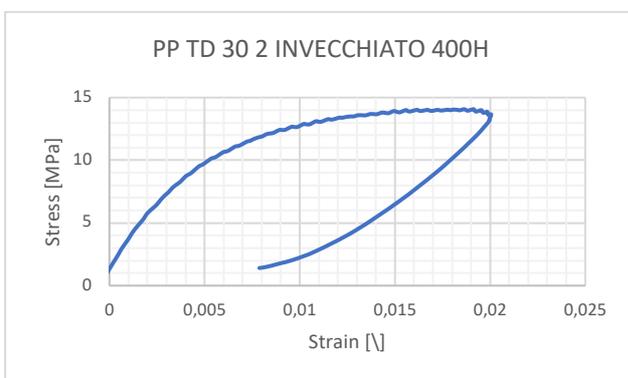
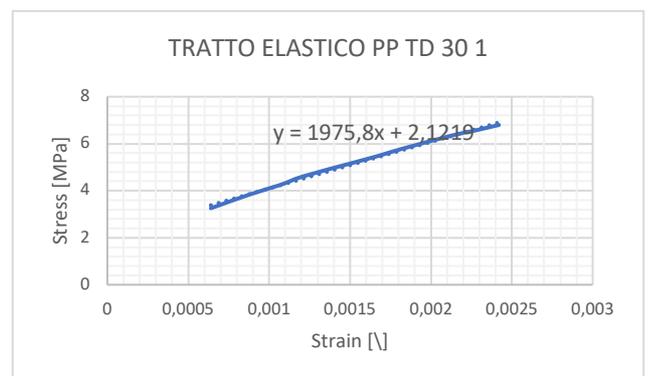
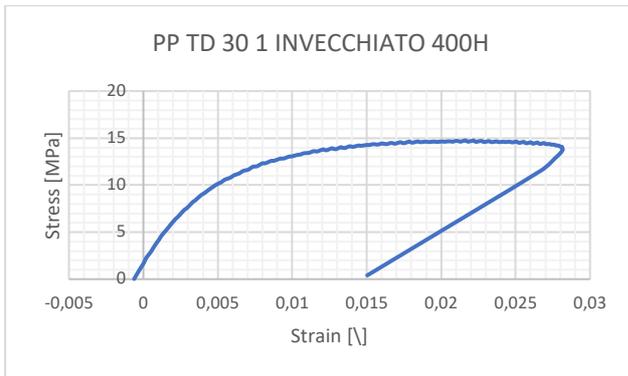


2. INVECCHIATI 200H

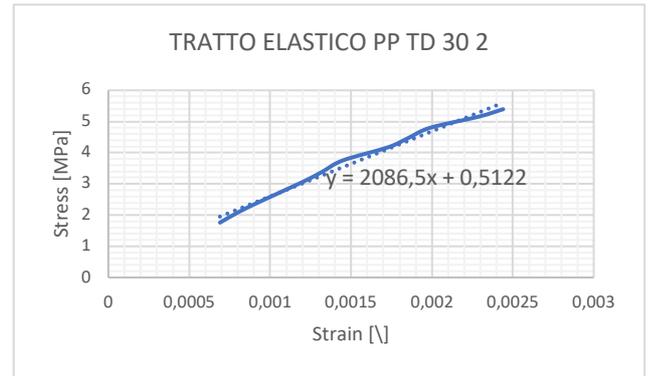
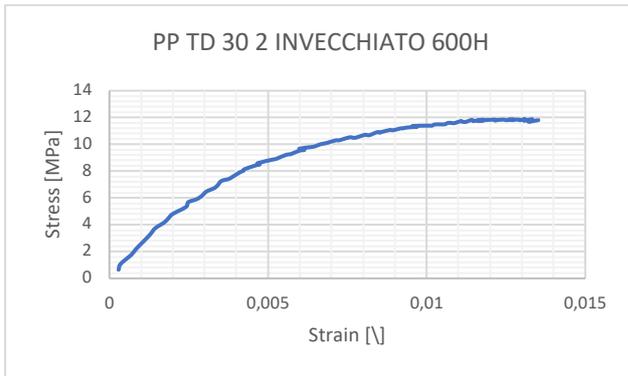
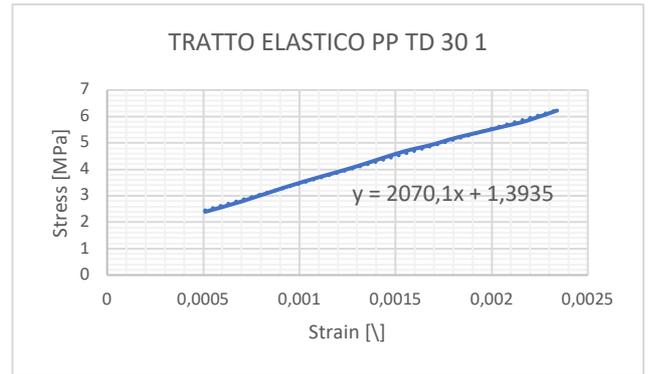
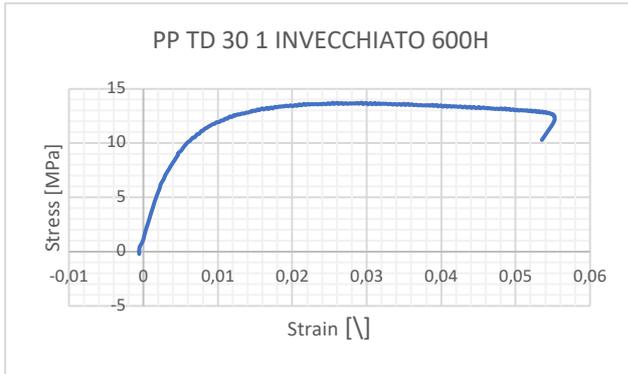




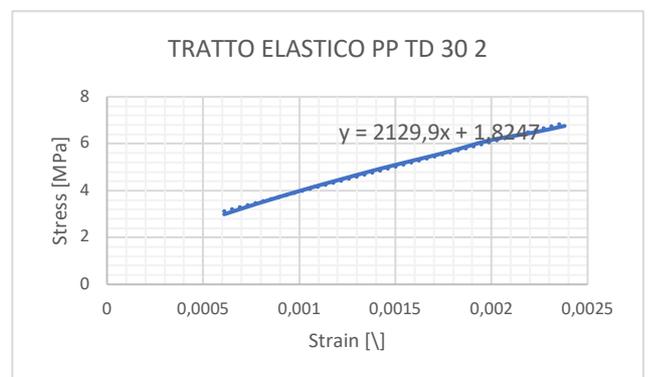
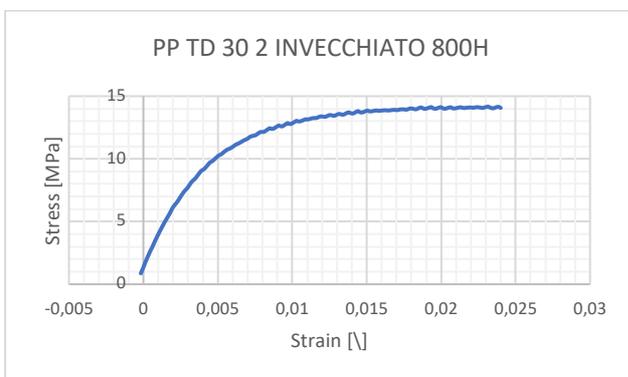
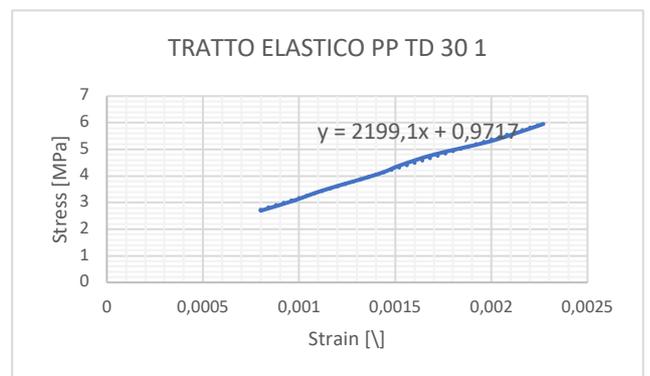
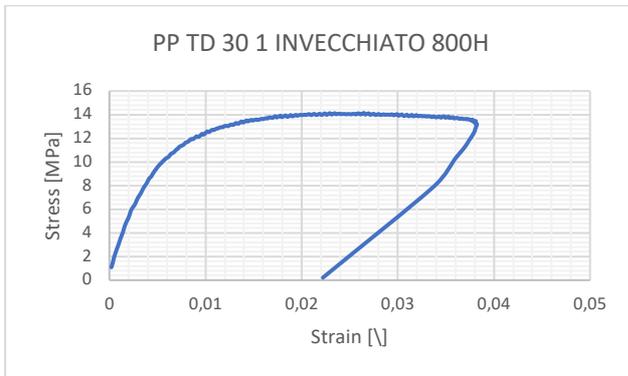
3. INVECCHIATI 400H

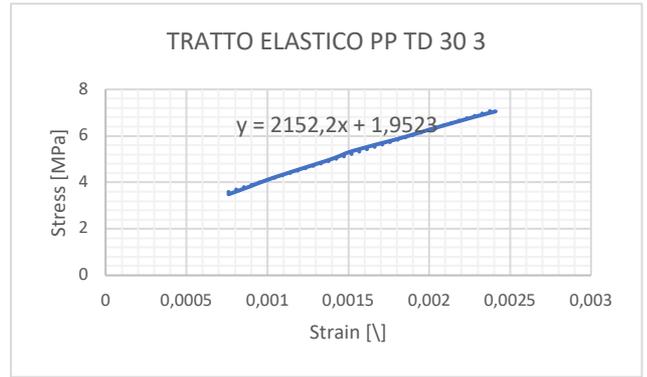
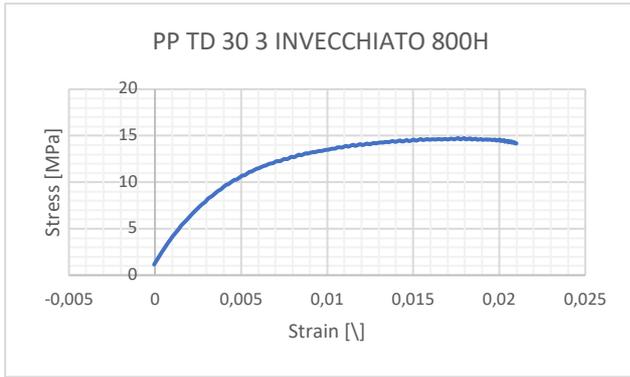


4. INVECCHIATI 600H

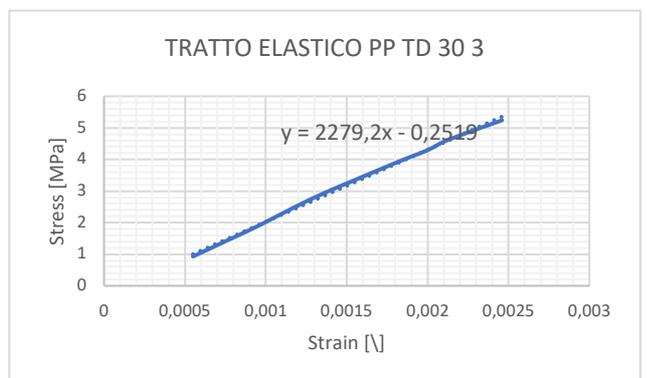
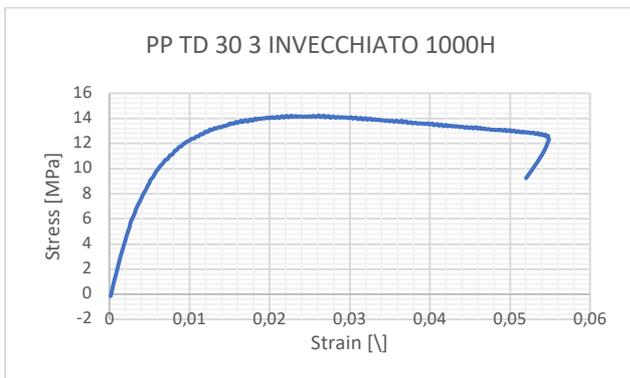
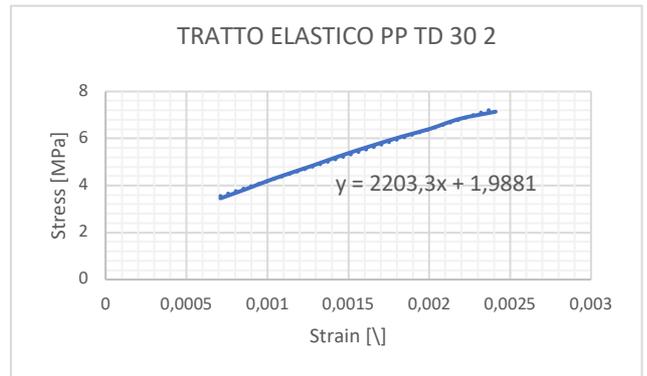
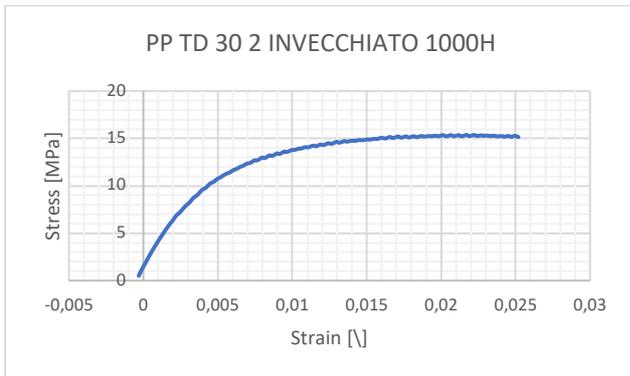
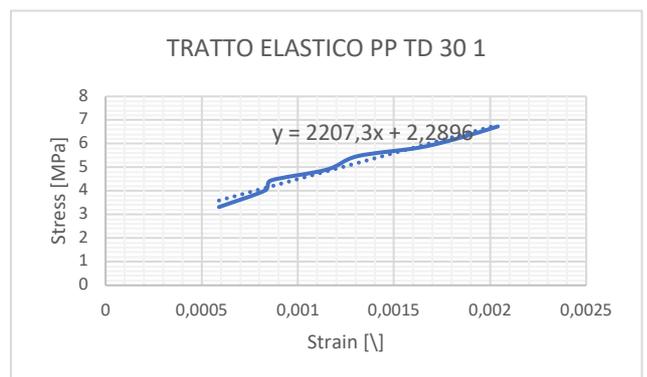
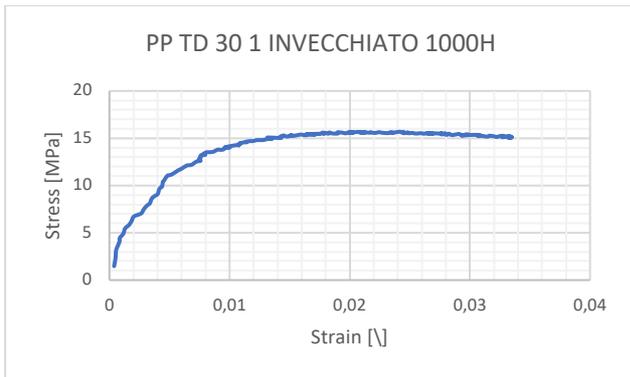


5. INVECCHIATI 800H





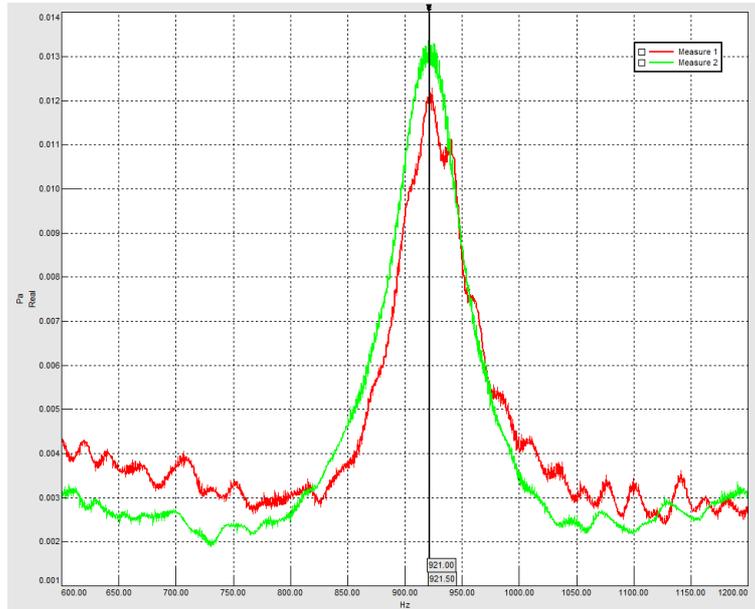
6. INVECCHIATI 1000H



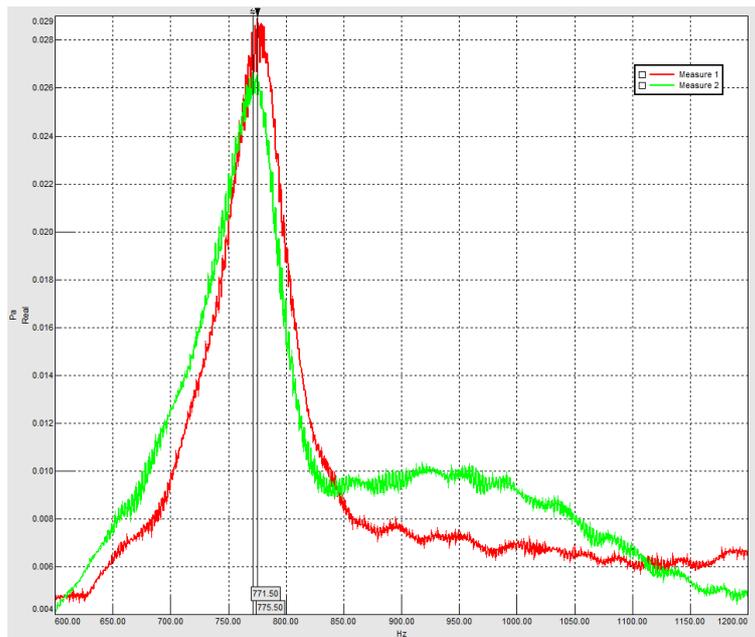
- MODULO ELASTICO FLESSIONALE**

1. NUOVI

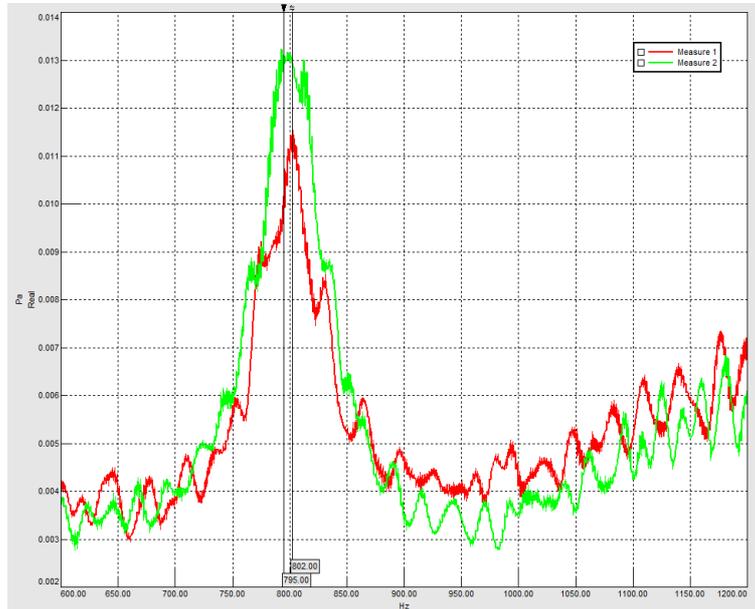
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,7313	10,18	75,68	3,281	921,25	1,012376732	2680,5424



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,7019	9,923	80,11	3,093	773,5	1,009816172	2708,25087

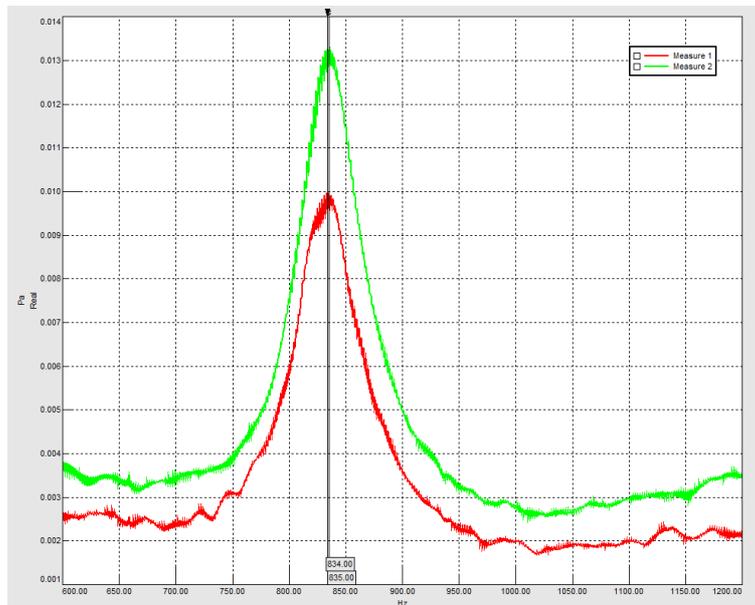


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
3,197	11,29	80,21	3,203	798,5	1,010500564	2714,745033

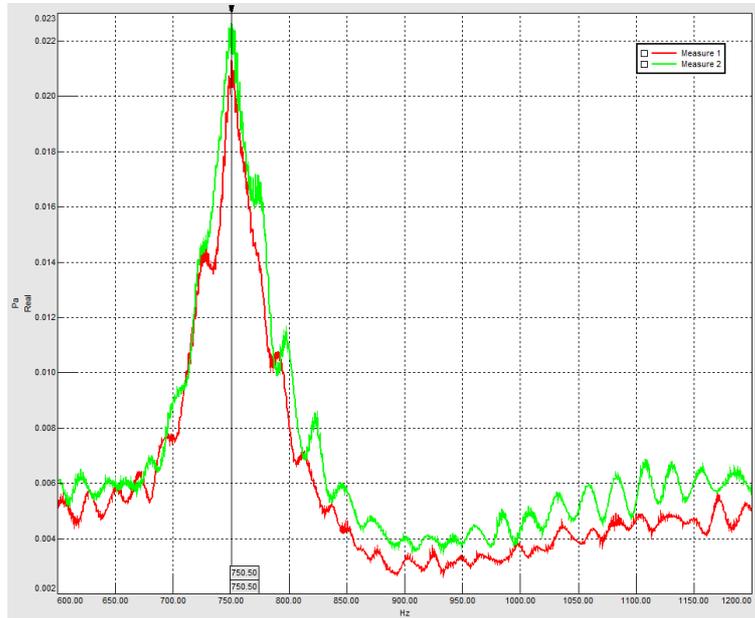


2. INVECCHIATI 200H

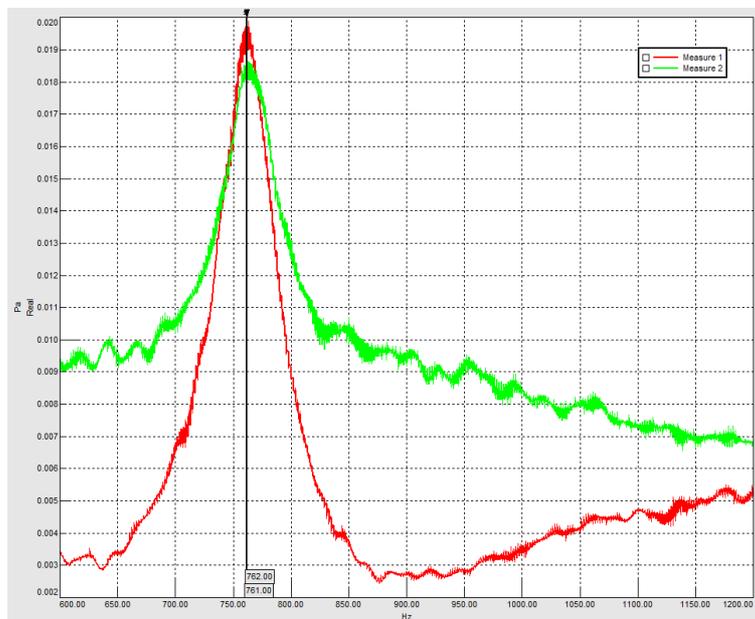
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,6292	8,9428	80,11	3,3023	834,5	1,011189621	2800,433285



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,8103	9,9686	81,33	3,113	750,5	1,009647449	2708,842985

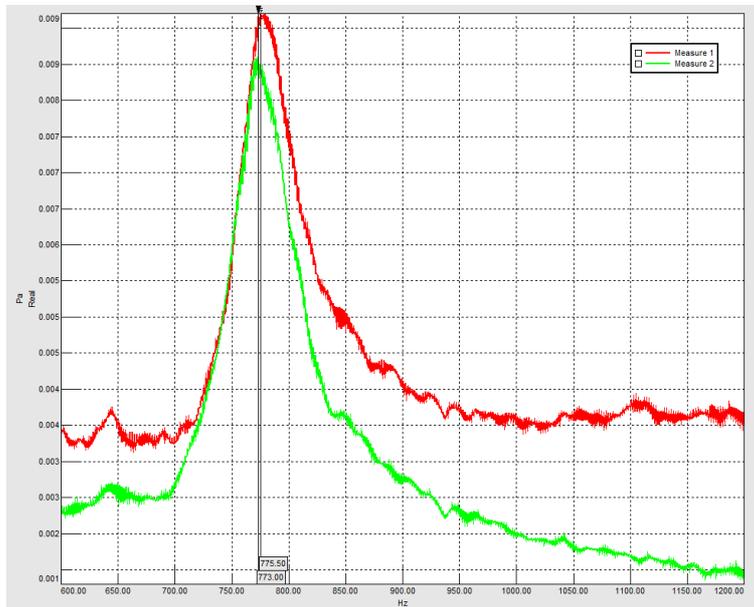


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
3,0831	10,5825	81,92	3,2213	761,5	1,010182121	2659,465488

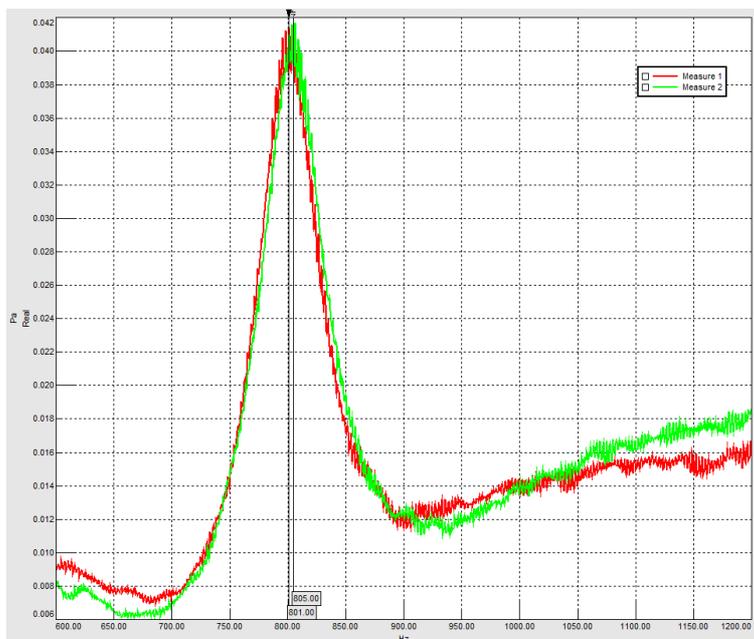


3. INVECCHIATI 400H

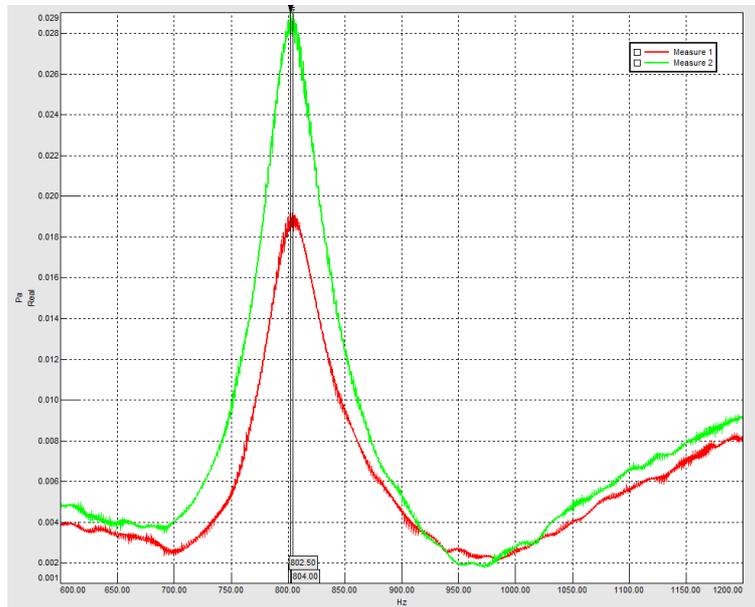
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,709	9,5486	80,72	3,165	774,25	1,010123738	2700,274063



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,9089	10,011	80,44	3,227	803	1,01059765	2778,812304

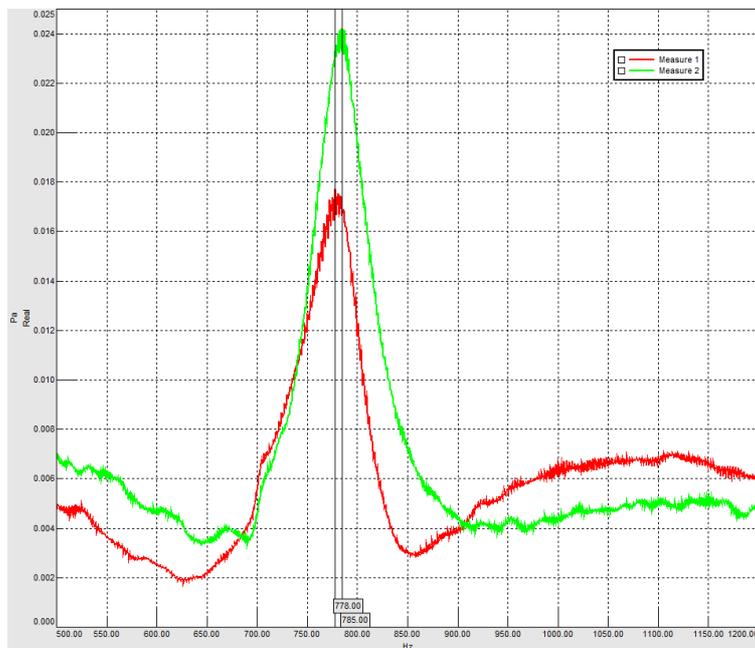


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,8251	9,87	79,85	3,233	803,25	1,010794868	2664,820959

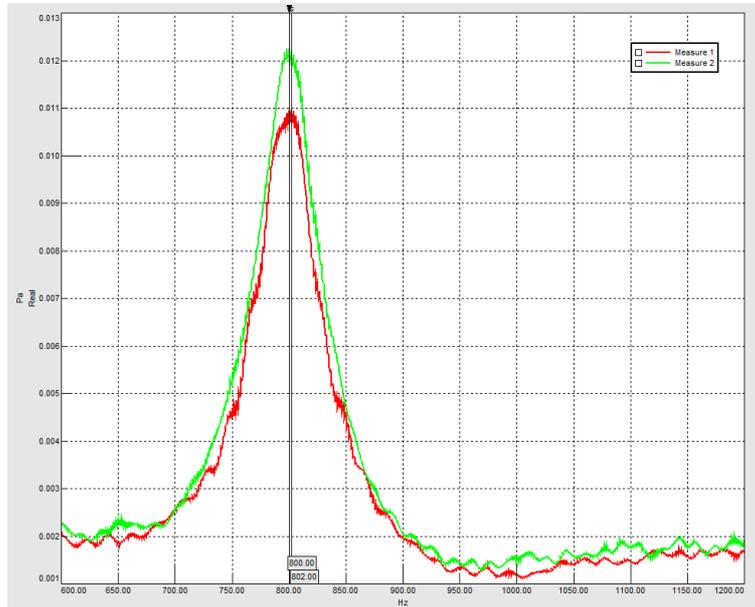


4. INVECCHIATI 600H

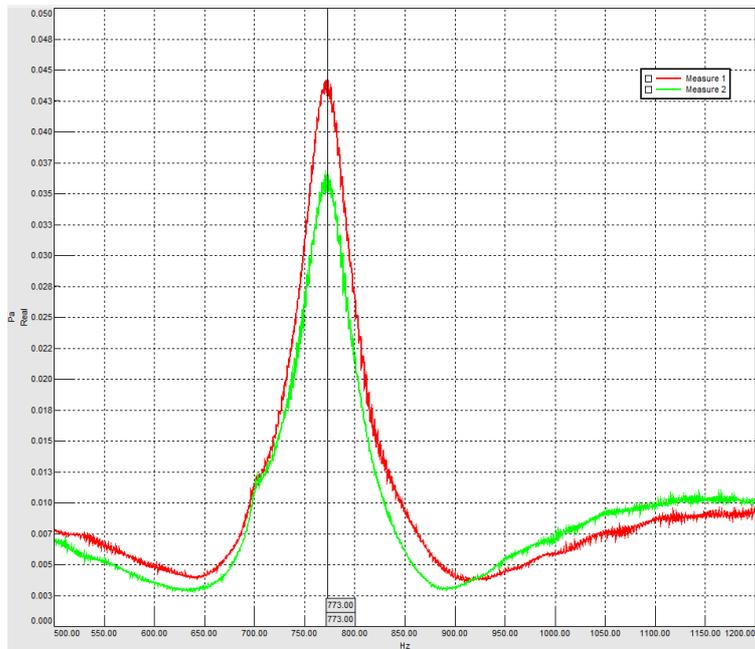
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,6152	9,1366	80,49	3,169	781,5	1,01020743	2741,745264



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
3,0121	10,547	79,97	3,22	801	1,010676117	2687,88304

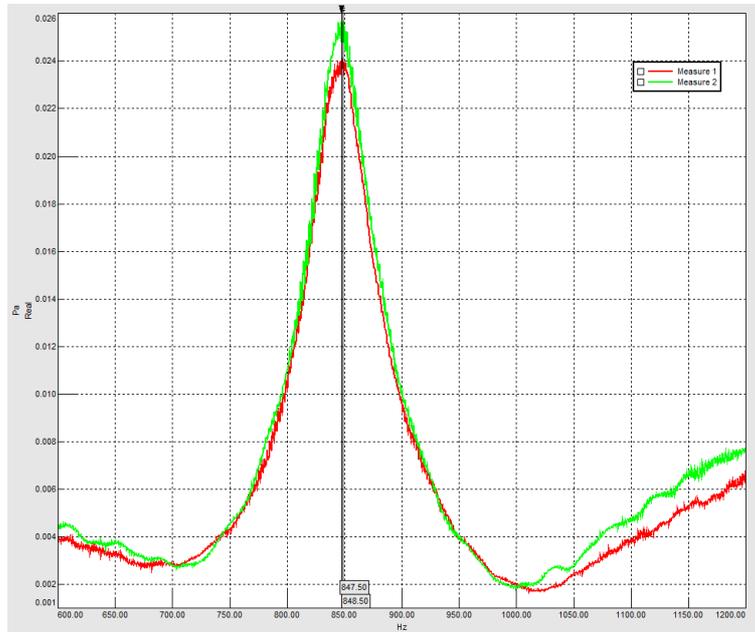


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
3,187	11,006	81,32	3,185	773	1,010101361	2756,255782

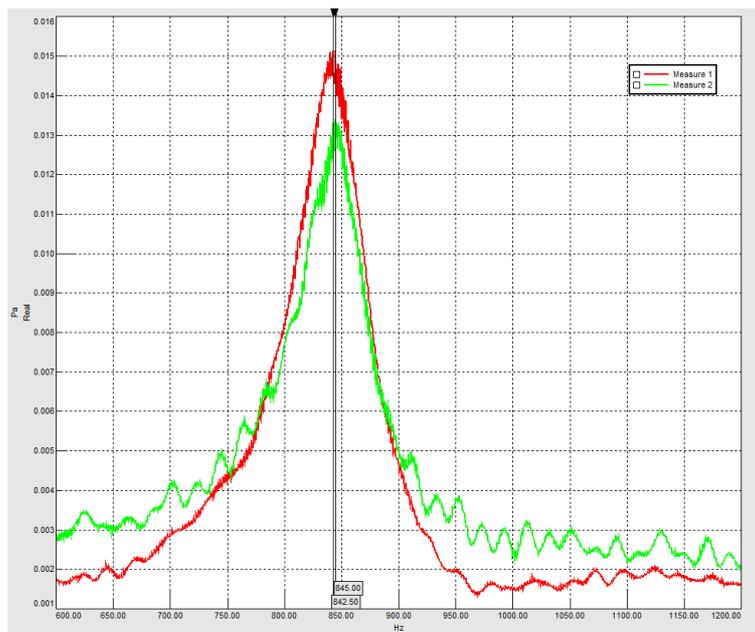


5. INVECCHIATI 800H

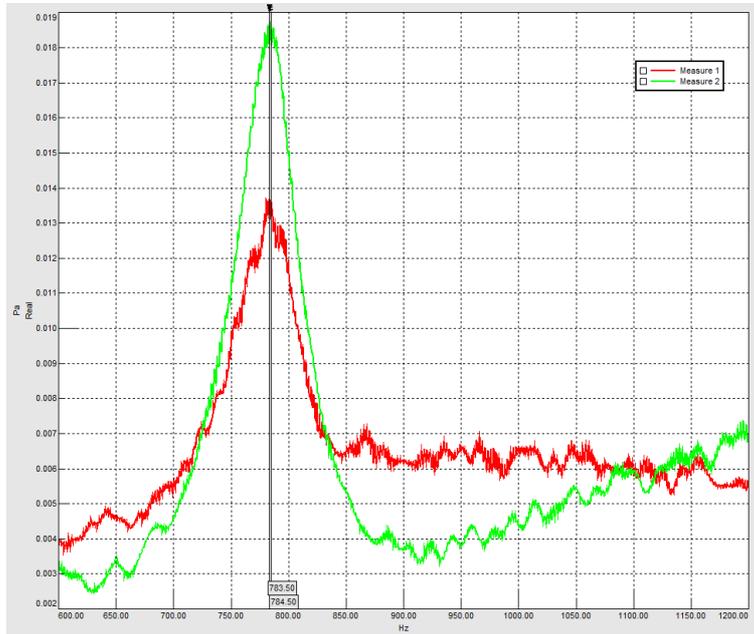
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
3,0283	10,374	79,58	3,298	848	1,011309651	2825,970203



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
3,0095	10,327	79,64	3,288	843,75	1,011224239	2824,702793

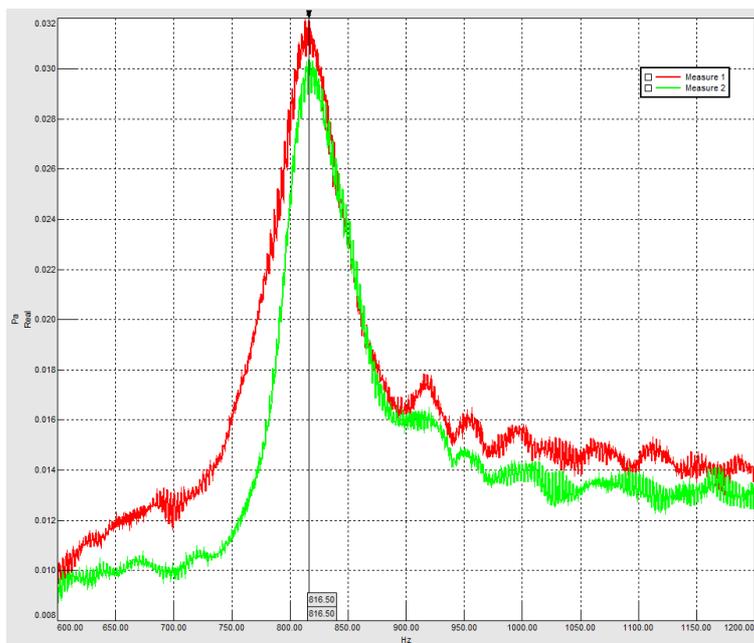


MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,9792	10,56	79,7	3,139	784	1,010214609	2716,825514

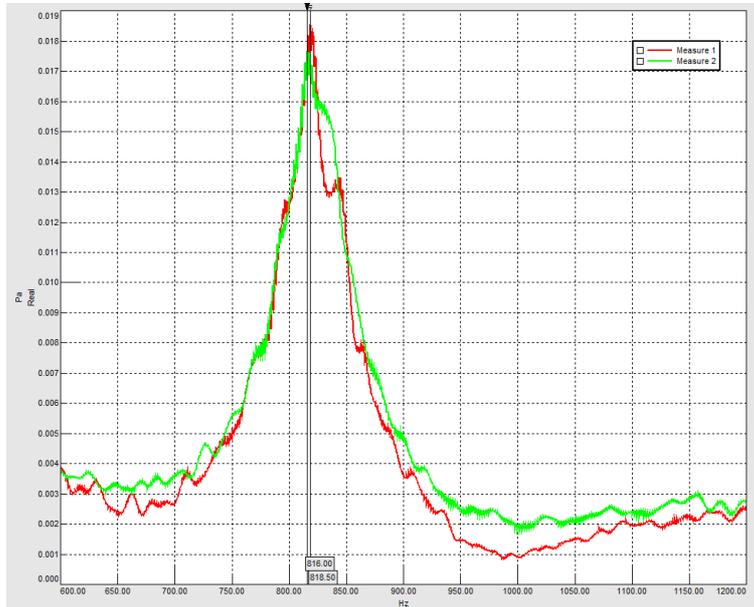


6. INVECCHIATI 1000H

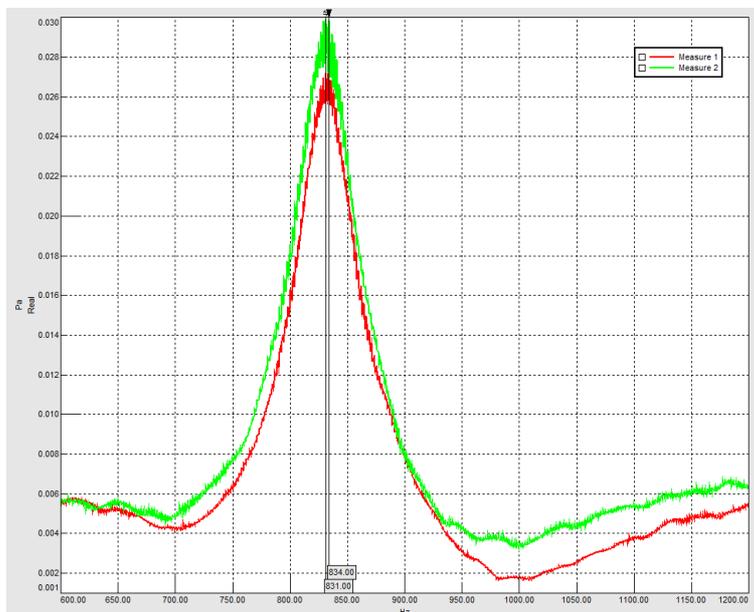
MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,7753	9,649	79,96	3,2087	816,5	1,010603969	2841,39256



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,5835	9,0075	79,58	3,188	817,25	1,010567799	2853,090804



MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	FREQUENZA DI RISONANZA [Hz]	FATTORE T1	MODULO ELASTICO [MPa]
2,9643	10,1525	80,04	3,27675	832,5	1,01103642	2825,237583



- ENERGIA ASSORBITA A IMPATTO**

In quest'ultimo caso il pendolo, al momento dello sgancio possedeva un'energia pari a 6 Joule.

PROVINI NUOVI	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
70	3,165	8,233	0,65	24,94	25,24
91	3,102	7,955	0,63	25,53	
\	\	\	\	\	

PROVINI INV. 200H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
36	3,208	7,506	0,57	\	24,91
38	3,204	8,388	0,64	23,81	
41	3,108	8,416	0,68	26,00	

PROVINI INV. 400H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
26	3,083	7,512	0,53	\	24,85
27	3,075	7,493	0,58	\	
29	3,183	7,965	0,63	24,85	

PROVINI INV. 600H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
14	3,138	7,898	0,60	24,21	24,33
16	3,105	7,540	0,55	\	
25	3,253	8,301	0,66	24,44	

PROVINI INV. 800H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
12	3,117	7,508	0,53	\	23,82
17	3,197	8,337	0,64	24,01	
18	3,223	8,532	0,65	23,64	

PROVINI INV. 1000H	DIMENSIONI [mm]		ENERGIA ASSORBITA [J]	ENERGIA PER UNITA' DI SUP. [kJ/m ²]	MEDIA ENERGIA ASSORBITA [kJ/m ²]
4	3,375	8,701	0,70	23,84	23,46
6	3,258	8,983	0,67	22,89	
7	3,182	8,107	0,61	23,65	

• **FATTORE DI SMORZAMENTO**

PP TD 30				
ORE INVECCHIAMENTO	PROVINO NUMERO		RAPPORTO SMORZAMENTO (%)	MEDIA RAPPORTO SMORZAMENTO (%)
NUOVI	70	ROSSO	2,83	2,90
		VERDE	2,83	
	91	ROSSO	2,94	
		VERDE	3,26	
	69	ROSSO	2,7	
		VERDE	2,86	
200	34	ROSSO	2,8	2,80
		VERDE	3,01	
	35	ROSSO	2,82	
		VERDE	2,64	
	41	ROSSO	2,72	
		VERDE	2,78	
400	26	ROSSO	2,71	2,79
		VERDE	2,56	
	29	ROSSO	2,82	
		VERDE	2,83	
	32	ROSSO	2,97	
		VERDE	2,85	
600	13	ROSSO	2,57	2,77
		VERDE	2,86	
	15	ROSSO	2,80	
		VERDE	2,83	
	23	ROSSO	2,88	
		VERDE	2,66	
800	19	ROSSO	2,82	2,72
		VERDE	2,53	
	20	ROSSO	2,83	
		VERDE	2,86	
	21	ROSSO	2,74	
		VERDE	2,51	
1000	1	ROSSO	2,79	2,73
		VERDE	2,69	
	5	ROSSO	2,61	
		VERDE	2,76	
	6	ROSSO	2,83	
		VERDE	2,67	

- VELOCITA' DI COMBUSTIONE

PP TD 30		
ORE DI INVECCHIAMENTO [h]	TEMPO PER BRUCIARE 50 mm [s]	VELOCITA' DI COMBUSTIONE [mm/min]
NUOVI	91	33,0
200	88	34,1
400	71	42,3
600	85	35,3
800	102	29,4
1000	86	34,9

- DENSITA'

1. NUOVI

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
70	2,7313	10,18	75,68	3,281	1080,52	1093,88
91	2,7019	9,923	80,11	3,093	1098,90	
69	3,197	11,29	80,21	3,203	1102,21	

2. INVECCHIATI 200H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
35	2,6292	8,9428	80,11	3,3023	1111,34	1109,62
41	2,8103	9,9686	81,33	3,1130	1113,51	
34	3,0831	10,5825	81,92	3,2213	1104,02	

3. INVECCHIATI 400H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
26	2,709	9,5486	80,72	3,165	1110,49	1112,88
29	2,9089	10,011	80,44	3,227	1119,39	
32	2,8251	9,8701	79,85	3,233	1108,76	

4. INVECCHIATI 600H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
13	2,6152	9,1366	80,49	3,169	1122,16	1116,41
15	3,0121	10,5470	79,97	3,220	1109,07	
23	3,1870	11,0060	81,32	3,185	1118,01	

5. INVECCHIATI 800H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
19	3,0283	10,374	79,58	3,298	1112,24	1117,61
20	3,0095	10,327	79,64	3,288	1112,90	
21	2,9792	10,560	79,7	3,139	1127,68	

6. INVECCHIATI 1000H

PROVINO NUMERO	MASSA DELLA BARRA [g]	LARGHEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	SPESSORE [mm]	DENSITA' [Kg/m ³]	DENSITA' MEDIA [Kg/m ³]
1	2,7753	9,6490	79,96	3,2087	1121,05	1121,62
5	2,5835	9,0075	79,58	3,1880	1130,53	
6	2,9643	10,1525	80,04	3,27675	1113,27	

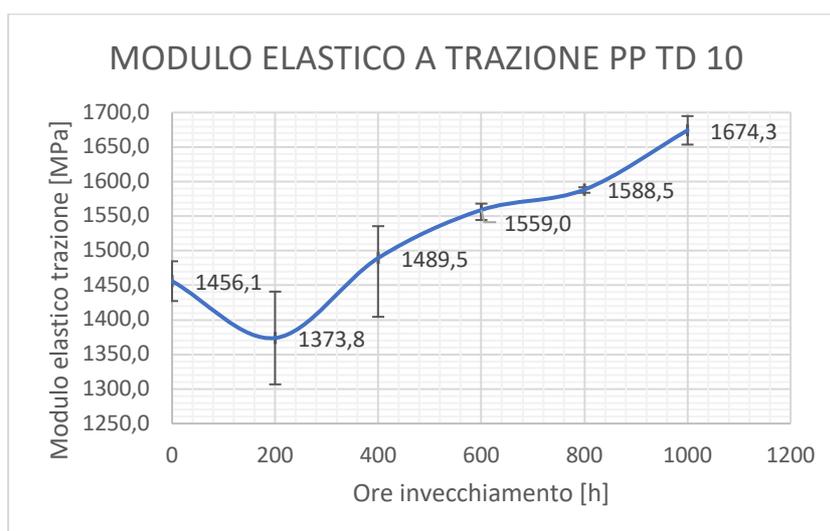
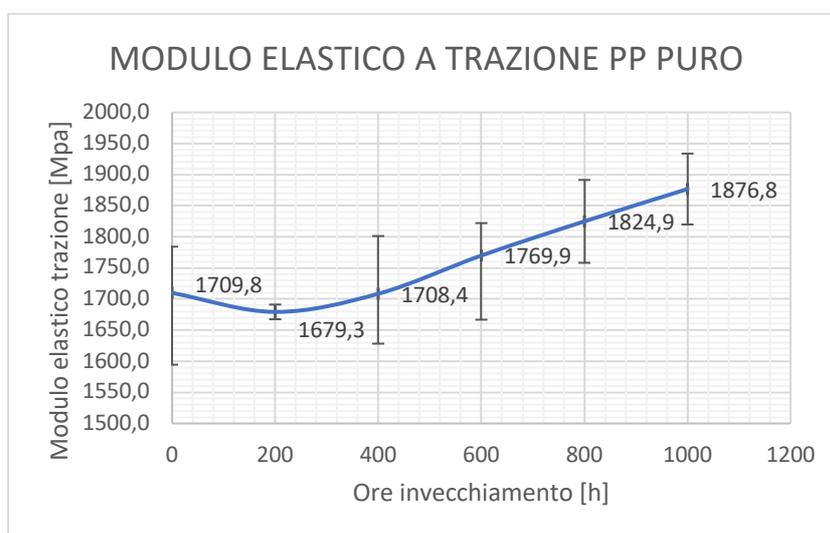
6. CONFRONTI E CONCLUSIONI

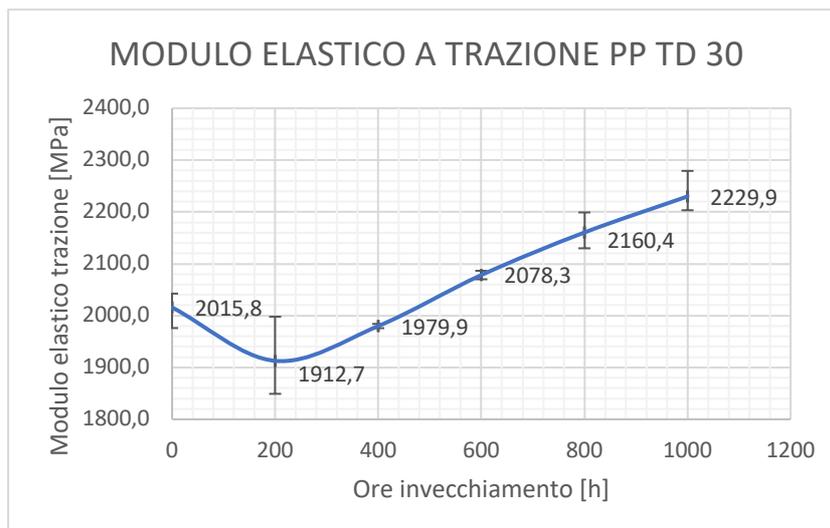
In questo capitolo verranno riportati i risultati ottenuti dai vari test sui provini sottoposti a invecchiamento; tali risultati sono categorizzati in base alle diverse prove effettuate e, per ciascuna delle sei proprietà analizzate, i grafici sono ordinati in ordine crescente di quantitativo di talco.

Avendo come scopo quello di analizzare l'andamento delle principali proprietà dei polimeri al variare delle ore di invecchiamento, tutti i grafici presenteranno il tempo (inteso come ore di esposizione agli UV) sull'asse delle ascisse e la proprietà considerata sulle ordinate. Per ogni proprietà del polimero misurata, verranno prima confrontati i valori di questa a nuovo, al fine di comprendere come la presenza di talco influenzi tale grandezza, per poi analizzare come questa vari in funzione delle ore di invecchiamento, con lo scopo di capire come la presenza di talco influenzi questa variazione.

6.1. Modulo elastico a trazione

In questo paragrafo sono riportati i risultati ottenuti dai test di trazione effettuati sui vari provini invecchiati e non.





Partendo dal confronto dei valori del modulo elastico a nuovo, a primo impatto sembra non esista una correlazione tra il quantitativo di talco e il valore del modulo elastico misurato; in realtà bisogna tener presente che il polimero di base, al quale è stato addizionato il talco, non è lo stesso in quanto varia la quantità di etilene/elastomero aggiunto.

Per quanto riguarda infatti, il polipropilene etichettato con “puro”, presenta un modulo elastico più alto rispetto a quello caricato col 10% proprio perché contiene una minore quantità di elastomero (max 2%). Questo lo si può affermare con certezza in quanto aumentando la percentuale di EPDM aggiunto nella catena polipropilenica non si potrebbe mai raggiungere un modulo elastico così elevato.

Negli altri 2 casi invece, si ha a che fare con i classici TPO, contenenti dal 20 al 30% di EPR. In questi casi, l’unico modo per ottenere i valori di modulo elastico misurati, è proprio grazie all’aggiunta di talco; si può infatti notare come, triplicando la quantità di talco presente all’interno del polimero, passando dal 10 al 30%, il modulo elastico misurato a trazione aumenti di 550 MPa circa.

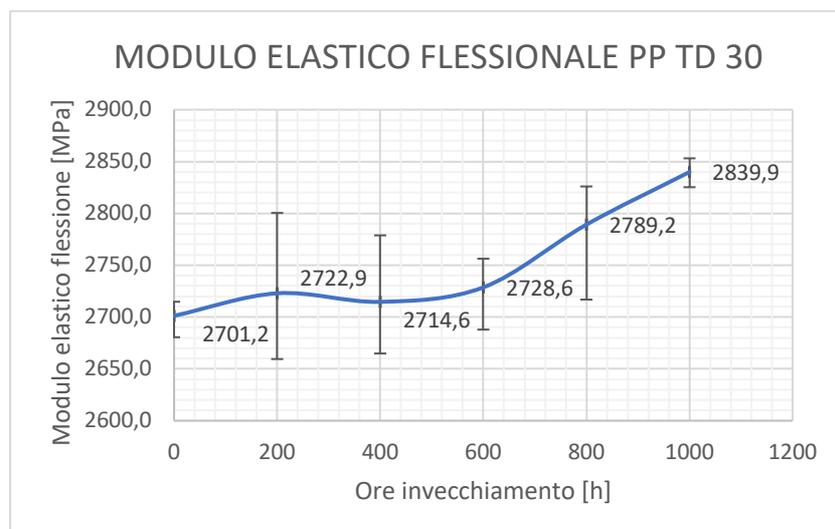
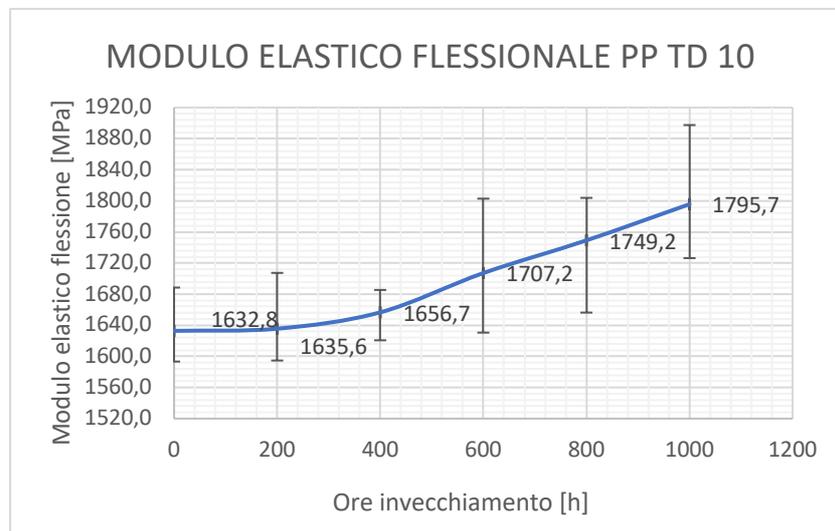
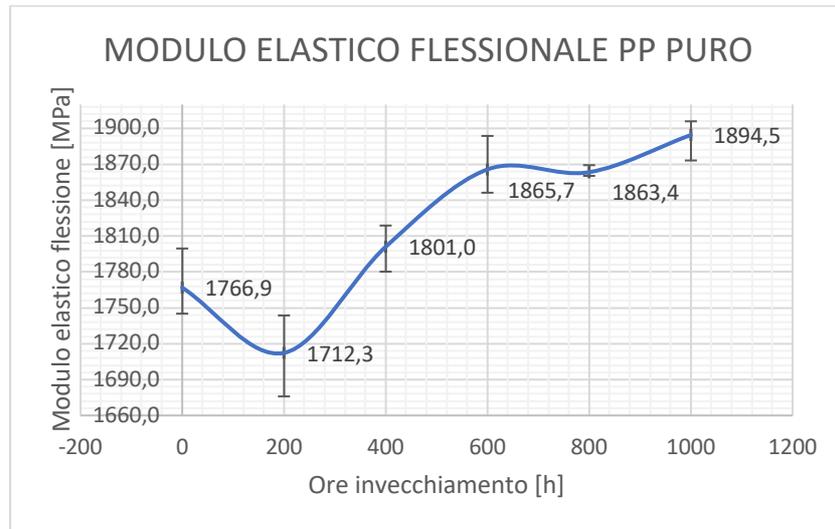
Ciò conferma l’effetto benefico del talco sul modulo elastico, il quale, soprattutto se nella forma appiattita, induce sempre e comunque un aumento del modulo elastico.

Chiarita quella che è la situazione pre-invecchiamento, osservando i grafici, si può notare come globalmente il valore del modulo elastico aumenti con l’aumentare delle ore di esposizione dei polimeri alla radiazione UV; tale fenomeno si può spiegare affermando che l’energia posseduta dalla radiazione UV sarà in grado di rompere dei legami; la rottura di legami darà luogo ad una forte variazione della struttura molecolare, difatti andrà a diminuire la lunghezza media delle catene polimeriche, formando così molecole di dimensioni più piccole. La diminuzione delle dimensioni delle molecole favorirà un aumento delle regioni cristalline a scapito di quelle amorfe, che da un lato implicherà un aumento delle proprietà meccaniche, ma dall’altro provocherà un infragilimento del polimero.

Si nota però che, in una prima fase, ovvero dopo circa 200 h di invecchiamento, il modulo elastico è diminuito in tutti e tre i casi; una spiegazione plausibile di questo andamento la si potrebbe trovare ipotizzando che l’energia assorbita dalle molecole in quel lasso temporale risulti insufficiente per rompere i legami, ma è tale solo da provocarne un indebolimento. Essendo i legami più “morbidi” avremo una struttura meno rigida e più deformabile, che si traduce in una diminuzione del modulo elastico.

La presenza del talco però, sembra giochi a sfavore del polimero nel momento in cui lo si analizza dal punto di vista dell’invecchiamento; si può infatti notare come il delta tra valore finale (dopo 1000h di invecchiamento) e iniziale (a nuovo) risulti maggiore nel caso in cui sia presente il talco; si passa infatti, da una differenza di 162 MPa nel caso del PP “puro” a un delta di oltre 200MPa nei restanti casi in cui è presente il talco. Apparentemente potrebbe sembrare un vantaggio però, se si considera che un aumento di modulo elastico produce un aumento di fragilità, potrebbe rendere i componenti che hanno subito tale invecchiamento inappropriati nello svolgere le loro funzioni.

6.2. Modulo elastico a flessione



Partendo, come nel caso precedente, dal confronto a nuovo, si può notare come l'ordine dei moduli elastici sia lo stesso; in particolare il PP TD 10 presenta un modulo elastico a flessione minore rispetto al PP "puro" e il PP TD 30, come nel caso precedente, è quello con il valore più alto. La spiegazione di tale distribuzione è la medesima del caso precedente.

Un confronto importante da fare è tra il modulo elastico flessionale e a trazione; si può notare come, per i polimeri caricati con talco, il modulo elastico misurato a flessione sia maggiore rispetto a quello ottenuto con la prova di trazione. Tale variazione può essere spiegata in due modi:

- L'orientamento delle particelle di talco all'interno della struttura polimerica principale è tale da conferire questa peculiare caratteristica all'intera struttura;
- La finitura superficiale, che entrambi i polimeri caricati con talco presentano, oltre a migliorare l'aspetto estetico e la sensazione al tatto, influenza le proprietà meccaniche. Il trattamento superficiale, non modificando la struttura interna del polimero, non influenzerà il valore del modulo elastico misurato a trazione, cosa che invece non si può affermare per la prova a flessione, in quanto il carico viene applicato perpendicolarmente alla superficie rifinita. Nella seguente figura si può apprezzare la differenza della finitura superficiale nei 3 polimeri:

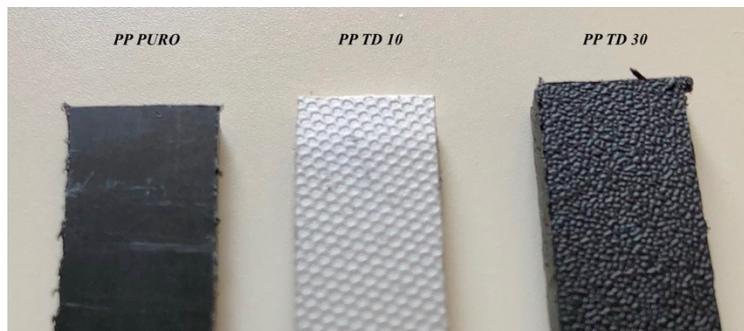


Figura 62: Differenti trattamenti superficiali dei provini testati.

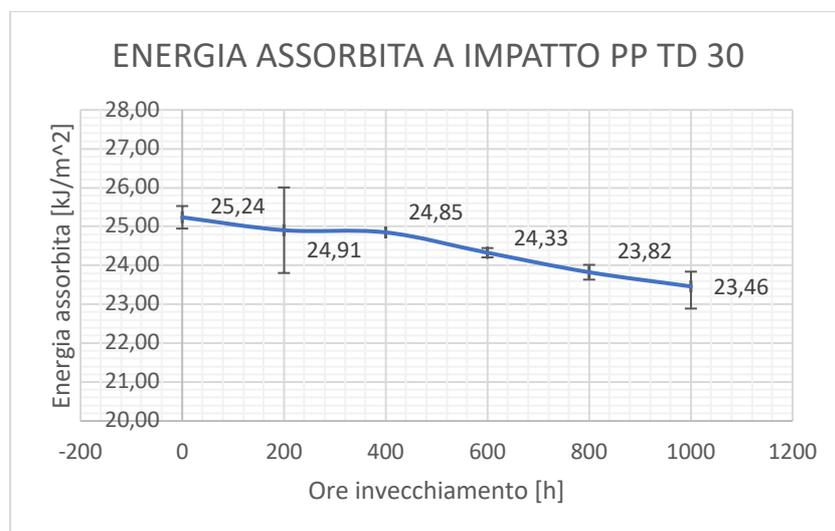
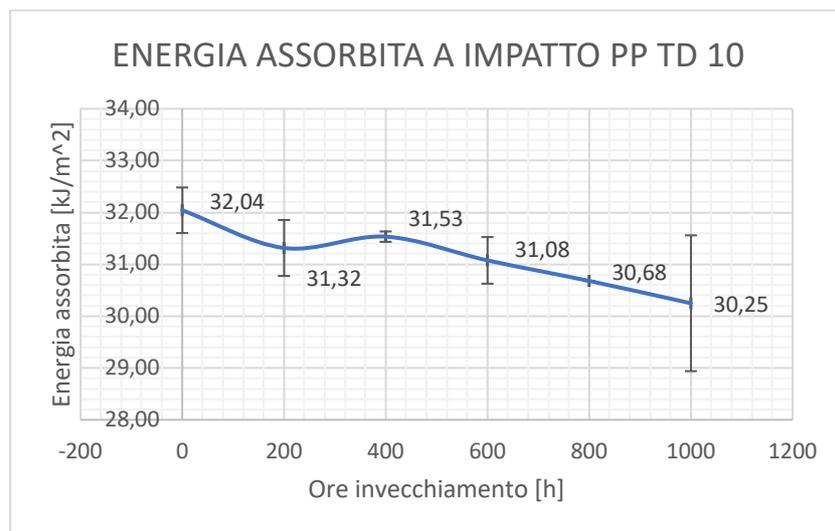
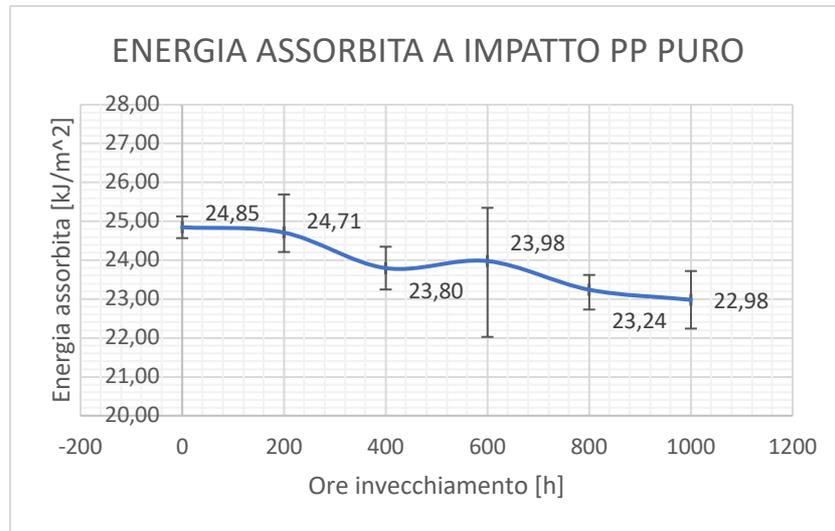
Per quanto riguarda l'andamento del modulo elastico flessionale al variare delle ore di invecchiamento, si nota come il PP "puro" presenta un brusco abbassamento, già riscontrato nella prova di trazione, in corrispondenza delle 200h di invecchiamento, mentre gli altri due non la presentano. La spiegazione di tale andamento e di tale discrepanza non è diretta e immediata come nei casi precedenti, ma potrebbe derivare sempre dal differente trattamento superficiale a cui i provini sono stati sottoposti.

Osservando invece, l'andamento nella sua totalità, si nota come anche in questo caso il valore del modulo elastico aumenti con l'aumentare delle ore di invecchiamento. La spiegazione è legata, come nel caso precedente, alla variazione del grado di cristallinità dei polimeri.

Il medesimo riscontro invece, si è trovato nel delta tra il modulo elastico flessionale a nuovo e dei provini invecchiati 1000h; difatti mentre nel caso del PP "puro" la differenza è di 128MPa circa, nel caso in cui si aggiunta una carica minerale di talco, questa differenza aumenta arrivando a 138 MPa per il PP TD 30 e a 163 MPa per il PP TD 10. Anche in questo caso quindi, sembra che la presenza di talco influenzi negativamente il provino sottoposto a invecchiamento.

6.3. Energia assorbita a impatto

Tale grandezza è un'importante indicatore di performance, soprattutto nel caso di polimeri utilizzati nel settore automotive. La variazione riscontrata, sottoponendo i provini a invecchiamento, è la seguente:



Confrontando i valori dell'energia assorbita a impatto dai provini a nuovo si è ottenuto ciò che si prevedeva; difatti, come già spiegato nel paragrafo 3.2. di questa trattazione, l'aggiunta di talco nei composti PP, in quantità intorno al 5/10% in peso, produce un aumento della resistenza all'urto. Si è però notato che se si continua ad aumentare la carica di talco, arrivando fino al 20-30%, la resistenza ad impatto incomincia a diminuire. I risultati ottenuti confermano questo, difatti il polimero con il valore più alto di energia assorbita a impatto è proprio quello caricato col 10% di talco.

Osservando invece l'andamento globale della proprietà considerata, si nota in ogni caso una diminuzione dell'energia assorbita a impatto con l'aumentare delle ore di invecchiamento. Tale diminuzione era prevedibile dal momento in cui, nei paragrafi precedenti, si è assunto che l'aumento del modulo elastico, provocato dall'invecchiamento del polimero, è accompagnato da un infragilimento. A livello chimico questo infragilimento può essere spiegato ricollegandosi all'aumento della cristallinità del polimero; nelle zone cristalline infatti, a differenza di quelle amorfe, le molecole sono ben impacchettate, organizzate e legate tra loro, limitando così i possibili movimenti relativi di quest'ultime; questa struttura renderà il materiale più rigido ma allo stesso tempo più fragile, ragion per cui l'energia assorbita a impatto tende a diminuire.

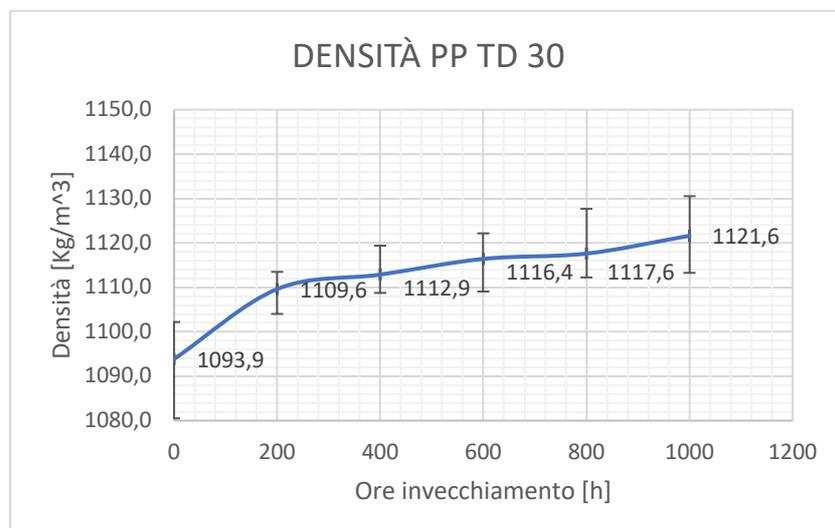
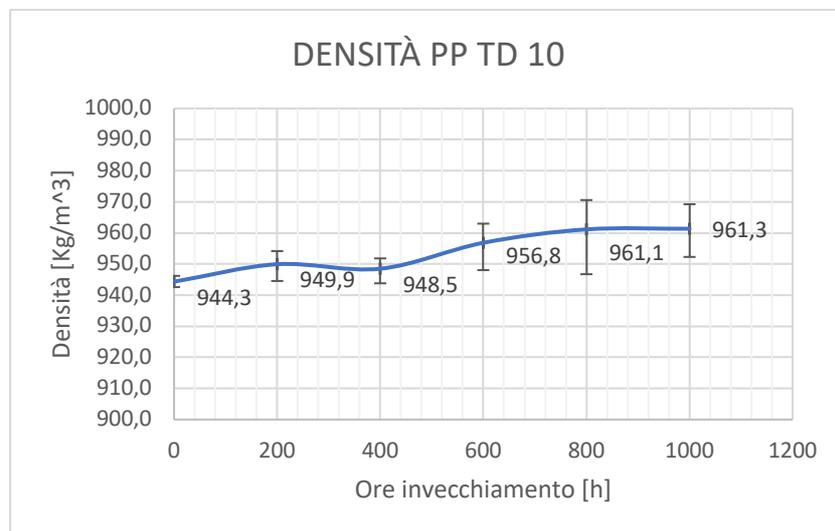
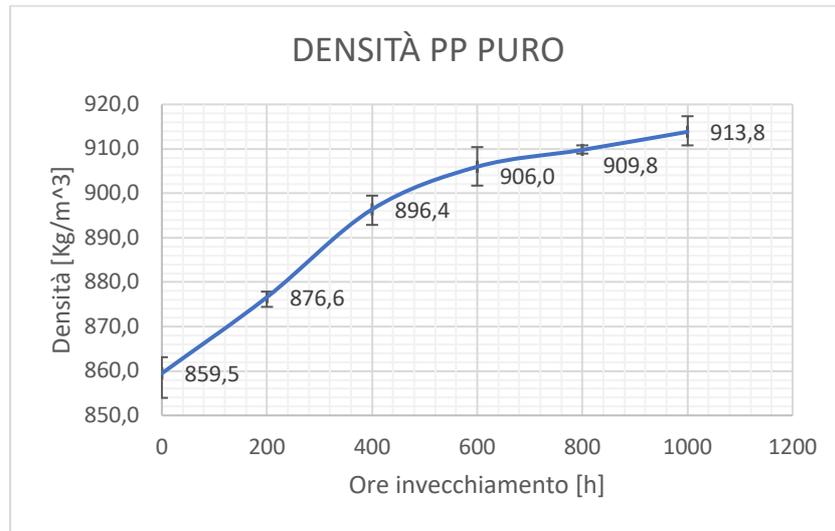
D'altra parte, se si pensa ad una plastica lasciata per giorni e giorni al sole, la si immagina come scolorita/ingiallita, con piccole crepe superficiali e, se la si tocca, risulta meno flessibile e più rigida.

Considerando nel dettaglio il modo in cui tale grandezza decresce, si osserva che negli ultimi due grafici, ovvero dei polimeri in cui è presente il talco, la diminuzione dell'energia assorbita a impatto risulta lieve nelle prime 400h di invecchiamento, ma poi incomincia a decrescere bruscamente e con un andamento molto simile in entrambi i casi; analizzando sempre gli ultimi due grafici, si nota come entrambe le curve non siano stabilizzate; questo induce a pensare che tale grandezza continuerà a decrescere in modo più o meno marcato con l'aumentare delle ore di invecchiamento agli UV.

Questo non si osserva nel caso del PP "puro", difatti, ipotizzando di linearizzare la curva con cui l'energia assorbita ad impatto diminuisce, questa avrebbe un'unica pendenza e non due tratti ben differenti come invece accade per i polimeri caricati col talco; inoltre la piccola differenza esistente tra il valore misurato nelle 800h di invecchiamento e quello registrato per le 1000h, fa pensare che in questo caso si stia raggiungendo una stabilizzazione dell'andamento.

In questo caso, osservando i delta totali, ovvero la differenza tra il valore dell'energia dopo 1000h di invecchiamento e quello a nuovo, non si può trarre alcun tipo di conclusione essendo molto simili tra loro in tutti e tre i casi; difatti, tale valore risulta essere pari a 1.87 kJ/m^2 per il PP "puro", a 1.79 kJ/m^2 per il PP TD 10 e a $1,78 \text{ kJ/m}^2$ per il PP TD 30.

6.4. Densità



Volendo confrontare tale parametro a nuovo, si osserva come la densità aumenti con l'aumentare della quantità di talco che viene addizionato al polimero di partenza.

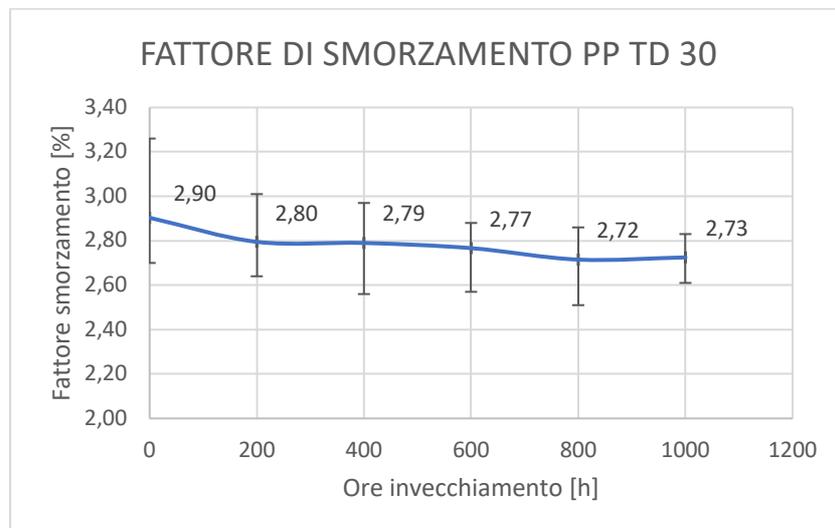
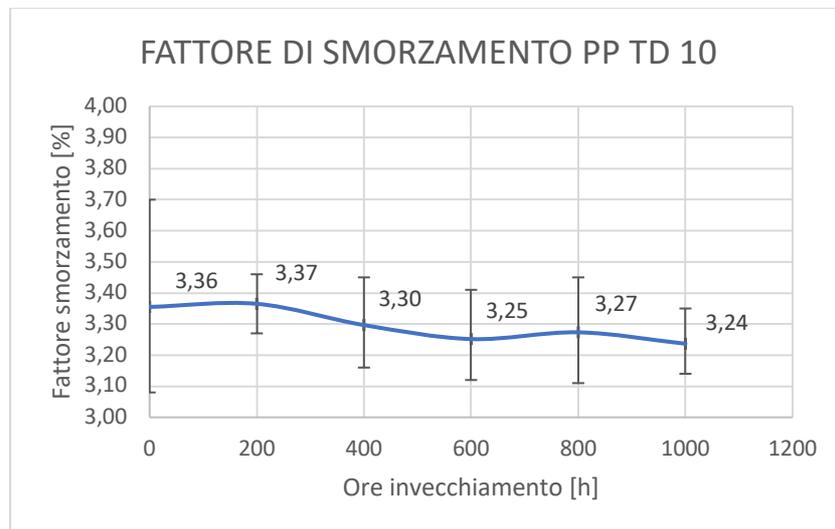
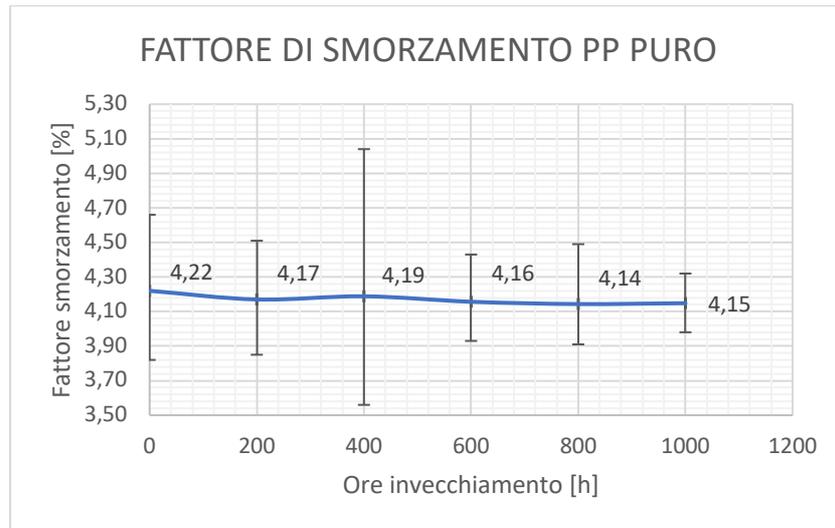
Analizzando invece l'andamento globale nei 3 casi differenti, si può affermare che, senza alcun dubbio, la densità aumenta con il crescere delle ore di invecchiamento.

Non disponendo di analisi chimiche o microscopiche atte a investigare sui cambiamenti della struttura interna, si possono fare le seguenti ipotesi al fine di giustificare questo aumento:

- Assodato che la cristallinità del polimero aumenti, se il peso molecolare del polimero si mantiene costante, questo può direttamente tradursi in un aumento di densità in quanto le zone cristalline presentano un maggiore impaccamento molecolare;
- Il polimero e, in particolare gli atomi tra i quali si è rotto un legame a causa dell'elevata energia assorbita, impieghino il loro elettrone disponibile nel formare legami con l'ossigeno o con altre sostanze presenti all'interno dell'atmosfera;
- Il polimero potrebbe semplicemente aver assorbito parte dell'umidità presente nell'atmosfera in cui i provini sono stati invecchiati.

In questo caso, osservando il delta tra inizio e fine invecchiamento, sembra che la presenza del talco inibisca la variazione di densità, e quindi di uno dei 3 fenomeni di cui sopra; difatti per il PP "puro" si ha una variazione di circa 54 kg/m^3 mentre nel secondo e nel terzo polimero di appena 17 e 27 kg/m^3 .

6.5. Fattore di smorzamento



Partendo da un confronto a nuovo dei tre materiali, si può osservare come la presenza del talco nei polimeri provochi una diminuzione del fattore di smorzamento; questo trova riscontro nei valori di rigidità statica misurati sui diversi provini prima che questi vengano sottoposti a invecchiamento.

La relazione tra smorzamento e rigidità è espressa dalla seguente formula, dalla quale si può notare come ci sia una proporzionalità inversa tra le due grandezze considerate:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

Dove:

- c: coefficiente di smorzamento;
- k: rigidità dinamica del materiale;
- m: massa del componente.

I valori di rigidità statica sono stati ottenuti tramite una prova di flessione a tre punti, ovvero applicando un carico verticale al provino nel punto medio tra i due supporti e misurando il conseguente spostamento; al fine di ottenere un valore di rigidità che si possa relazionare col fattore di smorzamento trovato, si sono riprodotte, nel modo più fedele possibile, le condizioni avute nella misura del modulo elastico in modo non distruttivo, ponendo per esempio, i supporti alla stessa distanza e applicando la sollecitazione nello stesso punto. I valori di spostamento ottenuti, applicando 3 differenti carichi, sono i seguenti:

Carico applicato:	1 kg	1,5 kg	2 kg
PP	1,12 mm	3,58 mm	\
PP TD 10	0,95 mm	2,50 mm	4,66 mm
PP TD 30	0,37 mm	0,95 mm	1,76 mm

Si è preso, come caso univoco per i 3 provini, la rigidità che i polimeri presentano quando li si applica un carico pari a un chilo e mezzo. I valori così ottenuti sono riassunti nella seguente tabella:

Provino	Rigidità statica [N/mm]
PP	4,11
PP TD 10	5,88
PP TD 30	15,47

Come ci si aspettava e come si voleva dimostrare, al crescere della rigidità diminuisce il fattore di smorzamento (ipotizzando la massa e lo smorzamento costanti o ammettendo comunque piccole variazioni).

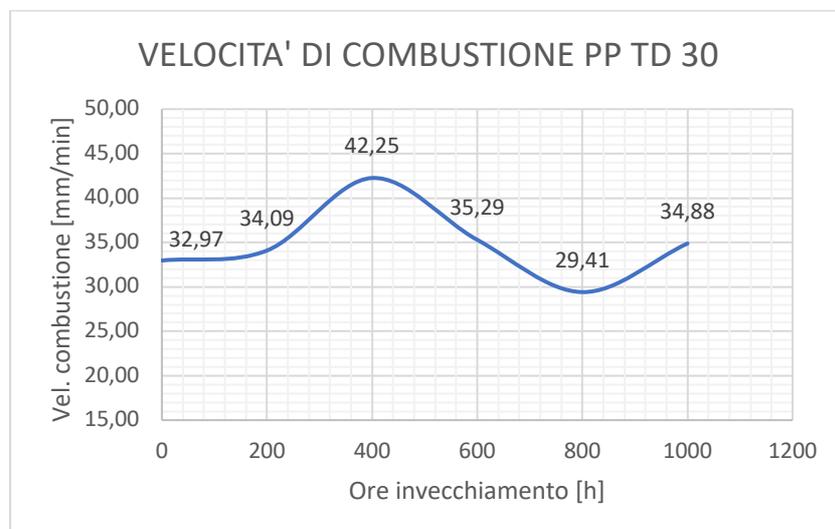
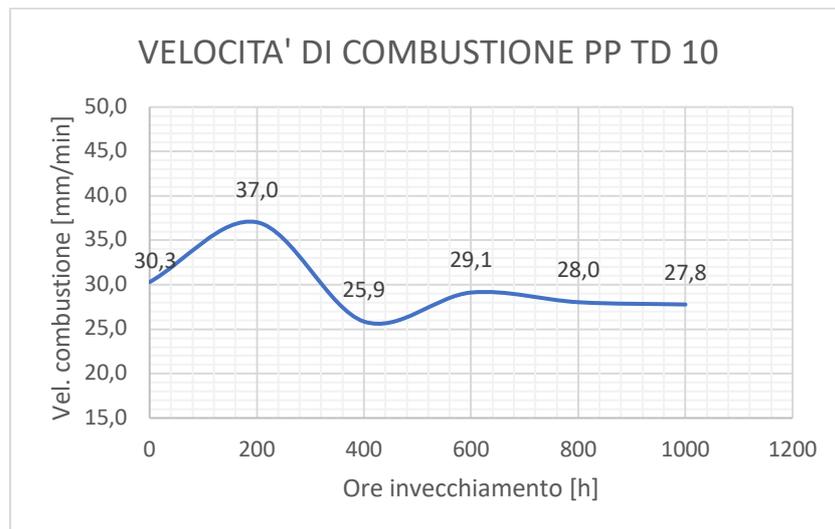
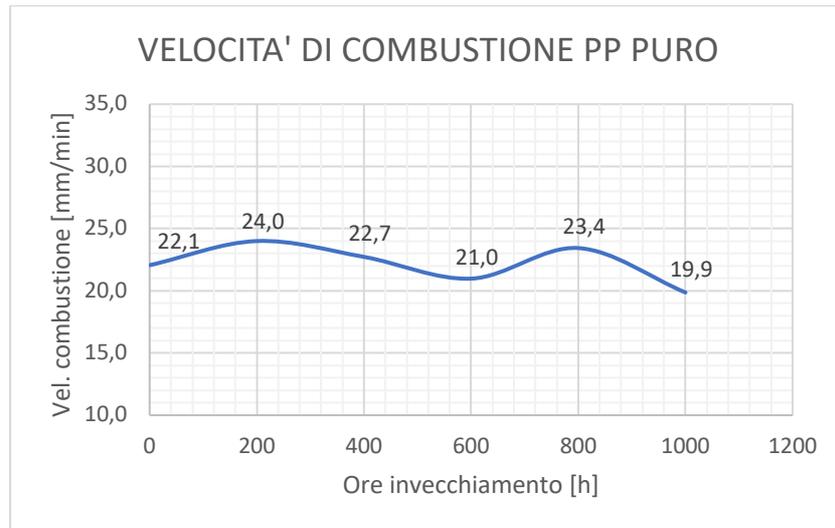
È importante specificare che, per poter fare questi ragionamenti, si è approssimato il sistema a un SDOF e, si è utilizzata la rigidità statica al posto di quella dinamica.

Un ulteriore decremento del fattore di smorzamento è causato dall'invecchiamento, infatti in tutti e tre i casi, il fattore di smorzamento diminuisce con l'aumentare delle ore di esposizione dei provini ai raggi UV.

Considerando che all'aumento dello smorzamento di un sistema, diminuisce il tempo di arresto del moto, questo decremento potrebbe esser visto come un aspetto negativo, in quanto il polimero, a seguito di una sollecitazione, ci metterà più tempo a dissipare l'energia e riportarsi quindi al suo stato di quiete. Nell'ambito automobilistico in particolare, un fattore di smorzamento minore, farebbe vibrare per un tempo maggiore il componente causando eventuali rumorosità che potrebbero infastidire il passeggero; inoltre vibrando per più tempo aumentano le probabilità che tale sollecitazione si trasmetta anche ai componenti adiacenti, incrementando la rumorosità percepita.

La diminuzione del fattore di smorzamento è comunque in linea con ciò che ci si aspettava, proprio perché si è assistito ad un progressivo irrigidimento dei polimeri sottoposti a invecchiamento; la diminuzione riscontrata è stata comunque irrisoria e, con molta probabilità, non andrà a pregiudicare le performance del componente installato a bordo della vettura.

6.6. Velocità di combustione



Sfortunatamente, per questo parametro, non si è riscontrata una variazione regolare e chiara, difatti in alcuni casi si assiste a un incremento della velocità di combustione a seguito dell'invecchiamento, mentre in altri si assiste ad una diminuzione. Questo risultato può essere spiegato assumendo che, le variazioni strutturali che si verificano a livello molecolare, non sono così importanti da influenzare questa proprietà.

Un aspetto che merita la dovuta attenzione è come la presenza di talco incrementi bruscamente il valore della velocità di combustione, si passa infatti da circa 22 mm/min del PP "puro" a 30.3 mm/min per il PP TD 10 e a circa 33 mm/min nel caso del PP TD 30. Questo rappresenta, come ci si può aspettare, un forte demerito per il talco.

6.7. Pro e contro nell'utilizzo del talco

Questo paragrafo conclusivo sarà utile al fine di analizzare i vantaggi e gli svantaggi derivanti dall'utilizzo del talco come carica minerale; nel confronto verranno inglobate sia le modifiche che questa carica apporta al polimero prima di essere sottoposto a invecchiamento, che la diversa influenza che ha il talco sull'invecchiamento:

PRO	CONTRO
<ul style="list-style-type: none"> Incrementa sempre e comunque il modulo elastico; 	<ul style="list-style-type: none"> Diminuisce l'energia a impatto se presente oltre al 10% in volume;
<ul style="list-style-type: none"> Incrementa l'energia assorbita a impatto se presente in piccole quantità (< 10%); 	<ul style="list-style-type: none"> Diminuisce la resistenza al fuoco in quanto aumenta la velocità di combustione;
<ul style="list-style-type: none"> Diminuisce il costo del polimero essendo un riempitivo; 	<ul style="list-style-type: none"> Diminuisce il fattore di smorzamento;
<ul style="list-style-type: none"> Aumenta la conducibilità termica = maggiore produttività; 	<ul style="list-style-type: none"> Rende più visibili i graffi superficiali (per questo sono goffrati);
<ul style="list-style-type: none"> Funge da agente nucleante nella formazione del reticolo cristallino (< 3%); 	<ul style="list-style-type: none"> Rende i polimeri più sensibili all'invecchiamento;
<ul style="list-style-type: none"> Aumenta temperatura di deformazione = maggiore stabilità dimensionale; 	<ul style="list-style-type: none"> Favorisce il brusco decremento dell'energia assorbita a impatto nei provini invecchiati;

6.8. Progetti futuri

Esistono pochi studi riguardanti l'influenza delle cariche sull'invecchiamento dei polimeri, quindi questo risulta essere un campo in cui ci sarebbe tanto da investigare. Il naturale proseguo del mio studio sarebbe quello di effettuare **analisi chimiche e microscopiche** di questi polimeri, al fine di andare a identificare e spiegare le dinamiche interne del materiale;

un esempio potrebbe essere l'analisi tramite lo spettrometro FT-IR il quale permette, tramite lo studio dell'interazione dei raggi infrarossi con gli atomi dei materiali, di studiare i legami chimici presenti nella molecola, ma anche di capire i tipi di atomi presenti all'interno della molecola; quest'ultimo punto risulterebbe molto importante al fine di capire l'interazione del materiale con l'atmosfera, in quanto, il polimero potrebbe reagire con l'ossigeno o con l'umidità presente nell'atmosfera modificando la sua struttura interna.

Disponendo di questi dati si abbandonerebbe il campo delle ipotesi, che io stesso ho seguito per ciò che riguardava la chimica, e si potrebbero fare delle correlazioni realistiche tra la variazione delle proprietà meccaniche e quelle chimiche.

Un ulteriore approfondimento potrebbe essere quello di analizzare l'andamento di altre proprietà meccaniche, che non ho potuto analizzare a causa dell'assenza di strumenti necessari per effettuare i

test, come il melt flow index (**MFI**), analisi di **colour e gloss** al fine di determinare l'ingiallimento e lo scolorimento delle plastiche esposte agli UV.

Un altro aspetto interessante sarebbe stato quello di studiare la variazione delle temperature tipiche di un materiale in seguito all'invecchiamento (**temperatura di fusione, di transizione vetrosa** etc.), le quali cambieranno sicuramente a seguito delle variazioni della struttura interna del polimero.

7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

SITOGRAFIA

- https://www.unisalento.it/documents/20152/218139/8_2014_Polimeri+parte1.pdf/3435e30e-7d44-cf20-d57e-baa5dce2344e?version=1.0;
- <https://tecnologicamente.jimdo.com/studio/la-plastica/>;
- <http://www.craftechind.com/13-high-performance-plastics-used-in-the-automotive-industry/>;
- <https://pdfs.semanticscholar.org/e2d3/16ca62ec296bfc66ef3f2f5a4daf974bd65c.pdf>;
- <http://www.hdmotori.it/2016/08/30/piu-plastica-nel-futuro-dellauto-meno-peso-consumi/>;
- <https://www.lastampa.it/2016/09/01/motori/il-futuro-dellauto-sempre-pi-plastica-per-ridurre-peso-ed-emissioni-9VmA1M3D6CneEwGLvurutN/pagina.html>;
- https://www.mondominerals.com/fileadmin/documents/plastics-and-rubber/K43284_TB_1301_Plastics_161031_web.pdf;
- <http://polymerscience.imedpub.com/talc-as-reinforcing-filler-in-polypropylenecompounds-effect-on-morphology-andmechanical-properties.pdf>;
- <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/How-to-calculate-damping-from-a-FRF/ta-p/355050>;

BIBLIOGRAFIA

- Scienza e ingegneria dei materiali di William D. Callister, David G. Rethwisch;
- The automotive body VOL 1: components design di Lorenzo Morello, Lorenzo Rosti Rossini, Giuseppe Pia e Andrea Tonoli;
- The automotive body VOL 2: components design di Lorenzo Morello, Lorenzo Rosti Rossini, Giuseppe Pia e Andrea Tonoli;
- Physical aging of Polymers di John M. Hutchinson;

NORMATIVE UTILIZZATE

- UNI-EN ISO 527-2;
- ASTM E1876 – 15;
- UNI-EN ISO 179-1;
- MIL - STD - 810 G;
- DIN EN ISO 4892-2;
- 7-G2000;

ARTICOLI DI RIVISTE

- Filled polypropylene: a cost- performance comparison of common fillers - Plastics Additives & Compounding September 2001;
- Additives improve scratch resistance in automotive applications - Plastics Additives & Compounding March/April 2009;
- Polypropylene - markus gahleitner, borealis polyolefine gmbh, linz, Austria -Ullmann's;
- Plastics, additives - rainer wolf, sandoz huningue s.a., huningue, France -Ullmann's;

8. RINGRAZIAMENTI

Al Professor Belingardi Giovanni del dipartimento di ingegneria meccanica del Politecnico di Torino, che ha scelto di seguirmi, arricchirmi di consigli e riporre in me la sua fiducia.

Ringrazio CSI S.p.a. per avermi ospitato come tesista, per avermi dato la possibilità di toccare con mano alcune delle vetture più belle mai costruite e per aver messo a mia disposizione attrezzatura di valore. Ringrazio l'Ing. Filippa e i miei tutor aziendali Andrea Ghigo e Marco Bocchino i quali, oltre ad avermi fornito consigli e supporto, mi hanno insegnato come vivere ed affrontare al meglio la quotidianità in ambito lavorativo. Un grazie lo devo senza dubbio anche a tutti coloro con cui ho avuto modo di collaborare e cooperare: Gabriele, Massimiliano, Giovanni O., Alvino, Giuseppe, Fulvio, Santo, Giovanni, Monica, Andrea, Monica e Antonio;

Infine, ci tengo a ringraziare la Prof.ssa Sesana, la quale, nonostante non fosse direttamente interessata, si è resa sempre disponibile ad aiutarmi e ad affiancarmi nello svolgimento delle prove sperimentali effettuate nel laboratorio di meccanica del Politecnico di Torino.