



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea in INGEGNERIA MECCANICA (L-9)

**Studio comparativo di mescole poliuretaniche  
con differenti estensori di catena**

---

**Comparative study of polyurethane  
compounds with different chain extenders**

Relatore:  
**Prof. Marco Sasso**

Laureando:  
**Giorgio Sacripanti**

A.A. 2019/2020

## INDICE

<b>1) INTRODUZIONE</b> .....	1
<b>2) IL POLIURETANO</b> .....	3
<b>3) LABORATORIO</b> .....	4
<b>3.2) DENSIMETRO</b> .....	7
<b>3.3) DUROMETRO</b> .....	8
<b>3.4) RESISITIVITY CHECK</b> .....	9
<b>4) TEST</b> .....	10
<b>4.1) PROVA DI TRAZIONE</b> .....	10
<b>4.2) PROVA DI COMPRESSIONE</b> .....	14
<b>4.3) PROVA DI LACERAZIONE</b> .....	16
<b>4.4) PROVA DI DENSITÀ</b> .....	19
<b>4.5) PROVA DI DUREZZA</b> .....	20
<b>4.6) PROVA DI RESISTIVITÀ</b> .....	21
<b>5) ANALISI DEI RISULTATI</b> .....	23
<b>5.1) TRAZIONE</b> .....	23
<b>5.2) COMPRESSIONE</b> .....	31
<b>5.3) LACERAZIONE</b> .....	39
<b>5.4) DENSITÀ</b> .....	47
<b>5.5) DUREZZA</b> .....	48
<b>5.6) RESISTIVITÀ</b> .....	49
<b>6) CONCLUSIONI</b> .....	50
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	51

# 1) INTRODUZIONE

Lo scopo del lavoro, che si è svolto presso l'azienda POLYURETECH s.r.l., riguarda lo studio e l'analisi di mescole poliuretaniche.

I poliuretani possono essere: termoplastici, termoindurenti ed elastomeri.

**Termoplastici:** I PU termoplastici, sviluppati a partire dal 1950, hanno una catena lunga e lineare e si formano quando vengono impiegati i tre componenti: dioli a catena corta, di-isocianati e polioli. I polioli e i dioli reagiscono con i di-isocianati per formare il poliuretano lineare. I poliuretani a catena lineare rammolliscono per riscaldamento e fondono in modo reversibile; mostrano bassa igroscopicità, buone caratteristiche meccaniche e ottime proprietà elettriche e termiche.

**Termoindurenti:** i PUR termoindurenti sono materiali polimerici ramificati o reticolati che si formano a partire da un triolo e un isocianato polifunzionale. Queste sostanze sono miscelate all'interno di una macchina, chiamata schiumatrice, e producono la schiuma di poliuretano che solidifica formando un materiale molto resistente e indeformabile. A differenza delle resine termoindurenti, come le resine fenoliche ottenute per reazione tra fenolo e formaldeide, si solidificano a freddo in un tempo che varia in funzione della dimensione, della densità e dello spessore. Essi, che hanno una struttura reticolata, presentano ottime proprietà elettriche, meccaniche e termiche, superiori rispetto alle resine fenoliche e melamminiche.

**Elastomeri:** I PU elastomeri sono "co-polimeri" di poliuretani sia rigidi (termoindurenti) sia flessibili (termoplastici). Possono subire delle deformazioni elastiche come ad esempio l'allungamento: possono essere modellati e lavorati attraverso tecniche di produzione, quali l'estrusione e lo stampaggio a caldo. I primi PUR elastomeri, sviluppati in Germania nel 1940, sono ottenuti dalla reazione tra il poliolo a base estere e il gruppo diisocianato.

Un tipo di materiale elastomero ad alta prestazione è Vulkollan, sviluppato da Bayer, ottenuto dalla reazione tra il polioli di tipo poliesteri ed altri componenti; ha proprietà di elevata resistenza meccanica come le ruote automobilistiche, tuttavia sono inadatte a questo uso per via della reattività all'idrolisi. (Capodarca, 2018-2019)

I poliuretani utilizzati dalla ditta POLYURETECH s.r.l sono degli elastomeri termoplastici che sono realizzati tramite un additivo chiamato MOCA.

Il MOCA è classificato come un'ammina aromatica primaria e, a causa della sua tossicità, l'Unione Europea, a partire da Novembre 2021, ha intenzione di bandirlo dal mercato.

Perciò è stato fatto uno studio comparativo tra mescole poliuretaniche realizzate tramite MOCA con mescole poliuretaniche realizzate con un'altra ammina aromatica, l'ADDOLINK 1604 DW.

Si parte quindi prendendo in considerazione diverse mescole poliuretaniche, differenti per durezza e realizzate con entrambi gli additivi (Tabella 1.1)

Una volta effettuata la scelta, sono state realizzate sei mescole con MOCA e sei con ADDOLINK 1604DW.

<b>Mescole poliuretaniche con MOCA</b>	<b>Mescole poliuretaniche con ADDOLINK 1604 DW</b>
70S	70L
80S	80L
90S	90L
80T	80M
90T	90M
95T	95M

*Tabella 1.1*

Le mescole poliuretaniche, caratterizzate con le lettere S-L, sono realizzate in TDI/ESTERE che posseggono un'ottima resistenza allo strappo, eccellenti proprietà dinamiche ed una buona resistenza chimica.

Le mescole poliuretaniche, caratterizzate con le lettere T-M, sono realizzate in TDI/PTMEG che posseggono una buona resistenza all'abrasione, alta resistenza alla trazione e alta resilienza, anche a basse temperature ed una buona resistenza all'idrolisi e ai microrganismi. (Covestro, 2020)

## 2) IL POLIURETANO

I poliuretani (PU) sono polimeri di sintesi che si caratterizzano per la presenza in catena di gruppi uretanici (carbammati stabili).

Esistono varie tipologie di poliuretano:

- Espanso flessibile;
- Espanso rigido;
- Compatto rigido;
- Compatto elastico

Inoltre è disponibile in densità differenti, che consentono una vasta gamma di soluzioni per ogni esigenza. La densità è definita come peso/unità di volume ed è misurata in  $\text{kg/m}^3$  ed è il principale parametro di caratterizzazione del poliuretano perché ne determina le proprietà meccaniche.

Bassa densità (da 33 a 60  $\text{kg/m}^3$ ): i blocchi e le lastre di questa categoria sono generalmente utilizzati per finalità di isolamento termico, grazie alla bassissima conducibilità termica e all'alto potere isolante.

Alta densità (da 80 a 490  $\text{kg/m}^3$ ): l'aumento della densità comporta l'aumento della resistenza meccanica; per questo motivo, la caratteristica principale del poliuretano ad alta densità è la facile lavorabilità con risultati di elevata precisione.

Il poliuretano che è stato preso in esame per le analisi fisiche è un poliuretano ad alta densità. Quest'ultimo viene ottenuto mediante un processo di reazione tra un di-isocianato (aromatico o alifatico) e un poliolo (tipicamente un glicole poli-propilenico o un poliestere-diolo), in presenza di catalizzatori per aumentare la velocità della reazione e di altri additivi per conferire determinate caratteristiche al materiale da ottenere. (Capodarca, 2018-2019)

### 3) LABORATORIO

All'interno dell'azienda è presente un laboratorio dove vengono effettuate le analisi fisiche ai materiali attraverso l'utilizzo di strumenti di produzione GIBITRE INSTRUMENTS.

Di seguito (Tabella 3.1) vengono riassunte tutte le prove effettuate con le relative norme e strumenti corrispondenti.

PROVA	NORMA	STRUMENTO
Trazione	ISO 37 type 1	Dinamometro
Compressione	ISO 604	Dinamometro
Lacerazione	ISO 34-1	Dinamometro
Durezza	ISO 48-4	Durometro
Densità	ISO 1817	Densimetro
Resistività	ISO 1853	Resistivity check

Tabella 3.1



Figura 3.1



Figura 3.2

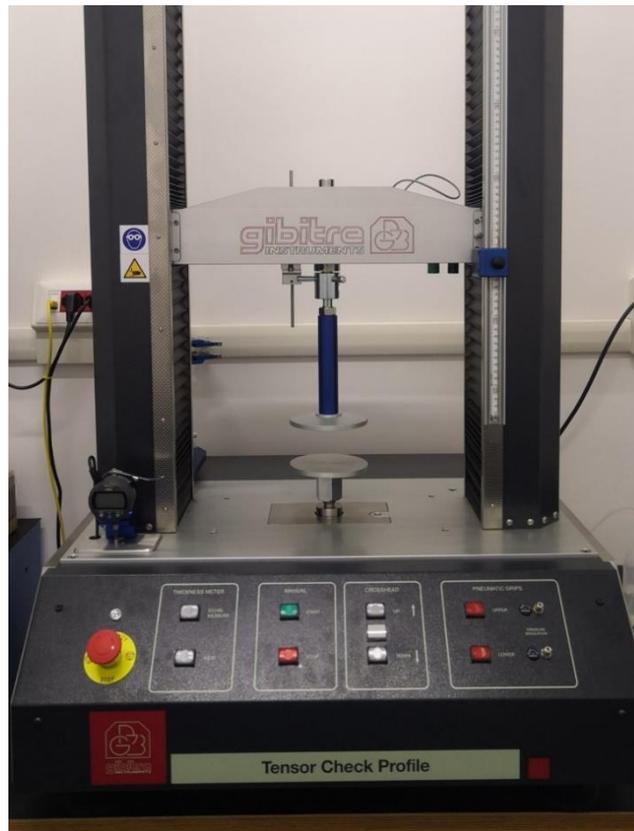
Il laboratorio (Figura 3.1-3.2) è provvisto di un climatizzatore caldo-freddo in modo da mantenere stabile la temperatura secondo la norma ISO 23529, la quale afferma che la temperatura dovrà essere di  $(23\pm 2)$  °C o  $(27\pm 2)$  °C, con umidità rispettivamente del 50% e 65% con una tolleranza su entrambe del  $\pm 10\%$ . La temperatura e l'umidità scelte per il laboratorio presente in azienda è  $(23\pm 2)$  °C e 50% di umidità poiché si trova in una zona temperata.

La norma ISO 23529 stabilisce anche dei criteri per effettuare i test:

I provini devono restare almeno 16h a temperatura di laboratorio prima di eseguire qualsiasi tipo di test.

I provini possono subire test non oltre 3 mesi dalla data di produzione. (Norma ISO 23529, 2011)

### 3.1) DINAMOMETRO



*Figura 3.1.1*

Il dinamometro Tensor Check (figura 3.1.1) è uno strumento completamente programmabile operante in trazione e compressione per la misura delle caratteristiche meccaniche di materiali diversi tra cui gomma, plastica, materiali, compositi, adesivi, pelle, ecc.

Lo strumento permette di effettuare prove di trazione, compressione e lacerazione in conformità con le norme internazionali.

Riguardo la prova di trazione viene applicato un estensimetro meccanico, specificamente sviluppato per testare campioni di gomma, elastomeri e plastica e ottimizzato per:

misurare l'elevato allungamento che può essere raggiunto da campioni di gomma e termoplastici

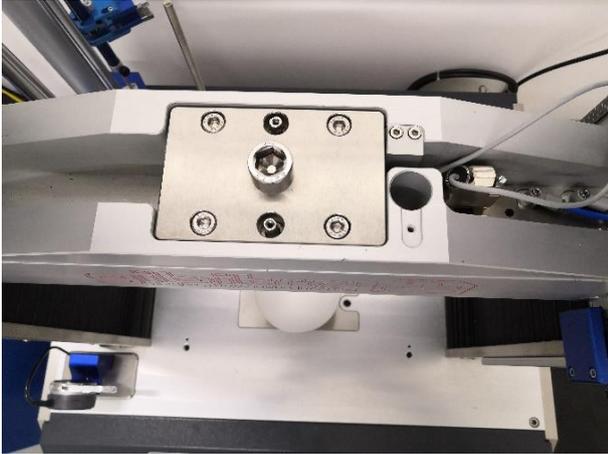
Assorbire l'energia trasmessa al dispositivo quando il campione si rompe

Modificare facilmente la distanza tra i morsetti in base al tipo di campione

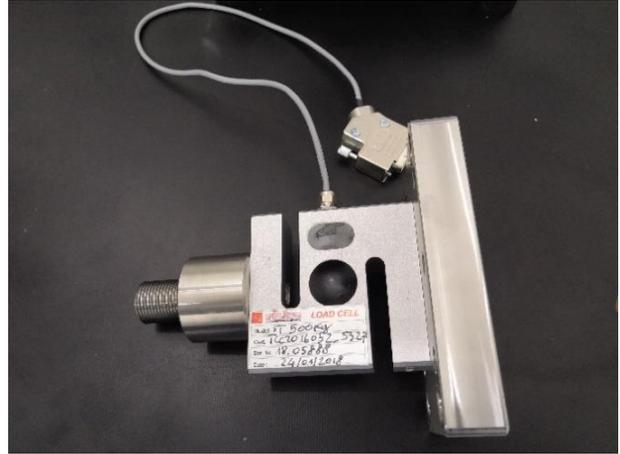
Regolare la forza di chiusura delle pinzette alla base in funzione del tipo di materiale da testare.

(Società Gibitre Instruments, s.d.)

Un componente fondamentale per tutte le prove è la cella di carico (figura 3.1.2 e 3.1.3). Viene utilizzata una cella di carico da 5000N per le prove di trazione e lacerazione, mentre ne viene utilizzata una da 20000N per la prova di compressione.



*Figura 3.1.2*



*Figura 3.1.3*

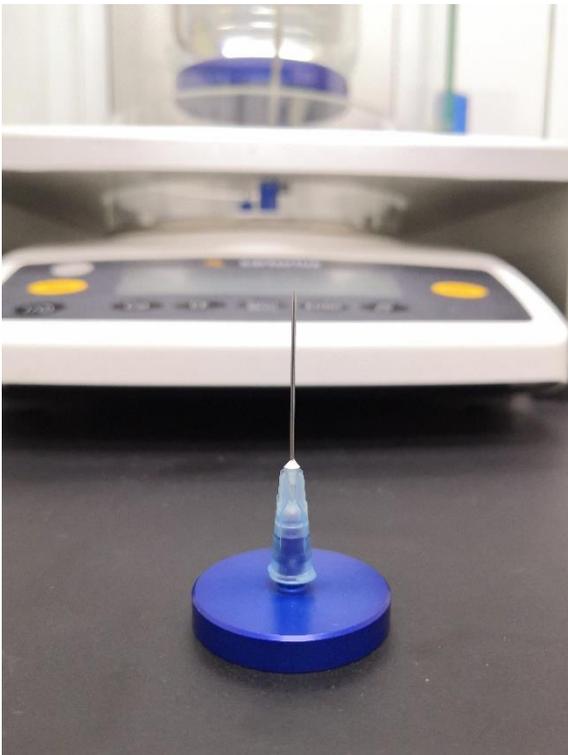
### 3.2) DENSIMETRO

Lo strumento permette di effettuare la misura della densità di prodotti compatti morbidi e rigidi, di prodotti espansi e di liquidi tramite il metodo idrostatico.

Per quanto riguarda le prove su gomma e prodotti morbidi, di nostro interesse, il test viene effettuato utilizzando un ago applicato ad un supporto magnetico.

Lo strumento è costituito da una bilancia e da un recipiente posto sopra di essa, normalmente riempito con acqua distillata. (Società Gibitre Instruments, s.d.)

L'ago (figura 3.2.1) viene inserito nel provino e, a sua volta, tramite il supporto magnetico, viene fissato alla bilancia (figura 3.2.2).



*Figura 3.2.1*



*Figura 3.2.2*

### 3.3) DUROMETRO

Il durometro (Figura 3.3.1) è uno strumento che permette di misurare la durezza di provini di diversi materiali.

Il durometro presente nel laboratorio può essere usato per la misura in Shore A e in Shore D; per la prima si utilizza un peso aggiuntivo di  $1_0^{+0,1}$ kg, mentre per la seconda si utilizza un peso aggiuntivo di  $5_0^{+0,5}$ kg. (Norma ISO 48-4, 2019)

Il durometro può essere usato in manuale o con supporto.

Per effettuare una prova manualmente è sufficiente premere il durometro contro il provino.

Il display dello strumento indica quando la forza applicata è nei limiti di tolleranza.

Un apposito manipolatore facilita l'esecuzione di misure su superfici curve, cilindri etc.

Per utilizzare il supporto è sufficiente inserire il sensore nel relativo foro di alloggiamento.

La prova si effettua posizionando il provino sul piattello e sollevando quest'ultimo con un'apposita leva. (Società Gibitre Instruments, s.d.)



*Figura 3.3.1*

### 3.4) RESISITIVITY CHECK

Lo strumento (Figura 3.4.1) permette di applicare una tensione agli estremi del provino e di misurare la differenza di potenziale che si genera tra due elettrodi appoggiati al provino ed aventi distanza nota.

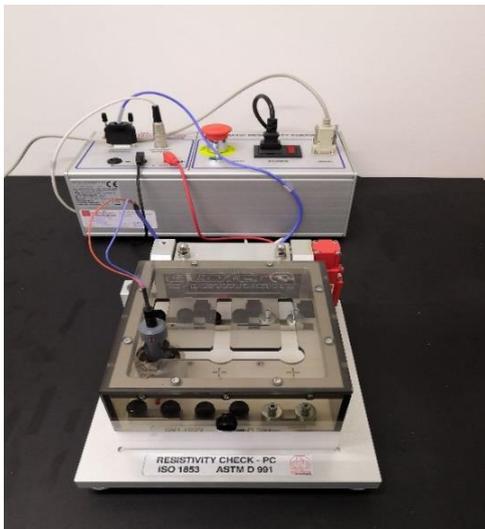
L'alimentatore regola automaticamente la tensione in funzione della resistività del provino allo scopo di mantenere la corrente trasmessa all'interno dei limiti della norma.

È possibile applicare al supporto fino a 3 provini.

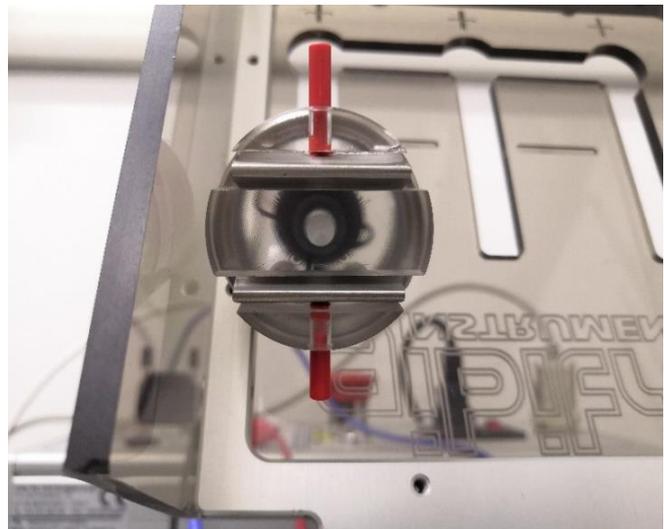
Il supporto è dotato di coperchio di protezione in plastica trasparente interbloccata.

Nel coperchio di protezione sono praticate scanalature che permettono di spostare il supporto porta-elettrodi e di effettuare più prove sul provino senza interrompere l'alimentazione.

Il porta-elettrodi presente in laboratorio possiede una distanza tra gli elettrodi di 20mm (Figura 3.4.2). (Società Gibitre Instruments, s.d.)



*Figura 3.4.1*



*Figura 3.4.2*

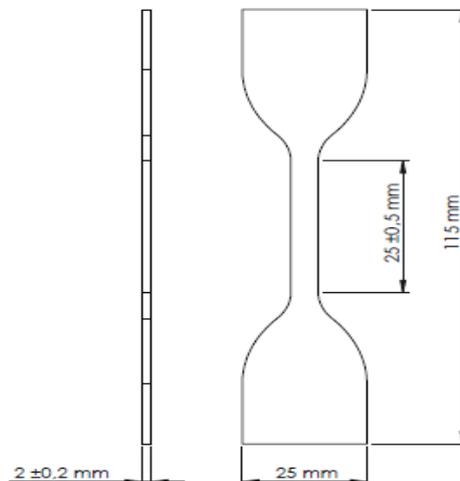
## 4) TEST

In questo capitolo si vanno a descrivere nello specifico le prove effettuate con gli strumenti citati nei capitoli precedenti.

Si mostra dunque tramite delle immagini e delle accurate descrizioni come sono state effettuate le prove passaggio per passaggio.

### 4.1) PROVA DI TRAZIONE

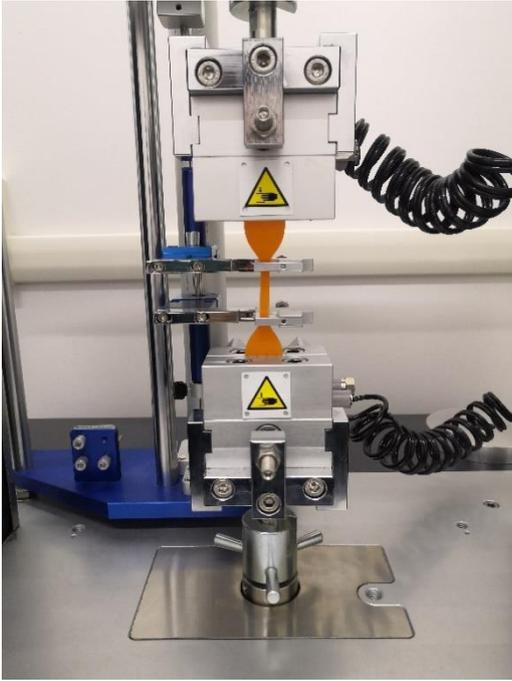
La norma a cui si fa riferimento per l'esecuzione della prova di trazione è la ISO 37 type 1, la quale specifica che il provino deve essere a forma di manubrio, in inglese definito dumb-bells (Figura 4.1.1)



*Figura 4.1.1*

Il provino è ricavato da una lastra di spessore 2mm tramite una fustellatrice precedentemente utilizzata anche per ricavare i provini della prova di lacerazione, infatti l'unica differenza sta nella tipologia di utensile che, tagliando la lastra, dà la forma al provino.

Sul dinamometro vengono montate due morse azionate pneumaticamente, le quali hanno il compito di bloccare il provino (Figura 4.1.2) e, insieme ad esse, vengono inseriti degli estensimetri (Figura 4.1.3).



*Figura 4.1.2*



*Figura 4.1.3*

Quest'ultimi, secondo la norma, devono essere posizionati sulla linea di fede del provino ad una distanza di 25mm l'uno dall'altro. La linea di fede è il tratto lineare del provino quotato in figura 4.1.1.

L'allungamento del provino viene ricavato attraverso gli estensimetri e al software che, elaborando istante per istante la posizione di questi ultimi, ricava l'allungamento del provino durante tutta la durata della prova.

Inoltre sul dinamometro viene montata una cella di carico da 5000N, direttamente collegata alla morsa superiore.

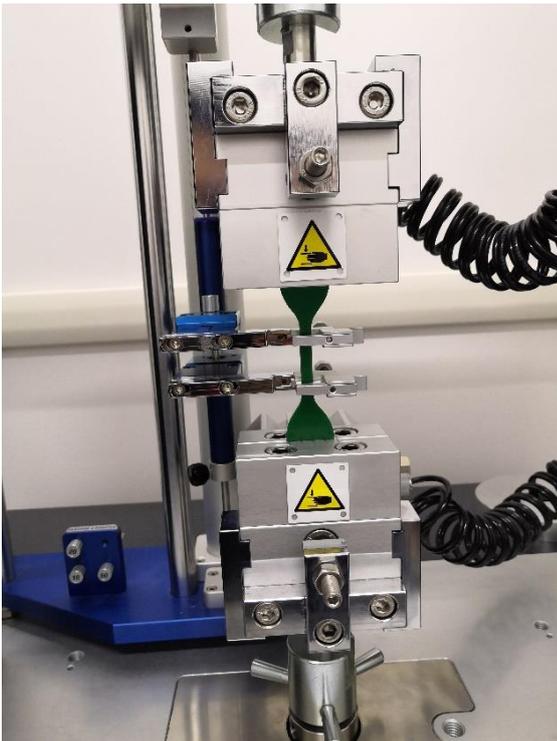
Ai fini dell'esecuzione della prova, nel software vengono inserite determinate informazioni, quali:

- Tipologia di mescola
- Tipologia cella di carico
- Norma di riferimento
- Caratteristiche dimensionali del provino (spessore)

Tutti i dati necessari all'esecuzione della prova sono racchiusi all'interno della norma, come ad esempio la velocità di esecuzione (500mm/min), la forma del provino, data dalla fustellatrice. (Norma ISO 37, 2011)

Al contrario, lo spessore viene misurato di volta in volta tramite comparatore al fine di dare l'esatta misura per ogni provino. Questo avviene perché le lastre, da cui si ricavano i provini, vengono colate in appositi stampi, perciò lo spessore può differire di qualche centesimo di millimetro a causa del ritiro dovuto alla polimerizzazione, mentre tutte le altre dimensioni sono date dalla fustellatrice.

Svolta questa operazione, è possibile far partire la prova tramite programma (Figura 4.1.4-4.1.5)



*Figura 4.1.4*



*Figura 4.1.5*

La prova sarà conclusa quando il provino si fratterà (Figura 4.1.6) ed a questo punto sarà possibile analizzare e salvare il risultato ottenuto.



*Figura 4.1.6*

Lo screenshot (Figura 4.1.7) mostra la schermata principale del software dedicato al dinamometro. Cambiando solamente la norma è possibile passare da una prova all'altra.

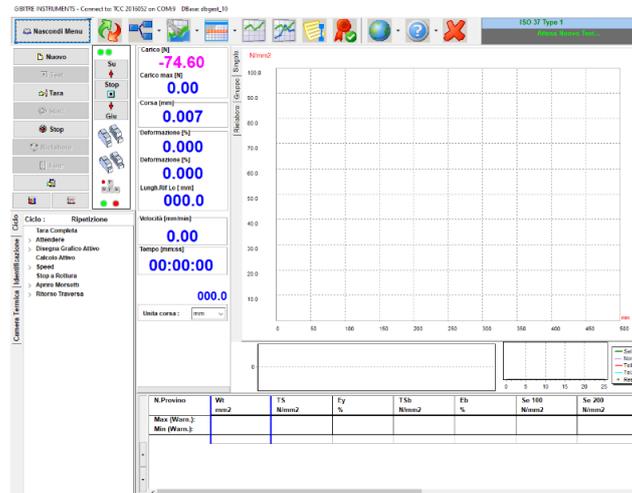


Figura 4.1.7

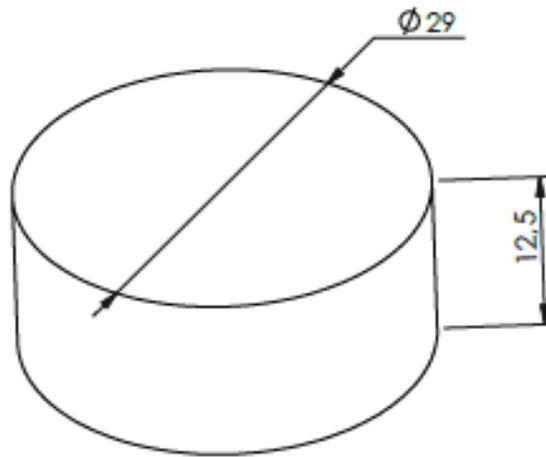
Questo procedimento va iterato per tutti gli altri provini, ossia 4 per ogni mescola poliuretanic, per un totale di 48 provini.

La rottura del provino deve avvenire sulla linea di fede altrimenti la prova non sarà ritenuta valida, infatti la frattura potrebbe verificarsi in altre zone a causa di cricche nel materiale.

Infine si salvano i risultati nell'archivio principale dove si può generare un file con tutti i dati necessari.

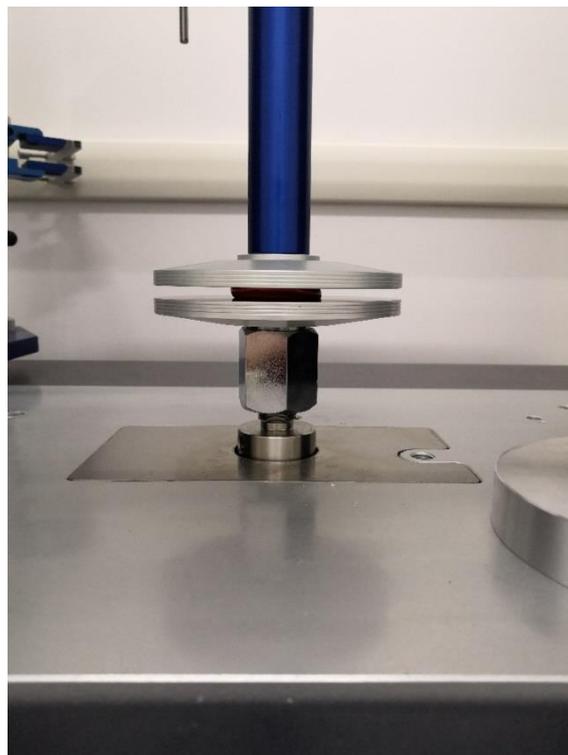
## 4.2) PROVA DI COMPRESSIONE

La norma a cui si fa riferimento per l'esecuzione della prova di compressione è la ISO 604. Il provino utilizzato ha forma cilindrica ed è finito di stampo (Figura 4.2.1).



*Figura 4.2.1*

Sul dinamometro vengono montati due piatti, in cui il piatto inferiore resta fermo mentre quello superiore scende e comprime il provino (Figura 4.2.2).



*Figura 4.2.2*

Ai fini dell'esecuzione della prova, nel software vengono inserite determinate informazioni, quali:

- Tipologia di mescola;
- Tipologia cella di carico;
- Norma di riferimento;
- Caratteristiche dimensionali del provino (spessore).

Tutti i dati necessari all'esecuzione della prova sono racchiusi all'interno della norma, come ad esempio la velocità di esecuzione (6,25mm/min). (Norma ISO 604, 2008)

Al contrario, lo spessore viene misurato di volta in volta tramite comparatore al fine di dare l'esatta misura per ogni provino. Questo avviene perché i provini vengono colati in appositi stampi, perciò le dimensioni possono differire di qualche centesimo di millimetro a causa del ritiro che il poliuretano ha durante la fase di polimerizzazione in forno come accennato nel capitolo 4.1 relativo alla prova di trazione.

Il provino, prima di essere montato, necessita di essere lubrificato al fine di ridurre l'attrito durante la prova.

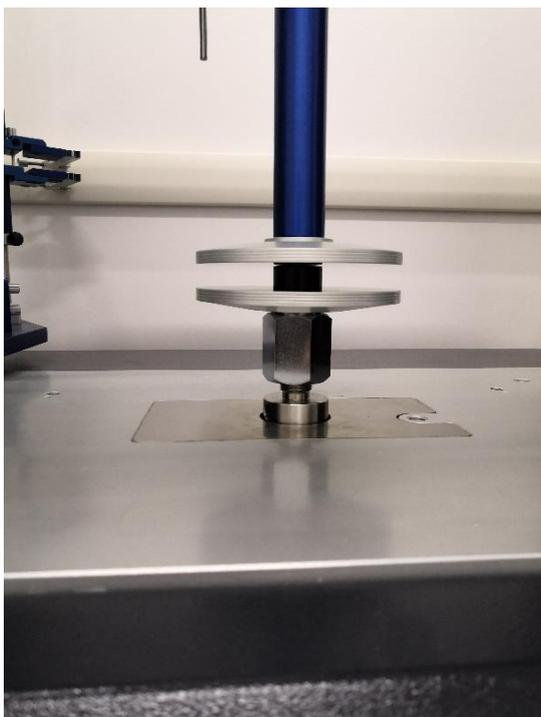
La mancata lubrificazione può falsare i risultati andando a rendere la curva seghettata.

Fatto ciò, possiamo appoggiare il provino sul piatto inferiore centrandolo con un apposito centraggio.

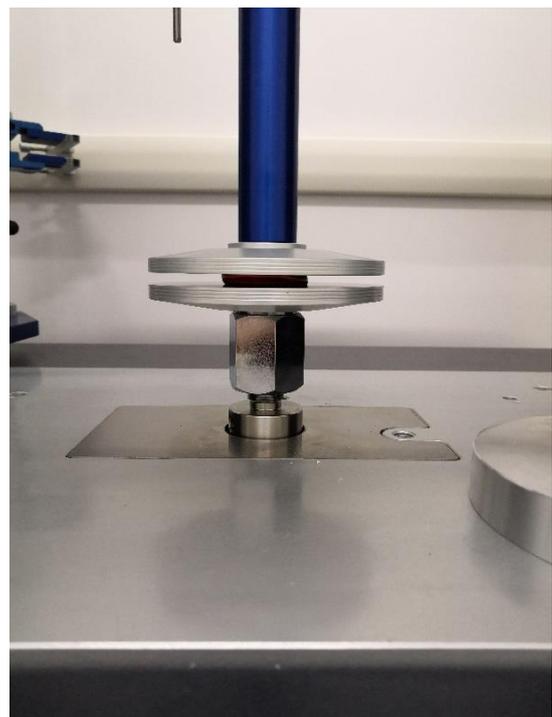
Svolta questa operazione, è possibile far partire la prova tramite programma, il quale, prima di applicare il carico vero e proprio, praticherà un pre-carico in modo da rendere i due piatti perfettamente planari dal momento che il piatto inferiore è autoregolabile (Figura 4.2.3-4.2.4).

La prova si può ritenere conclusa quando sul grafico si presenteranno delle curve con andamenti irregolari a causa del collasso del provino.

A questo punto sarà possibile analizzare e salvare il risultato ottenuto.



*Figura 4.2.3*



*Figura 4.2.4*

### 4.3) PROVA DI LACERAZIONE

La norma a cui si fa riferimento per l'esecuzione della prova di lacerazione è la ISO 34-1, in modo particolare si utilizza il metodo B, ovvero quello con provini di forma angolare. (Fig. 4.3.1)

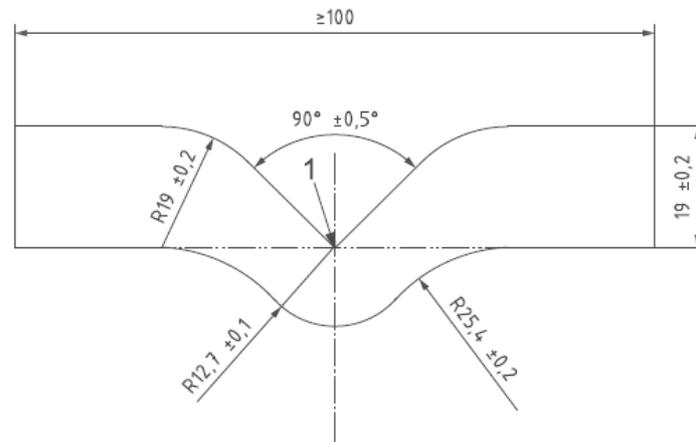


Figura 4.3.1

Il provino è ricavato da una lastra di spessore 2mm tramite una fustellatrice utilizzata anche per ricavare i provini della prova di trazione, infatti l'unica differenza sta nella tipologia di utensile che, tagliando la lastra, dà la forma al provino.

Sul dinamometro vengono montate due morse azionate pneumaticamente, le quali hanno il compito di bloccare il provino.

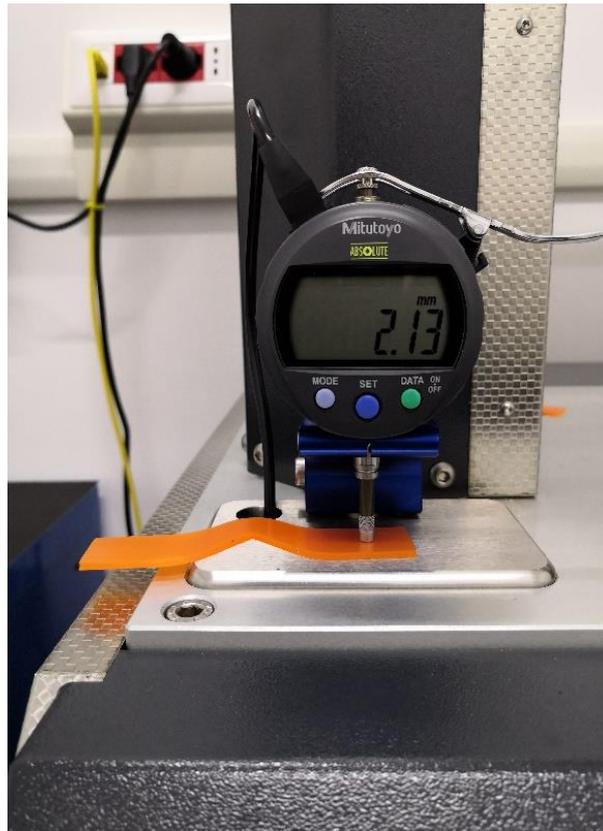
Ai fini dell'esecuzione della prova, nel software vengono inserite determinate informazioni, quali:

- Tipologia di mescola;
- Tipologia cella di carico;
- Norma di riferimento;
- Caratteristiche dimensionali del provino (spessore)

Tutti i dati necessari all'esecuzione della prova sono racchiusi all'interno della norma, come ad esempio la velocità di esecuzione (500mm/min) e la forma del provino. (Norma ISO 34-1, 2015)

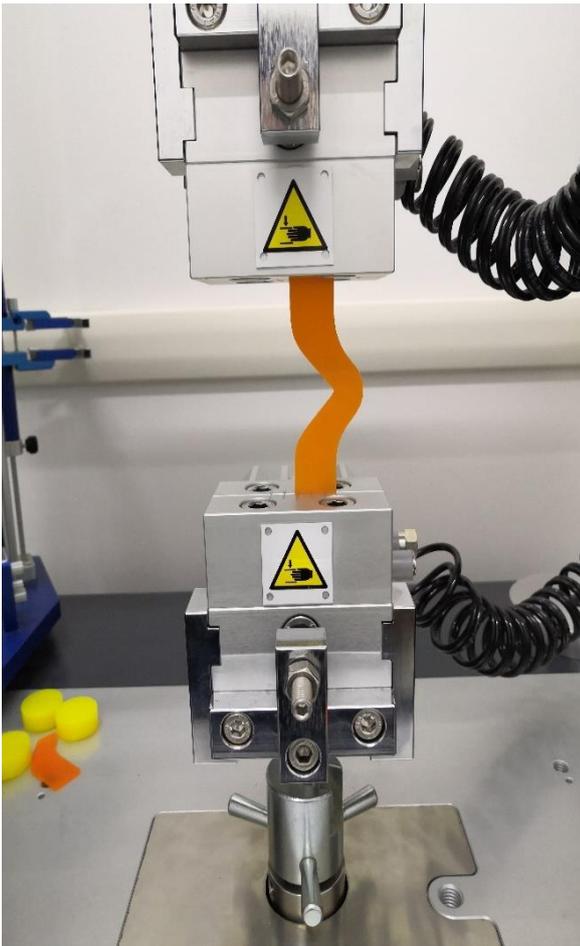
Al contrario, lo spessore viene misurato di volta in volta tramite comparatore al fine di dare l'esatta misura per ogni provino (Figura 4.3.2).

Questo avviene a causa del ritiro del materiale in fase di polimerizzazione, come accennato per le prove precedenti.

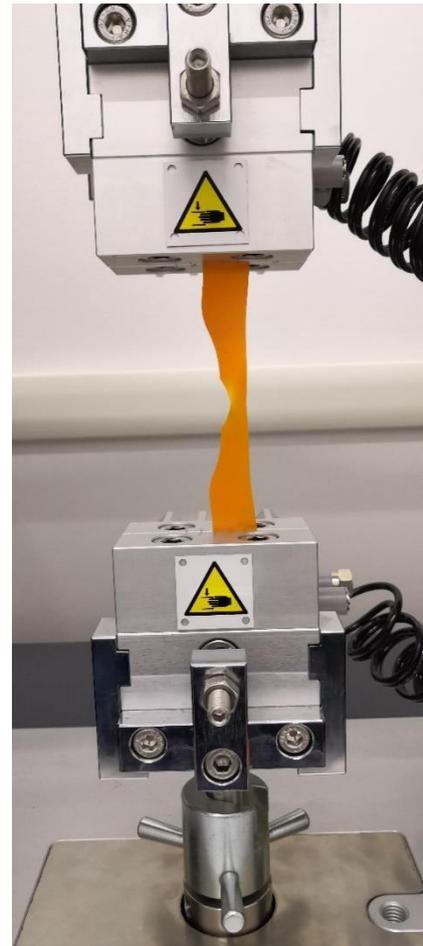


*Figura 4.3.2*

Svolta questa operazione, è possibile far partire la prova tramite programma (Figura 4.3.3-4.3.4)  
La prova sarà conclusa quando il provino giungerà a rottura e, a questo punto, sarà possibile analizzare e salvare il risultato ottenuto.



*Figura 4.3.3*



*Figura 4.3.4*

Questo procedimento va iterato per tutti gli altri provini.  
Infine si salvano i risultati nell'archivio principale dove si può generare un file con tutti i dati necessari.

#### 4.4) PROVA DI DENSITÀ

La prova di densità fa riferimento alla norma ISO 2781.

I provini per effettuare questo test possono essere gli stessi utilizzati per la prova di trazione o lacerazione, infatti bastano degli “scarti”.

I provini devono restare a temperatura di laboratorio ( $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) per almeno 3 ore, seguendo la norma ISO 23529.

Come prima cosa occorre riempire il recipiente dello strumento con acqua distillata e successivamente accedere, tramite pc, al programma dedicato del densimetro ed effettuare una taratura dello strumento.

La taratura consiste nel togliere e poi reinserire l’ago magnetico nella sua sede al fine di sottrarre la massa dell’ago durante la misurazione di un provino.



Figura 4.4.1



Figura 4.4.2

Il passo successivo consiste nell’inserire l’ago all’interno del provino per una profondità tale da reggerlo e si posiziona quindi l’ago sullo strumento (Figura 4.4.1).

Conclusa questa operazione, è possibile procedere con la misurazione della miscela in esame, inserendo nel software la miscela che stiamo studiando ed avviare la prova vera e propria.

Il recipiente contenente acqua distillata sale verso l’alto ed immerge completamente il provino.

Non appena il provino è completamente immerso (Figura 4.4.2), il recipiente scende verso il basso e il software genera il risultato, calcolato attraverso il principio di Archimede. (Norma ISO 2781, 2018)

Questo procedimento va iterato per tutti gli altri provini. Infine si procede al salvataggio.

## 4.5) PROVA DI DUREZZA

La norma a cui si fa riferimento per l'esecuzione della prova di durezza è la ISO 48-4.

La prova di durezza è stata effettuata con il metodo shore A in quanto la norma specifica che è possibile utilizzare questo metodo solo se la durezza del provino analizzato è minore di 90 shore A. Lo spessore minimo del provino deve essere di 6mm e la punta del durometro (Figura 4.5.1), durante l'analisi, deve trovarsi ad almeno 12mm da qualunque bordo del provino o da qualunque impronta generata dallo strumento in una misurazione precedente.

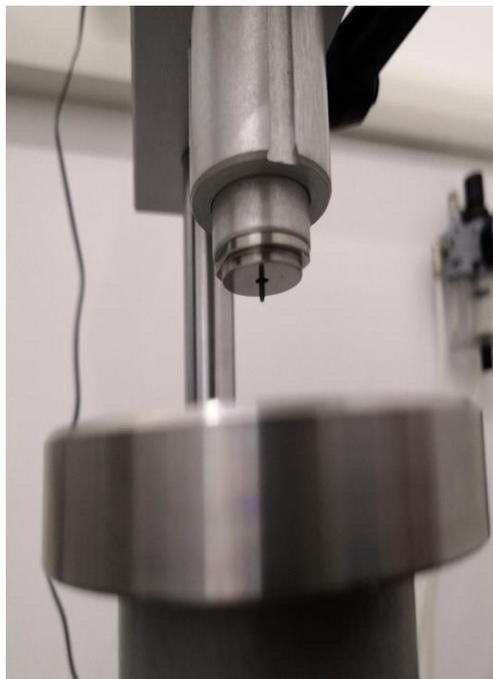
La norma di riferimento prevede che la durata temporale nella quale lo strumento misura la durezza deve essere di 3 secondi per la gomma vulcanizzata e 15 secondi per la gomma termoplastica, dunque è stato scelto il primo in quanto la gomma vulcanizzata si avvicina di più alle mescole poliuretaniche per caratteristiche. (Norma ISO 48-4, 2019)

Ai fini dell'esecuzione della prova, nel software vengono inserite determinate informazioni, quali:

- Tipologia di mescola;
- Norma di riferimento;
- Caratteristiche dimensionali del provino (spessore)

Infine si salvano i risultati nell'archivio principale dove si può generare un file con tutti i dati necessari.

Questo procedimento va iterato per tutti gli altri provini, ossia 4 per ogni mescola poliuretanica, per un totale di 48 provini.

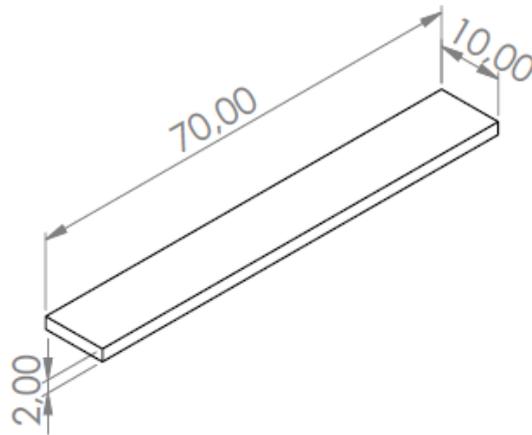


*Figura 4.5.1*

## 4.6) PROVA DI RESISTIVITÀ

La norma a cui si fa riferimento per l'esecuzione della prova di resistività è la ISO 1853.

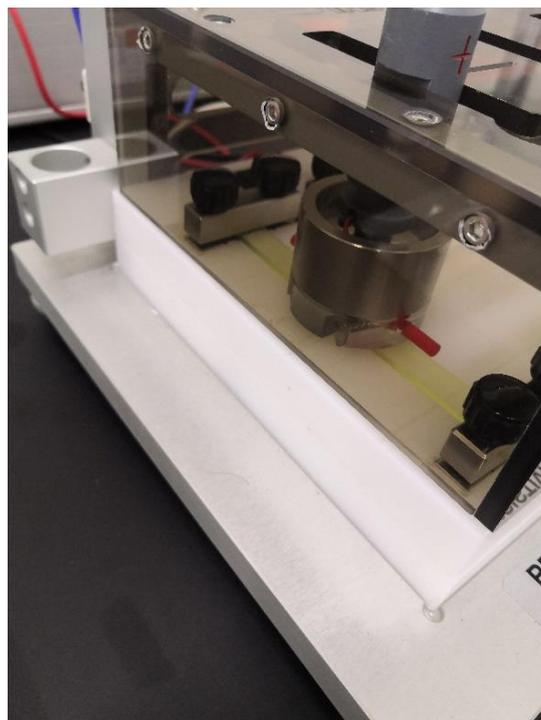
Il provino utilizzato per la prova di resistività è una lastrina ed è finita di stampo (Figura 4.6.1).



*Figura 4.6.1*

Come detto nel paragrafo 3.4, lo strumento permette di applicare una tensione agli estremi del provino e di misurare la differenza di potenziale che si genera tra due elettrodi appoggiati al provino ed aventi distanza nota.

La prova consiste nell'effettuare tre misurazioni in tre zone del provino, il più possibile equidistanti (Figura 4.6.2). Ogni misurazione richiede un minuto di tempo. (Norma ISO 1853, 2012)



*Figura 4.6.2*

Ai fini dell'esecuzione della prova, nel software vengono inserite determinate informazioni, quali:

- Tipologia di mescola
- Norma di riferimento
- Caratteristiche dimensionali del provino (spessore)

I dati necessari all'esecuzione della prova richiesti dal software sono lo spessore (2 mm) e la larghezza (10 mm).

Questo perché le lastre vengono colate in appositi stampi, perciò le dimensioni possono differire di qualche centesimo di millimetro.

Questo procedimento va iterato per tutti gli altri provini.

Infine si salvano i risultati nell'archivio principale dove si può generare un file con tutti i dati necessari.

## 5) ANALISI DEI RISULTATI

In questo capitolo si vanno ad analizzare il comportamento delle mescole poliuretaniche studiate nelle diverse prove effettuate.

### 5.1) TRAZIONE

Per quanto riguarda la prova di trazione si va ad osservare le curve di ogni mescola ottenute durante i test.

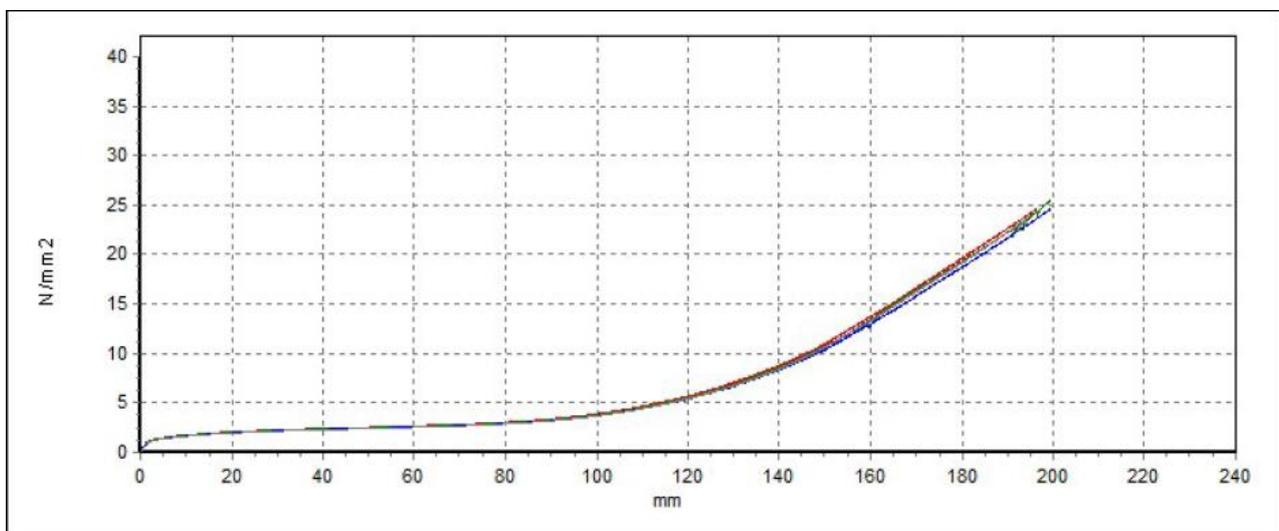
In questo modo si può osservare l'andamento puntuale della tensione e dell'allungamento per ciascuna mescola poliuretanic.

I provini appartenenti alla stessa mescola sono identificati all'interno del grafico da curve di colori differenti.

Le curve ottenute dalla prova di trazione sono rappresentate all'interno di un grafico, dove sull'asse delle ascisse abbiamo l'allungamento (mm) e sull'asse delle ordinate abbiamo la tensione ( $N/mm^2$ ).

Si studia ora l'andamento delle curve della mescola poliuretanic identificata con il nome **70S** (Figura 5.1.1)

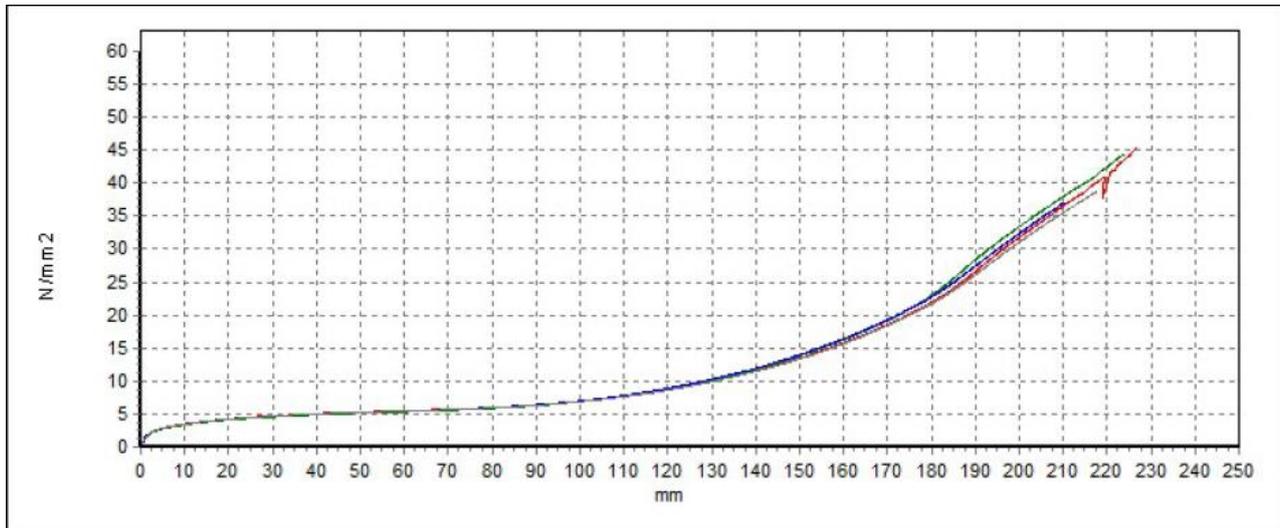
Da questo grafico si nota l'ottima ripetibilità in tutto il range di allungamento delle curve.



*Figura 5.1.1*

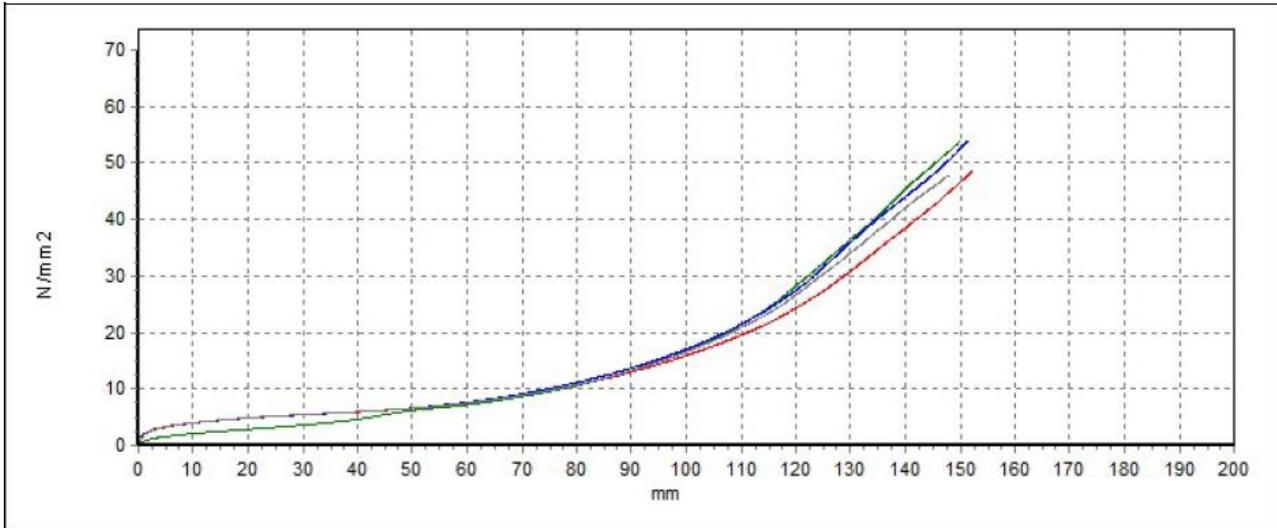
In questo grafico si osserva il comportamento della miscela poliuretanica **70L** (Figura 5.1.2). Una particolarità in questo grafico è che la curva rossa, nel tratto finale, ha una diminuzione improvvisa di tensione e questo potrebbe essere attribuito alla formazione di una cricca nel provino.

In questo grafico è presente una buona ripetibilità delle curve soprattutto nell'andamento, il quale però tende a diversificarsi nel tratto 170-230mm.



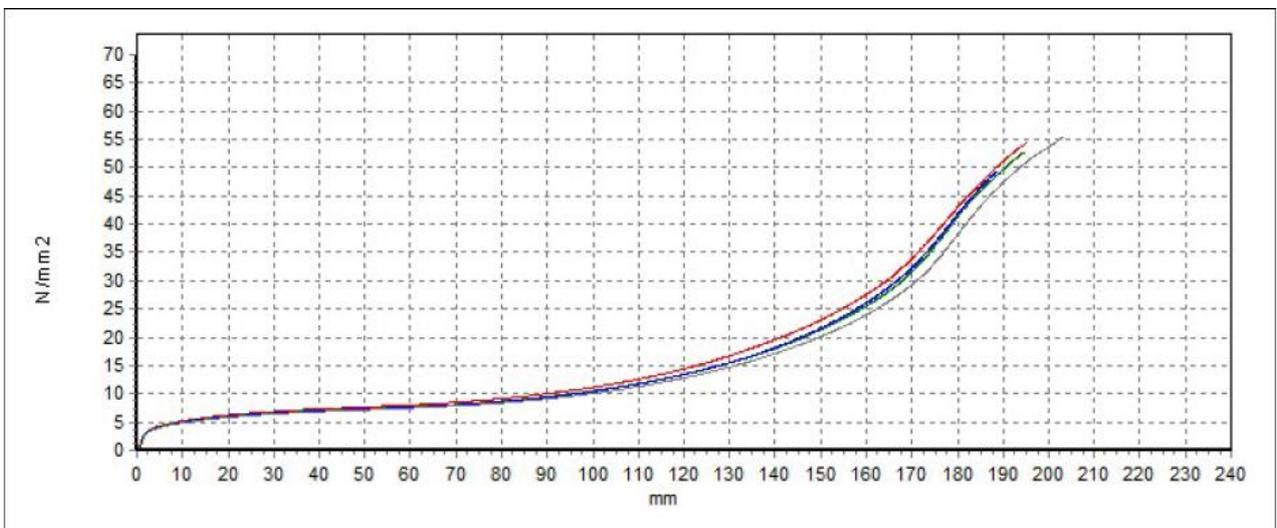
*Figura 5.1.2*

In questo grafico si nota il comportamento della miscela poliuretanica **80S** (Figura 5.1.3). È presente una discreta ripetibilità, soprattutto nel tratto 50-100mm. I punti di rottura dei provini sono all'incirca allo stesso valore di allungamento (150mm).



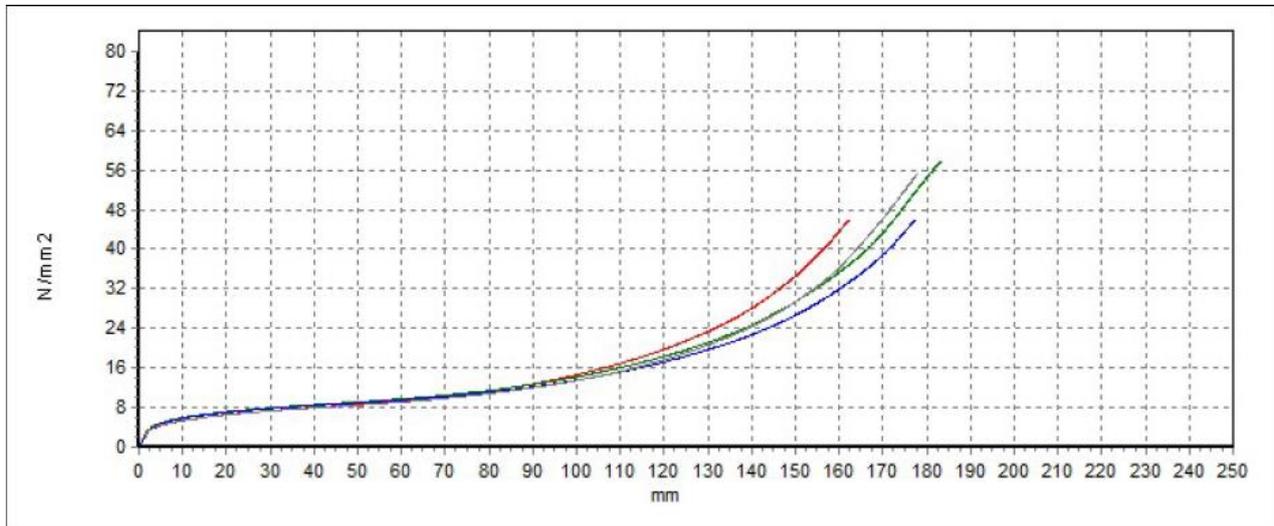
*Figura 5.1.3*

Questo grafico rappresenta il comportamento della miscela poliuretanica **80L** (Figura 5.1.4). Le curve possiedono un'ottima ripetibilità in tutto il tratto e i punti di rottura dei provini sono all'incirca allo stesso valore di allungamento, 190-200mm.



*Figura 5.1.4*

Questo grafico rappresenta il comportamento della miscela poliuretanica **90S** (Figura 5.1.5). Si nota un'ottima ripetibilità nel tratto 0-110mm, ma insoddisfacente nel tratto 120-180mm. Questo potrebbe essere causato da provini con mescole non perfettamente omogenee o che presentano imperfezioni a livello microscopico. I punti di rottura dei provini sono distribuiti in un intervallo di allungamento di 20mm.

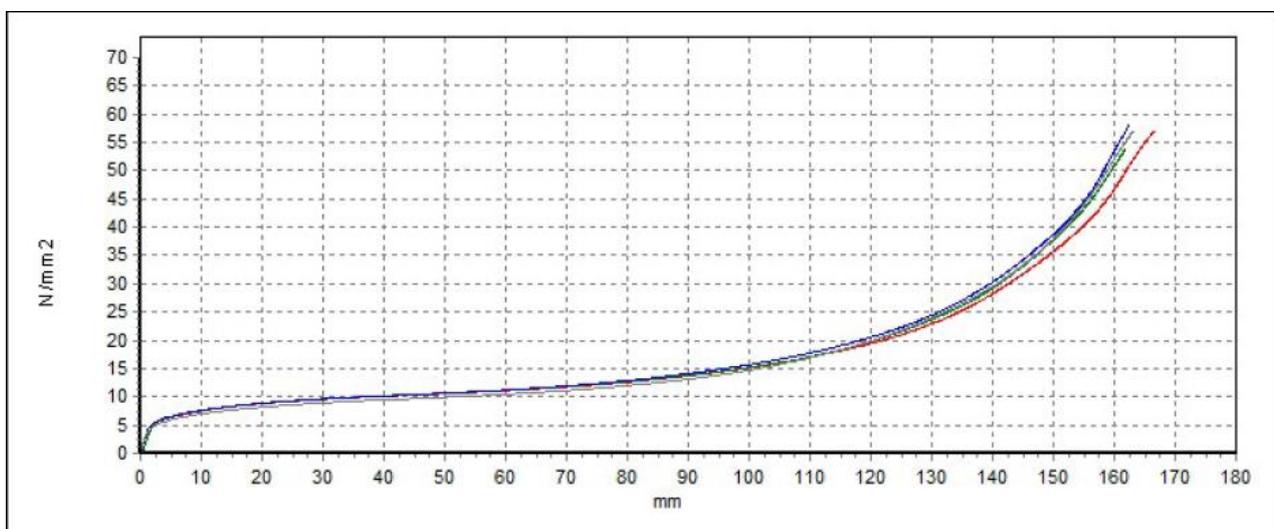


*Figura 5.1.5*

Il comportamento della miscela poliuretanica **90L** è rappresentato da questo grafico (Figura 5.1.6).

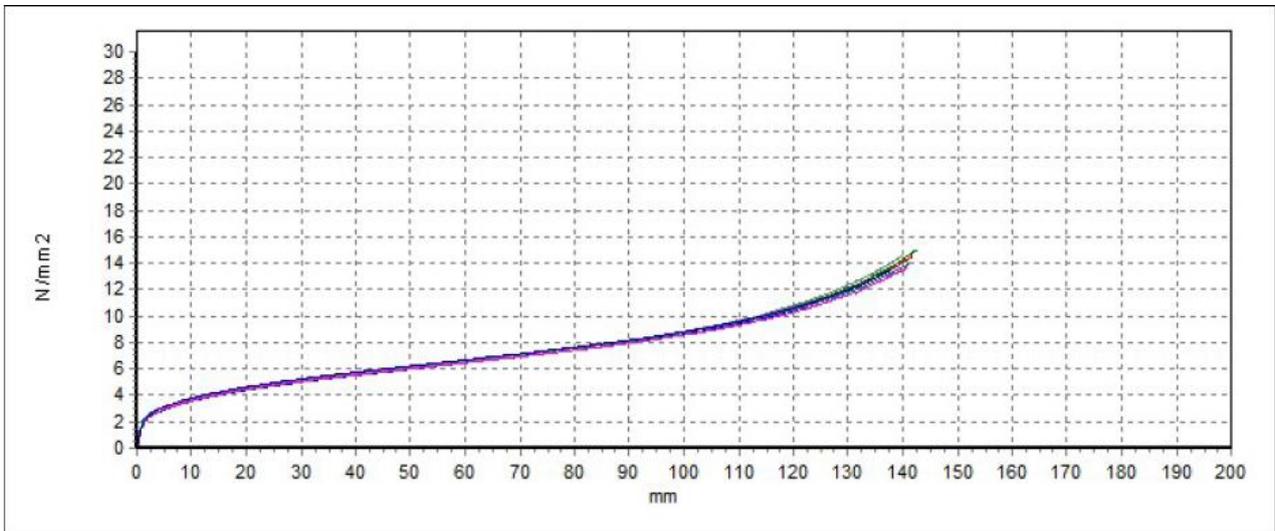
Si rimarca un'ottima ripetibilità, ad eccezione di un provino rappresentato dalla curva rossa nel tratto 130-170mm.

I punti di rottura dei provini sono all'incirca allo stesso valore di allungamento (165mm).



*Figura 5.1.6*

Questo grafico rappresenta il comportamento della miscela poliuretanica **80T** (Figura 5.1.7). Dal grafico si evince che le curve hanno un'ottima ripetibilità e i valori di rottura ad allungamento sono pressoché identici.

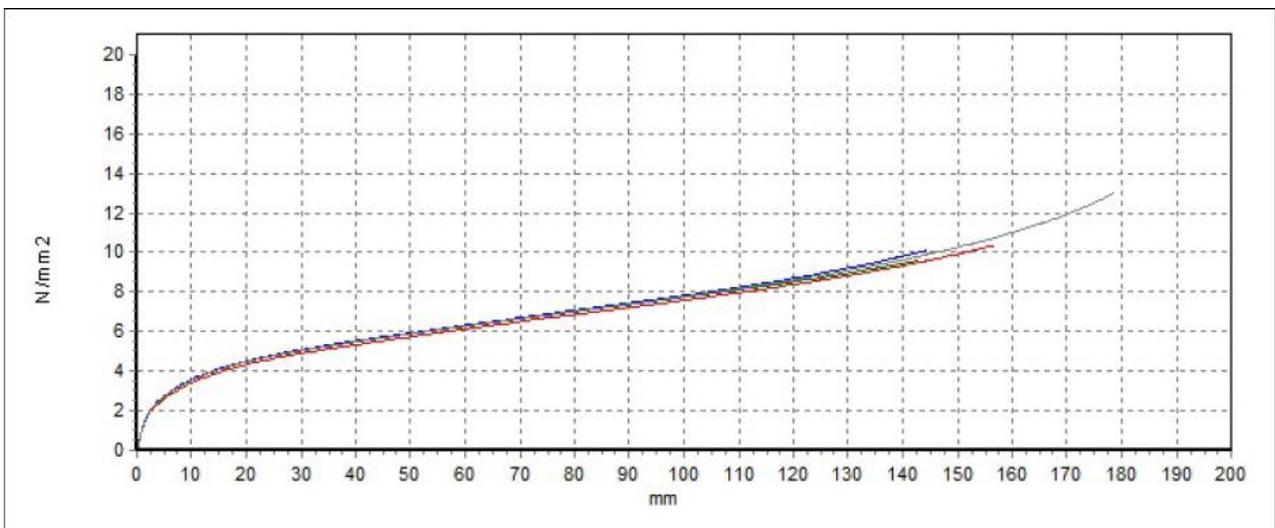


*Figura 5.1.7*

Il comportamento della miscela poliuretanica **80M** è rappresentato da questo grafico (Figura 5.1.8).

Si può notare un'ottima ripetibilità delle curve per la maggior parte del tratto ad eccezione del tratto 140-180mm.

Due provini in particolare risultano avere valori di allungamento a rottura maggiori.

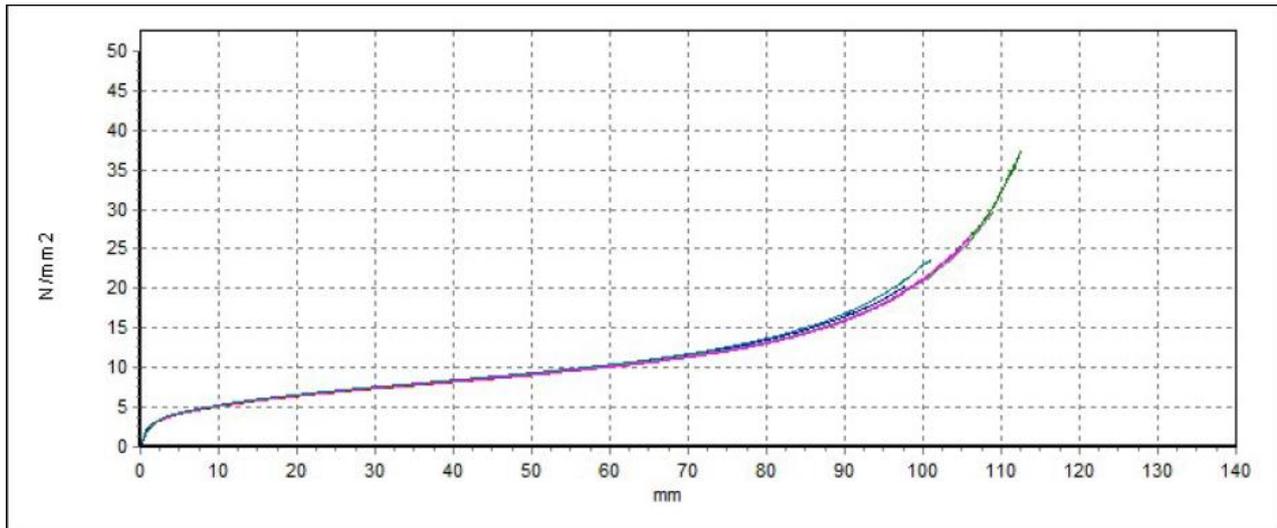


*Figura 5.1.8*

Questo grafico rappresenta il comportamento della miscela poliuretanica **90T** (Figura 5.1.9). Si può notare come la ripetibilità sia ottima nel tratto 0-100mm ma pessima nel tratto 100-115mm.

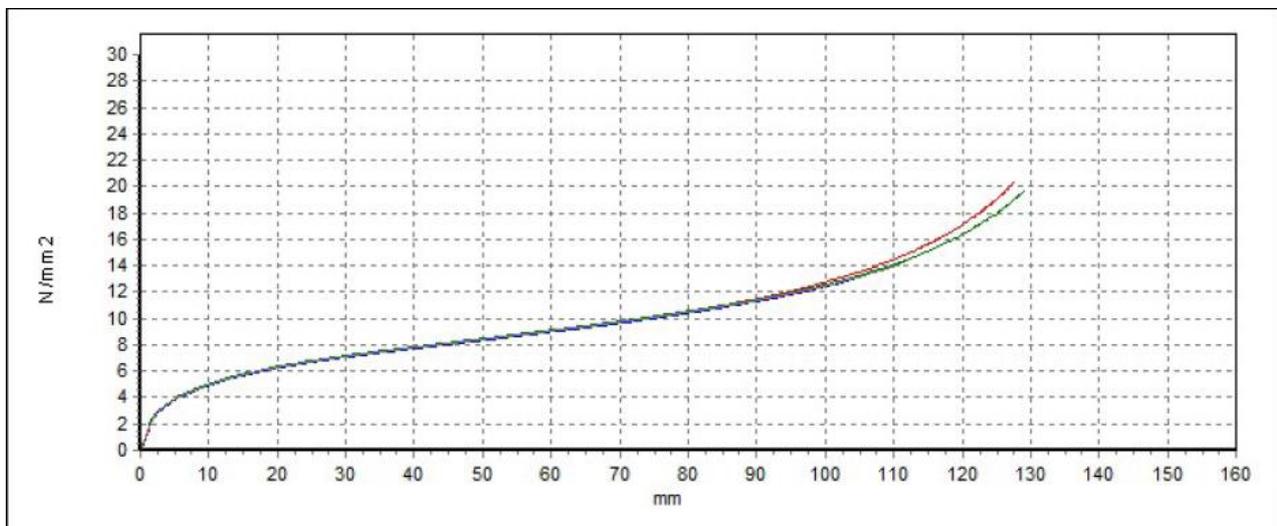
I valori di allungamento a rottura sono differenti per ogni provino e la differenza tra il valore di allungamento a rottura maggiore e quello minore è all'incirca di 15mm.

Questo potrebbe essere causato da provini con mescole non perfettamente omogenee o che presentano imperfezioni a livello microscopico.



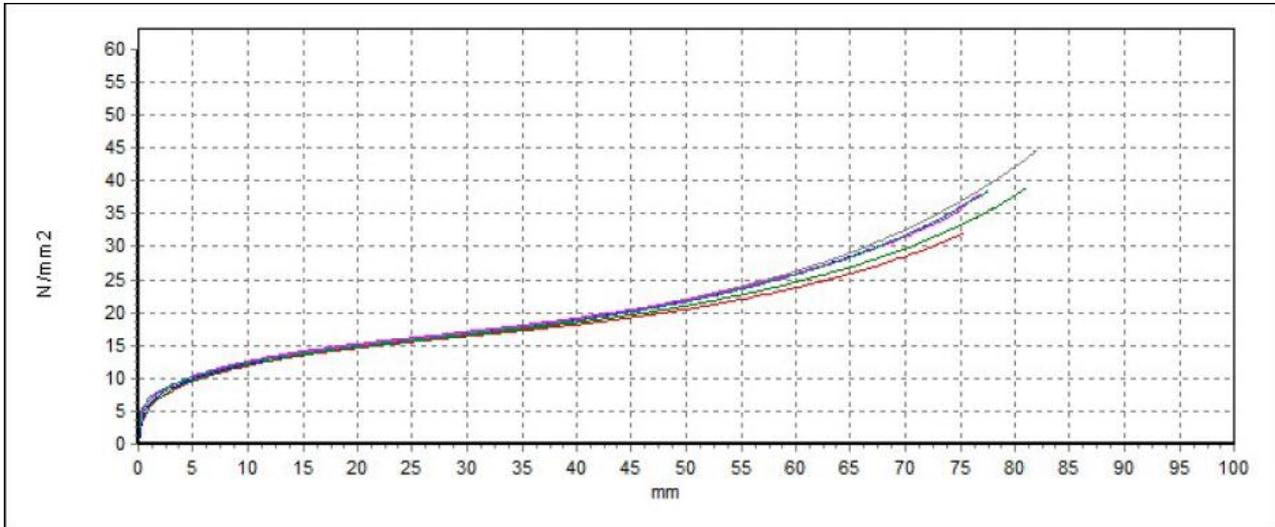
*Figura 5.1.9*

Questo grafico rappresenta il comportamento della miscela poliuretanica **90M** (Figura 5.1.10). La ripetibilità nel tratto 0-100mm è ottima mentre differisce nel tratto 100-130mm, in modo particolare si può osservare che due provini giungono a rottura prima degli altri.



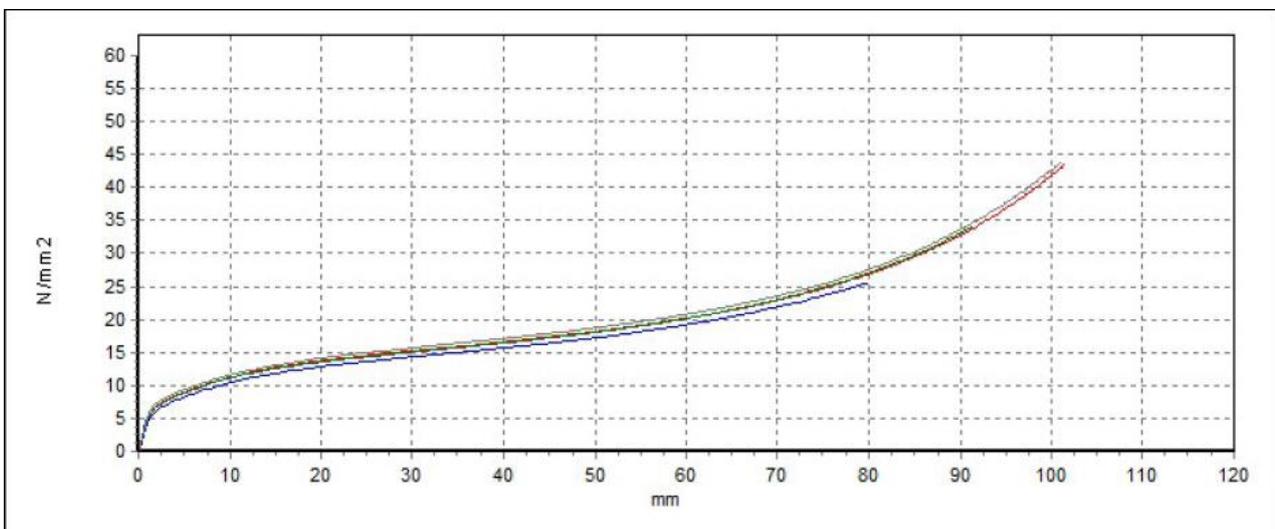
*Figura 5.1.10*

Questo grafico rappresenta il comportamento della miscela poliuretanica **95T** (Figura 5.1.11). Le curve hanno un'ottima ripetibilità nel tratto 0-50mm e discreta nel tratto 50-80mm. I valori di allungamento a rottura dei provini differiscono in modo esiguo, mentre i valori di tensione a rottura variano abbondantemente in un range 30-45 N/mm<sup>2</sup>.



*Figura 5.1.11*

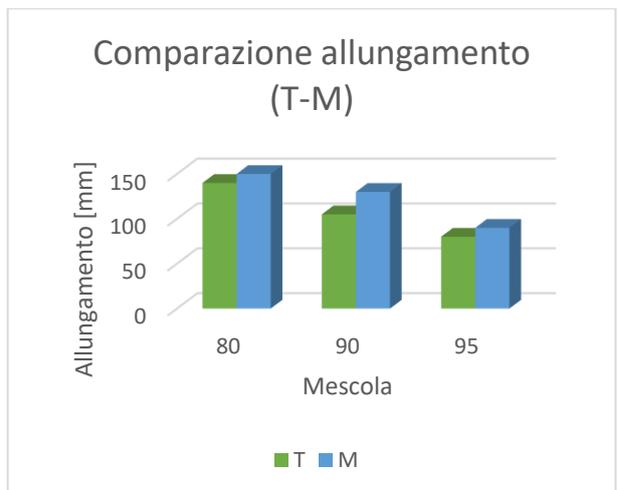
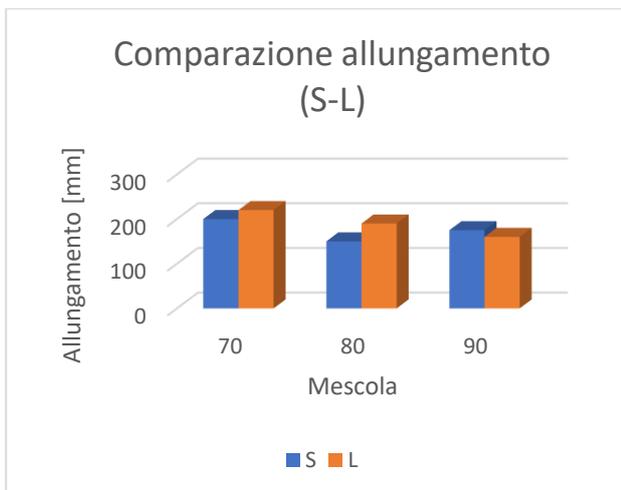
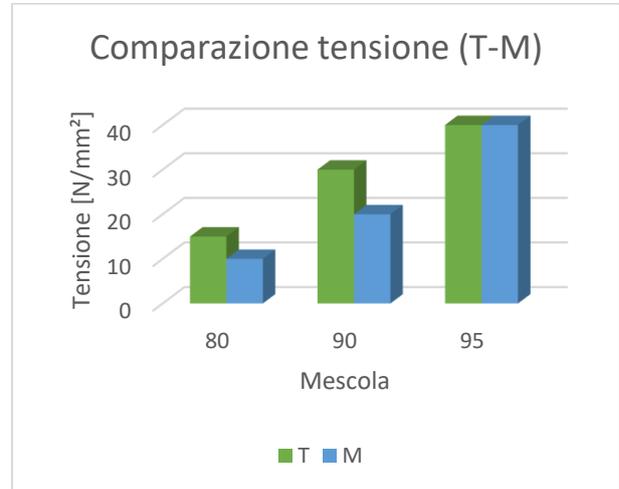
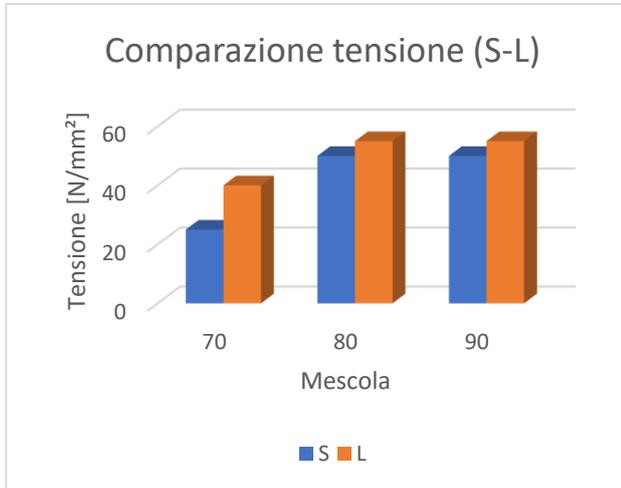
Questo grafico rappresenta il comportamento della miscela poliuretanica **95M** (Figura 5.1.12). La ripetibilità delle curve è ottima nel tratto 0-80mm ma pessima nel tratto 80-100mm. Soltanto due curve hanno lo stesso comportamento con identici valori di allungamento a rottura. Le altre due curve si interrompono prima per valori di allungamento a rottura e tensione a rottura molto minori. Questo comportamento può essere causato dalla presenza di imperfezioni nella miscela.



*Figura 5.1.12*

Con i seguenti istogrammi si vanno a comparare le mescole poliuretaniche in funzione della tensione e dell'allungamento a rottura.

Ogni mescola poliuretanicca è stata confrontata con la sua rispettiva mescola in modo da equiparare in modo diretto i due additivi.



## 5.2) COMPRESSIONE

Per quanto riguarda la prova di compressione si vanno ad osservare le curve di ogni mescola poliuretanicata ottenute durante i test.

In questo modo si nota l'andamento puntuale della forza (N) e della compressione % per ciascuna mescola poliuretanicata.

I provini appartenenti alla stessa mescola sono identificati all'interno del grafico da curve di colori differenti.

Le curve ottenute dalla prova di compressione sono rappresentate all'interno di un grafico, dove sull'asse delle ascisse abbiamo la compressione (%) e sull'asse delle ordinate abbiamo la forza (N).

Si studia ora l'andamento delle curve della mescola poliuretanicata identificata con il nome **70S** (Figura 5.2.1).

La ripetibilità delle curve nel tratto 0-50% di compressione è ottimo.

Nel tratto 50-65% di compressione si manifesta il fenomeno dell'attrito, infatti sono presenti dei "gradini" su tutte le curve.

Il punto di collasso è all'incirca uguale per tutte le curve, a denotare l'eccezionale ripetibilità.

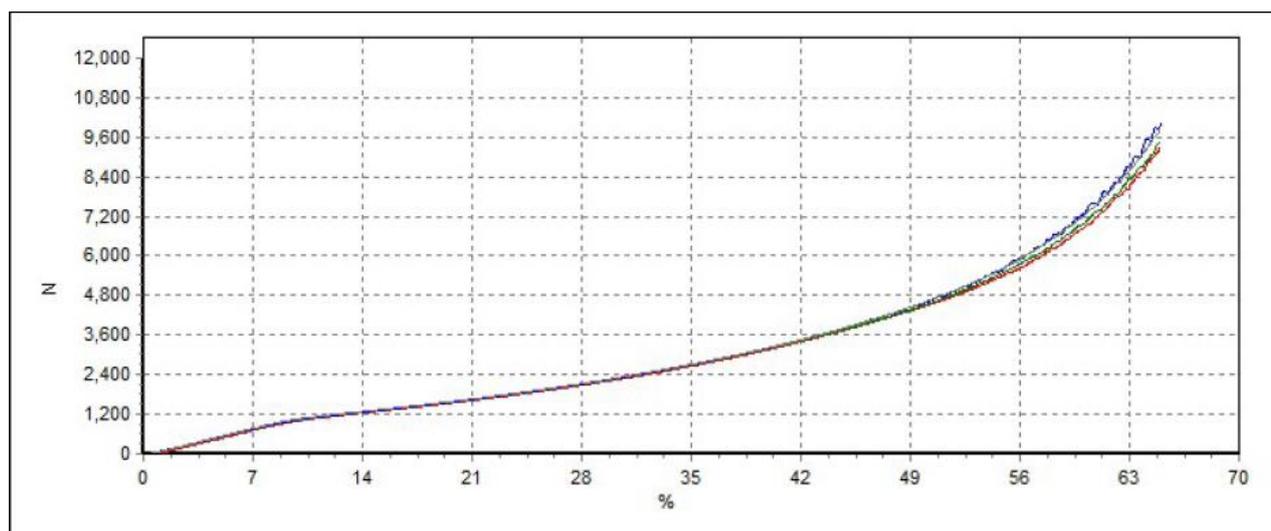


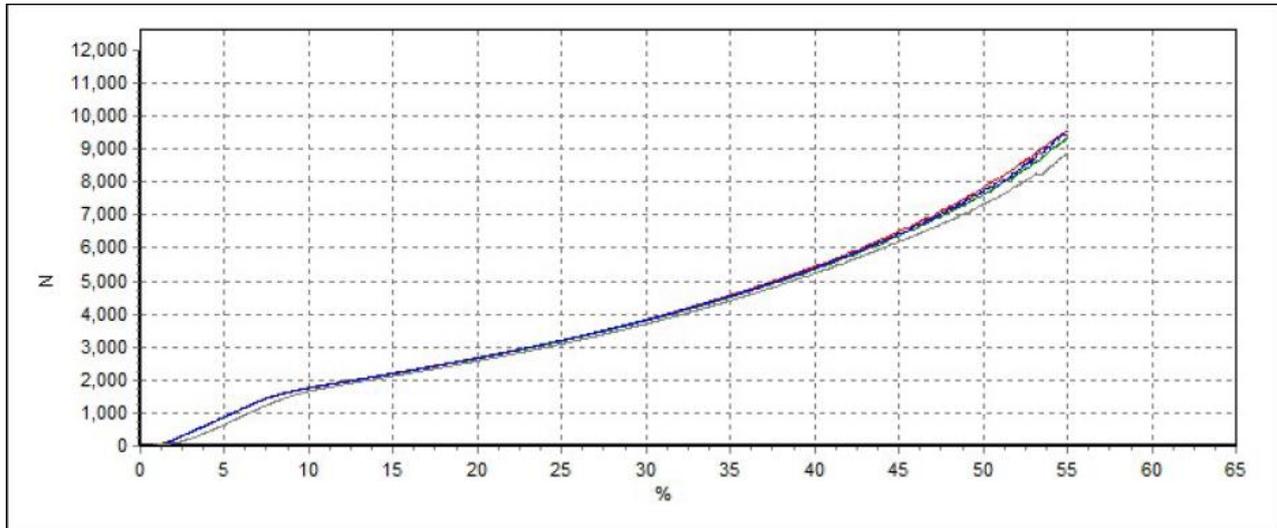
Figura 5.2.1

Si analizza ora l'andamento delle curve della miscela poliuretanicca identificata con il nome **70L** (Figura 5.2.2).

La ripetibilità in tutto il range della prova è ottima.

La percentuale di compressione e di forza applicata è paragonabile per tutte le curve.

Nel tratto 50-55% di compressione sono presenti dei "gradini" sulle curve, ad indicare che iniziava a subentrare il fenomeno dell'attrito.



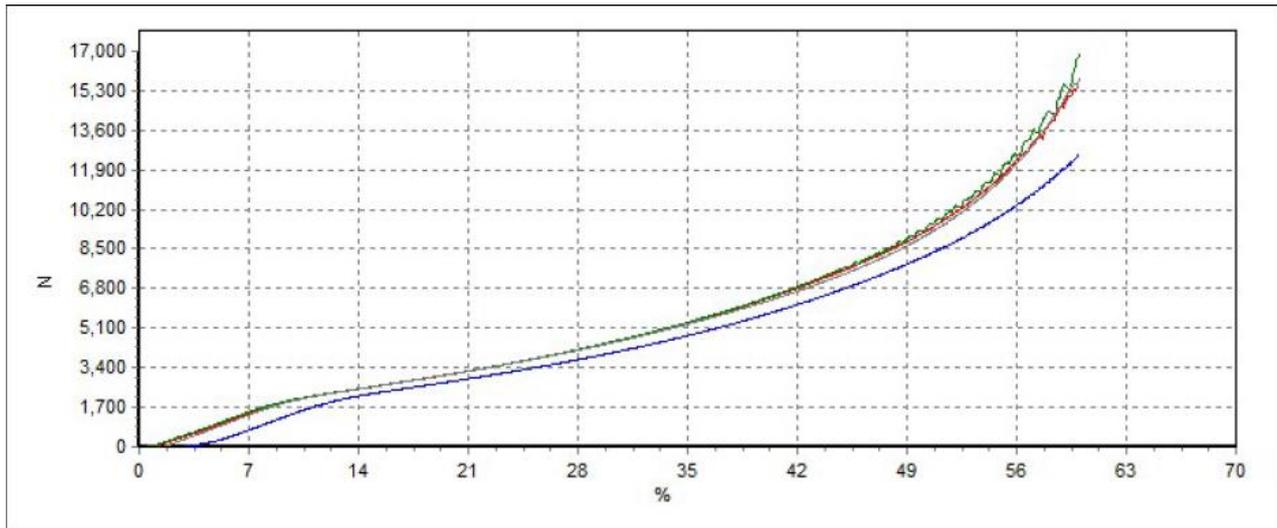
*Figura 5.2.2*

Il seguente grafico rappresenta l'andamento delle curve della miscela poliuretanicca **80S** (Figura 5.2.3).

Tre curve hanno lo stesso andamento in tutto il range, mentre la curva blu si trova più in basso, ad indicare un minor bisogno di forza a parità di allungamento.

La percentuale di compressione è molto simile per tutte le curve, mentre per la forza massima applicata c'è un range di circa 5000N tra la curva più in basso e la curva più in alto.

La curva verde presenta dei "gradini" subito prima del collasso dovuti all'attrito.

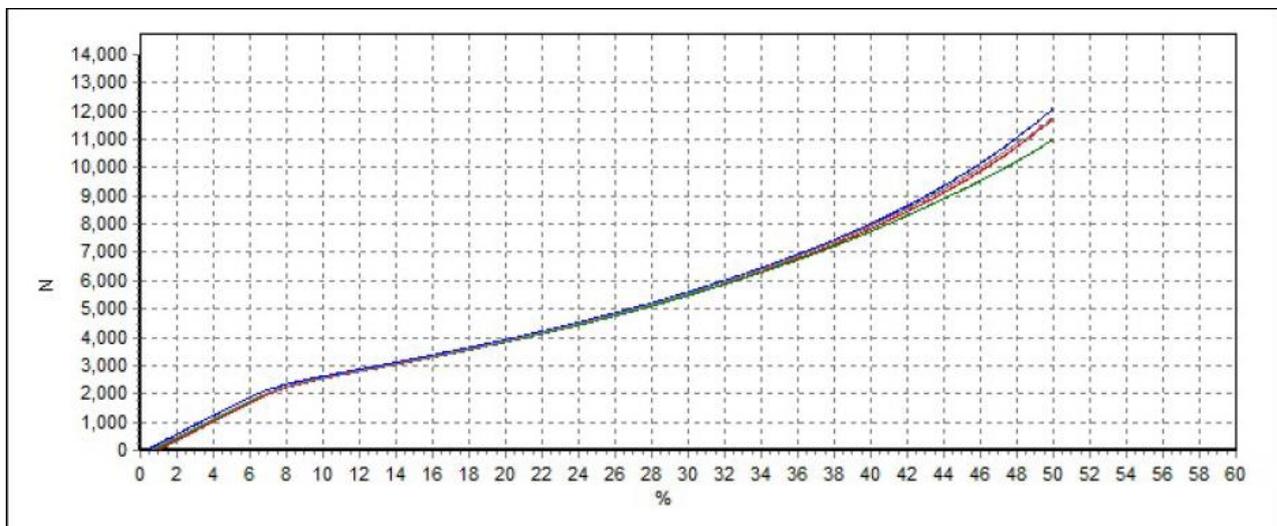


*Figura 5.2.3*

Il seguente grafico rappresenta l'andamento delle curve della miscela poliuretanicca **80L** (Figura 5.2.4).

Le curve hanno un'eccellente ripetibilità in tutto il range di misura della prova.

La differenza di forza per il collasso, tra la curva inferiore e quella superiore, è di circa 1000N.



*Figura 5.2.4*

Il grafico in questione rappresenta l'andamento delle curve della mescola **90S** (Figura 5.2.5). La ripetibilità delle curve è bassa e tendono a disporsi in coppie. La differenza di forza per il collasso, tra la curva inferiore e quella superiore, è di circa 2000N.

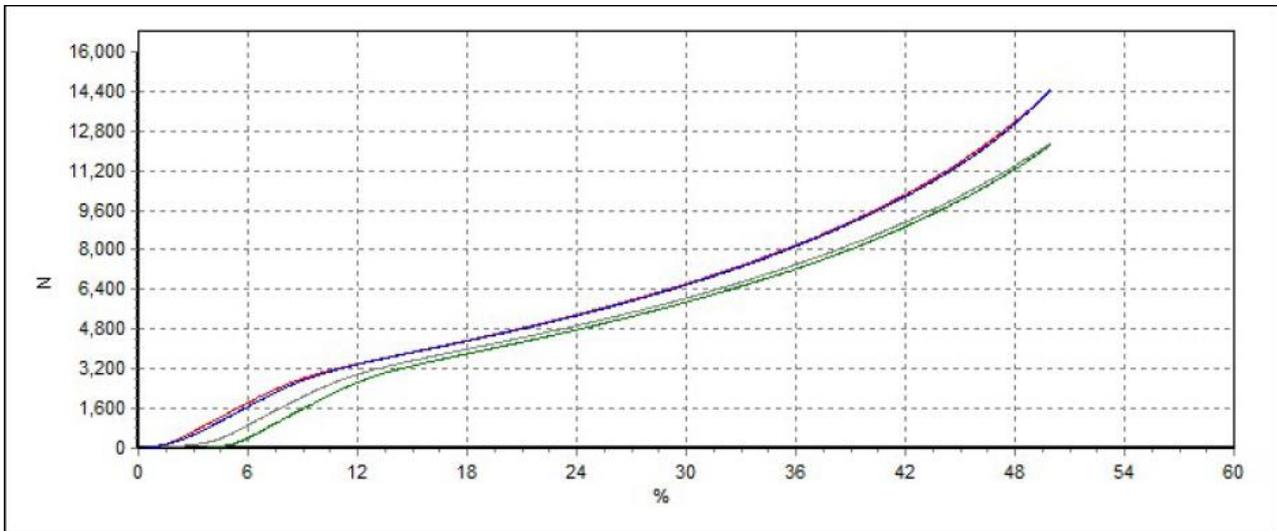


Figura 5.2.5

Il grafico in questione rappresenta l'andamento delle curve della mescola **90L** (Figura 5.2.6). La ripetibilità delle curve è ottima nel range 0-35% di compressione, ma si differenziano nel range 35-45%, dove la differenza di forza per far avvenire il collasso, tra la curva inferiore e la curva superiore, è di circa 2000N.

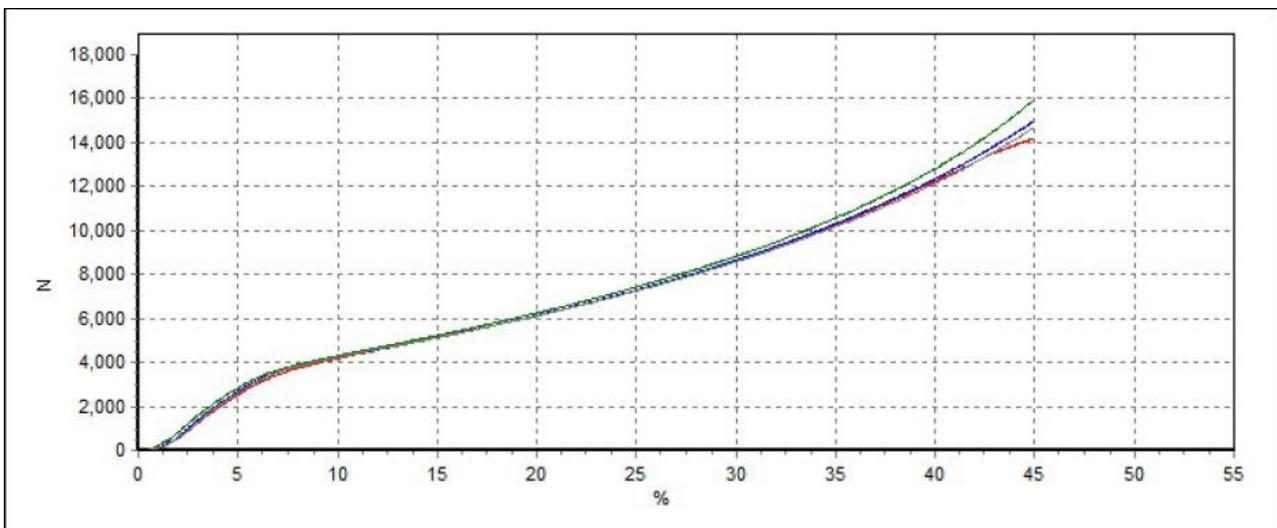


Figura 5.2.6

Il seguente grafico rappresenta l'andamento delle curve della miscela poliuretanicca **80T** (Figura 5.2.7).

Le curve sono tre invece che quattro poiché ci sono stati problemi con la produzione dei provini. Il grafico in questione presenta delle curve con una pessima ripetibilità in tutto il range di misura. È molto presente il fenomeno dell'attrito, che si nota dai "gradini" presenti su tutte le curve nel tratto 40-60% di compressione.

La differenza di forza per far avvenire il collasso, tra la curva inferiore e la curva superiore, è di circa 2500N.

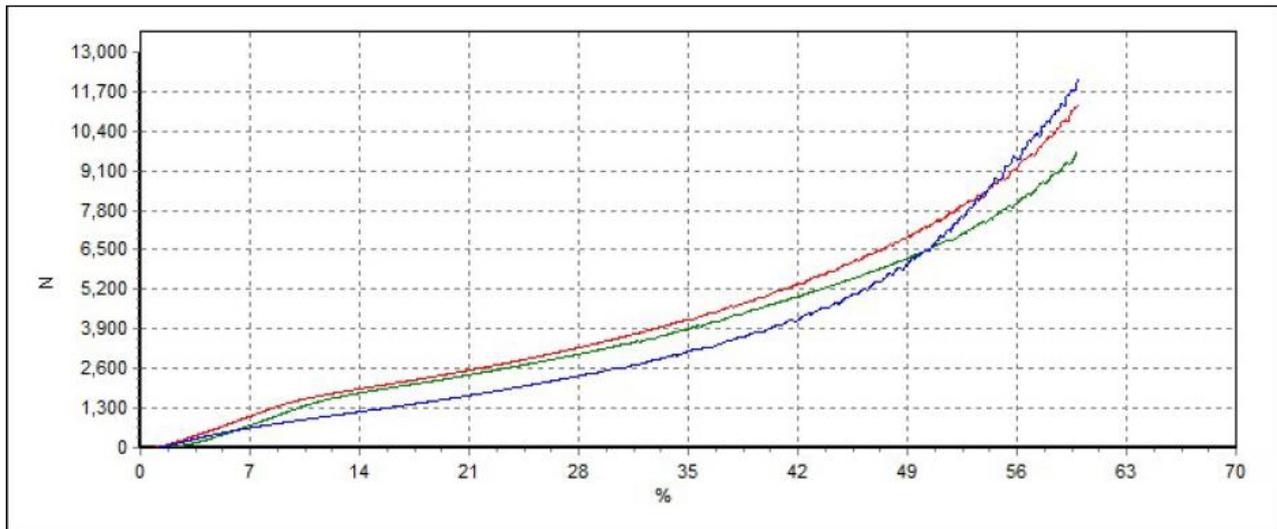


Figura 5.2.7

Il grafico in esame rappresenta l'andamento delle curve della miscela **80M** (Figura 5.2.8).

La ripetibilità di quest'ultime è ottima in tutto il range di misura della prova.

È presente un marcato attrito in tutte le curve, in modo particolare una curva presenta i gradini ad una percentuale molto bassa di compressione (20%). Questo potrebbe essere stato causato da un'insufficiente lubrificazione del provino.

La forza per far avvenire il collasso è simile in tutte le curve.

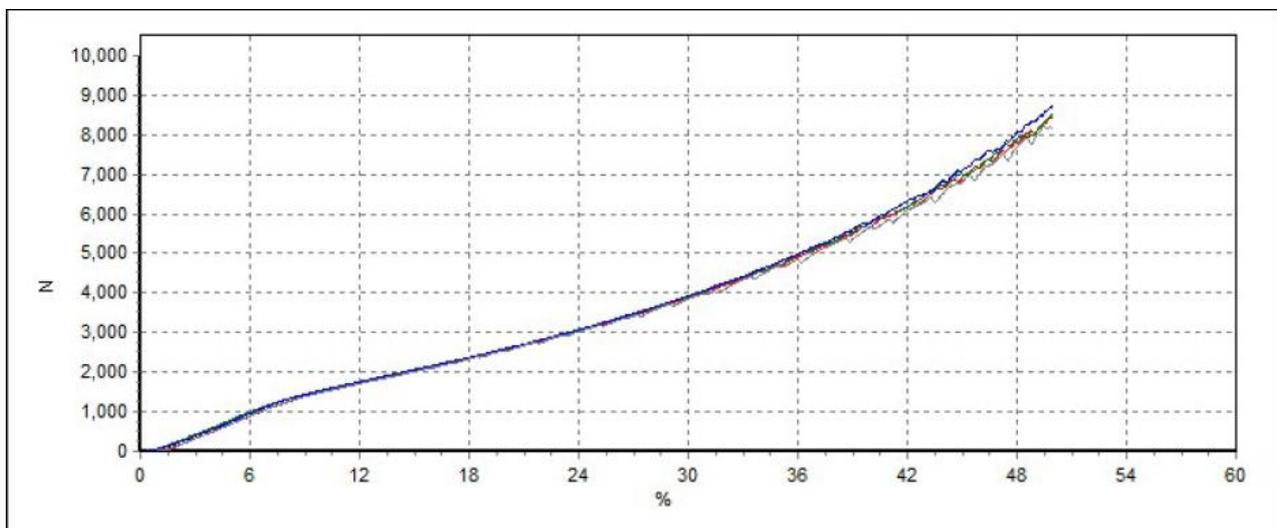
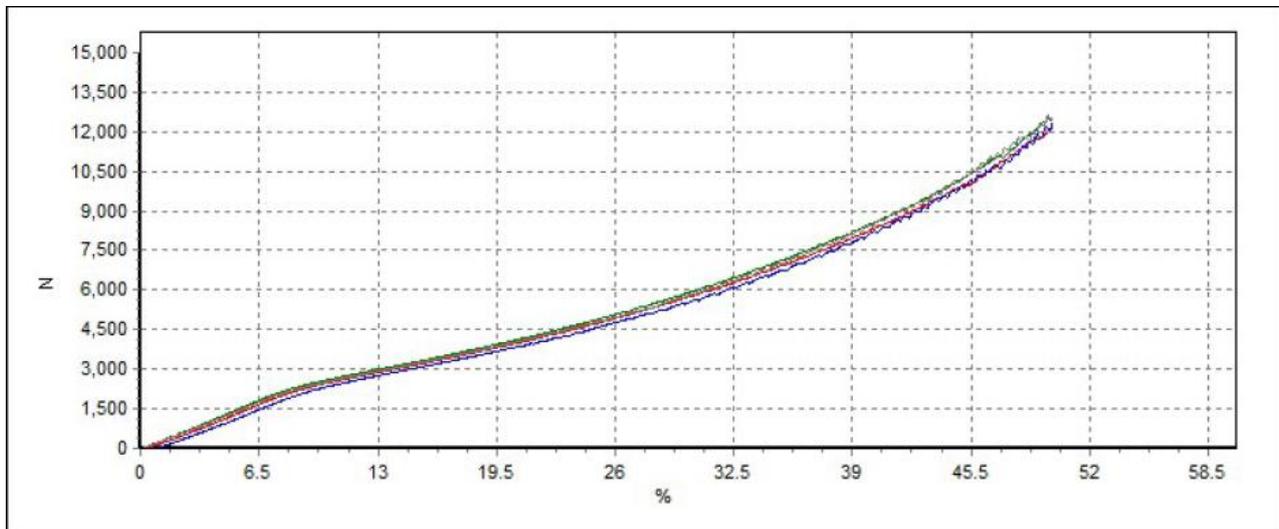


Figura 5.2.8

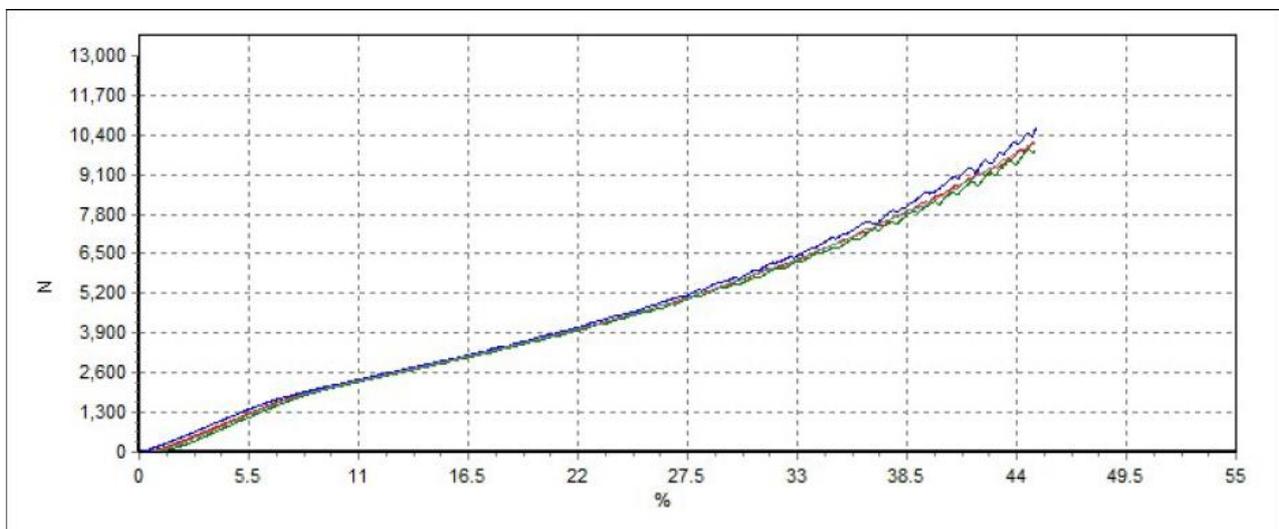
Il seguente grafico rappresenta l'andamento delle curve della miscela poliuretanicca **90T** (Figura 5.2.9).

È possibile fare le medesime considerazioni fatte per la miscela poliuretanicca 80M.



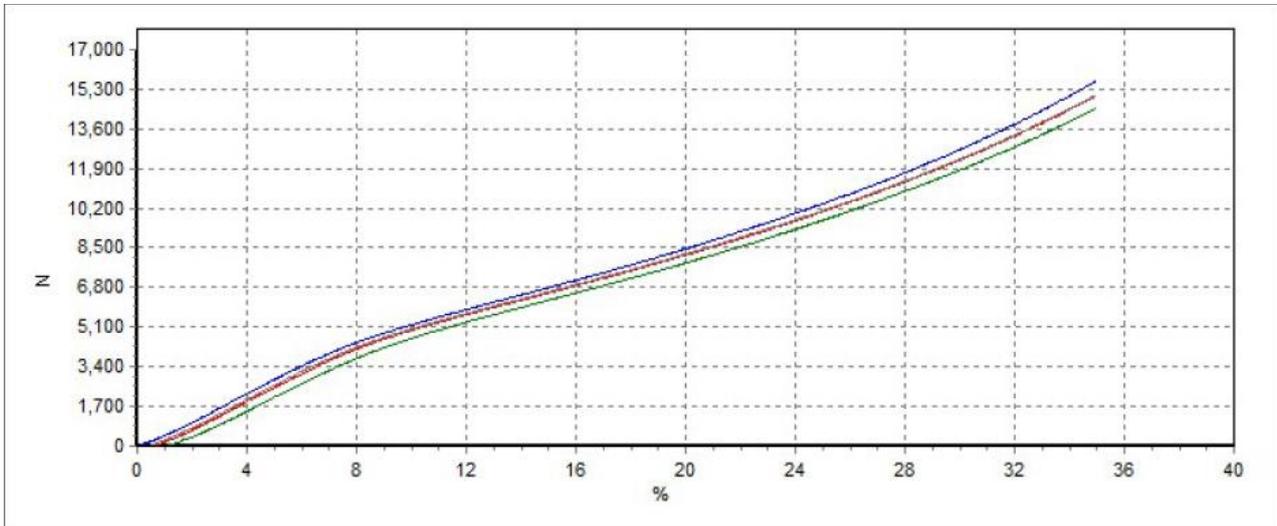
*Figura 5.2.9*

Il grafico in questione rappresenta l'andamento delle curve della miscela **90M** (Figura 5.2.10). È possibile, anche in questo caso, fare le medesime considerazioni fatte per le due mescole precedenti.



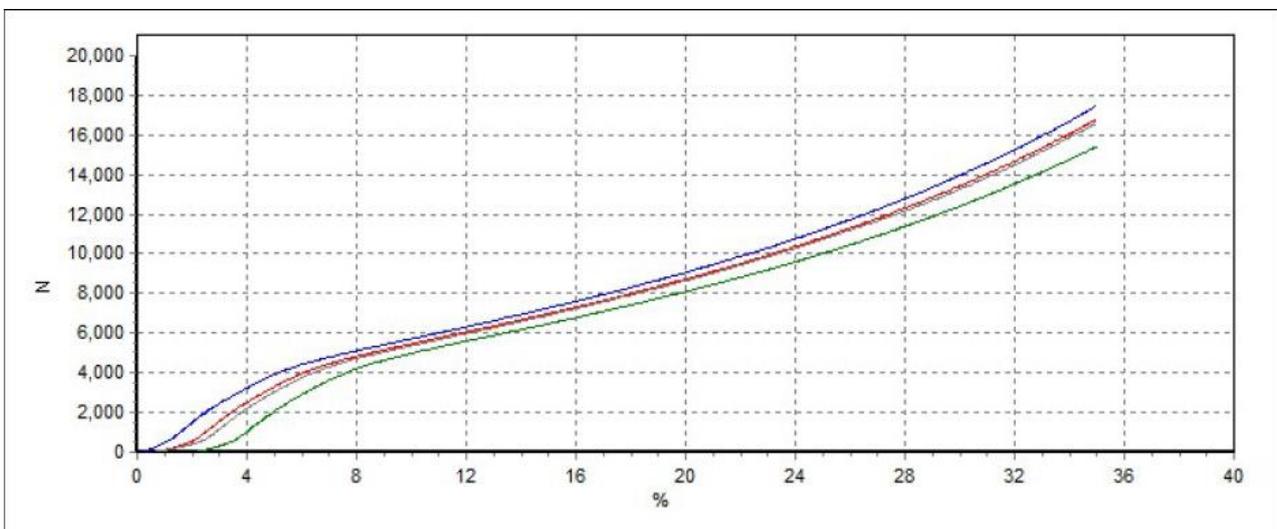
*Figura 5.2.10*

Il grafico in questione rappresenta l'andamento delle curve della mescola **95T** (Figura 5.2.11). La ripetibilità delle curve è molto scarsa in tutto il range di misura. La differenza di forza per far avvenire il collasso, tra la curva inferiore e la curva superiore, è di circa 1000N.



*Figura 5.2.11*

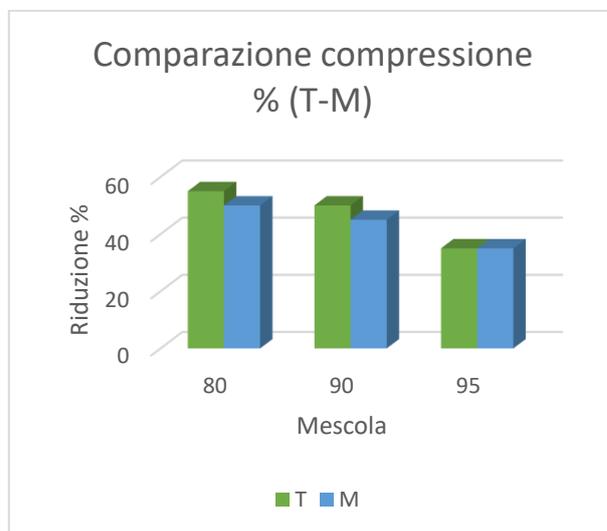
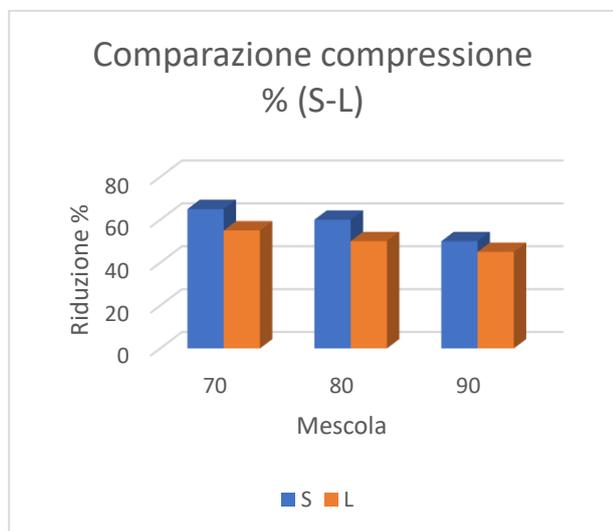
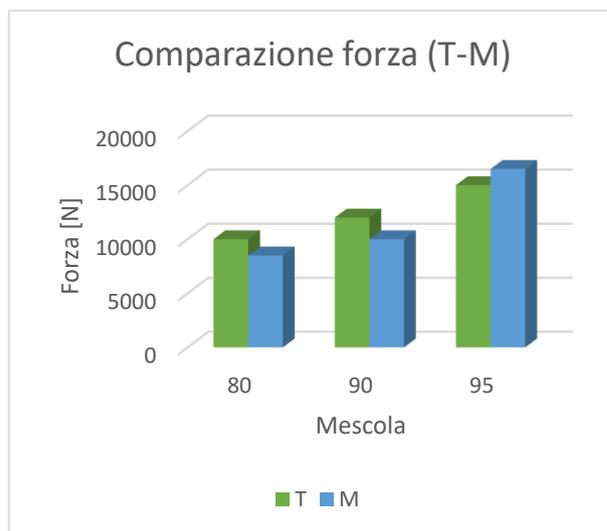
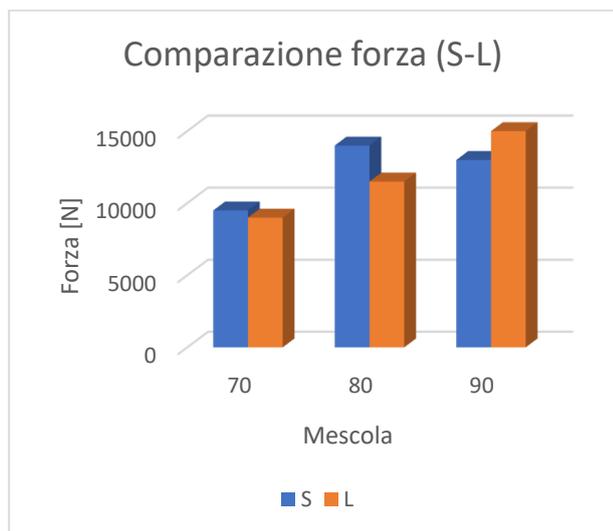
Il grafico in esame rappresenta l'andamento delle curve della mescola **95M** (Figura 5.2.12). La ripetibilità delle curve è pessima in tutto il range di misura, ad eccezione della coppia di curve di colore rosso e grigio. La forza per far avvenire il collasso varia all'incirca di 3000N tra la curva superiore e la curva inferiore.



*Figura 5.2.12*

Con i seguenti istogrammi si vanno a comparare le mescole poliuretaniche in funzione della forza e della compressione % necessarie al collasso dei provini.

Ogni mescola poliuretaniche è stata confrontata con la sua rispettiva mescola in modo da equiparare in modo diretto i due additivi.



### 5.3) LACERAZIONE

Per la prova di lacerazione si vanno ad osservare le curve di ogni mescola poliuretanicata ottenute durante i test.

In questo modo si nota l'andamento puntuale della forza di taglio e dell'allungamento per ciascuna mescola poliuretanicata.

I provini appartenenti alla stessa mescola sono identificati all'interno del grafico da curve di colori differenti.

Le curve ottenute dalla prova di lacerazione sono rappresentate all'interno di un grafico, dove sull'asse delle ascisse abbiamo l'allungamento (mm) e sull'asse delle ordinate abbiamo la forza di taglio (N/mm).

Si studia ora l'andamento delle curve della mescola poliuretanicata identificata con il nome **70S** (Figura 5.3.1).

Le curve hanno una buona ripetibilità nel range 0-30mm.

Il punto di massimo della forza di taglio è all'incirca a 20 N/mm, mentre per la curva rossa è circa 25 N/mm.

L'allungamento per ogni curva è invece dato dalla lunghezza del tratto lineare, infatti quando le curve iniziano ad avere un andamento irregolare, non ha più senso definire l'allungamento.

Tutte le curve, ad eccezione della rossa, presentano nel tratto finale una discesa repentina con delle irregolarità.

Questo è dovuto alla "rottura parziale", in determinati istanti di tempo, della sezione resistente del provino.

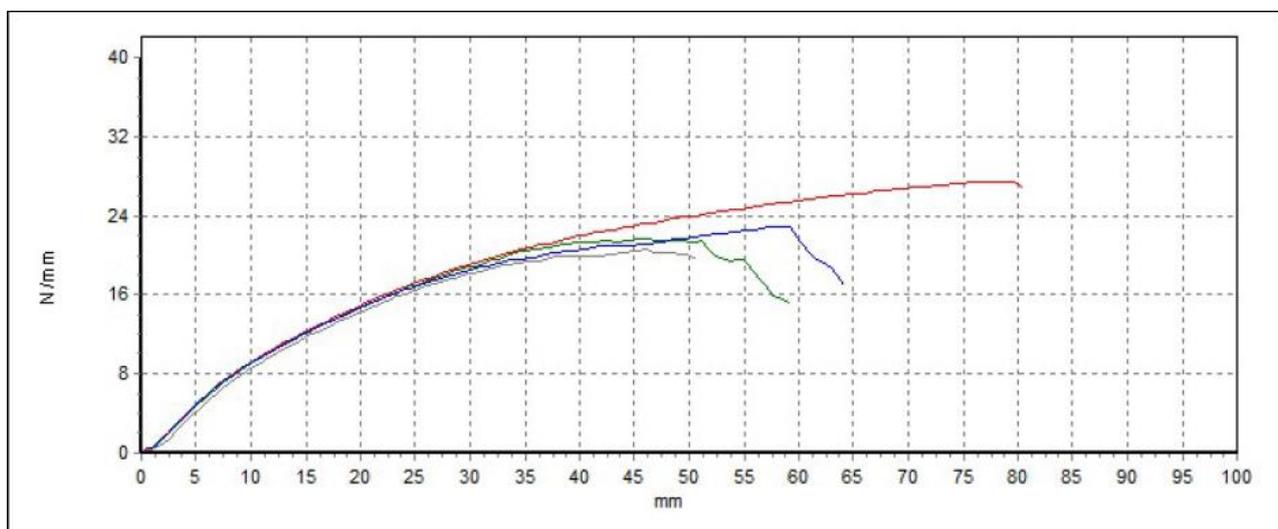
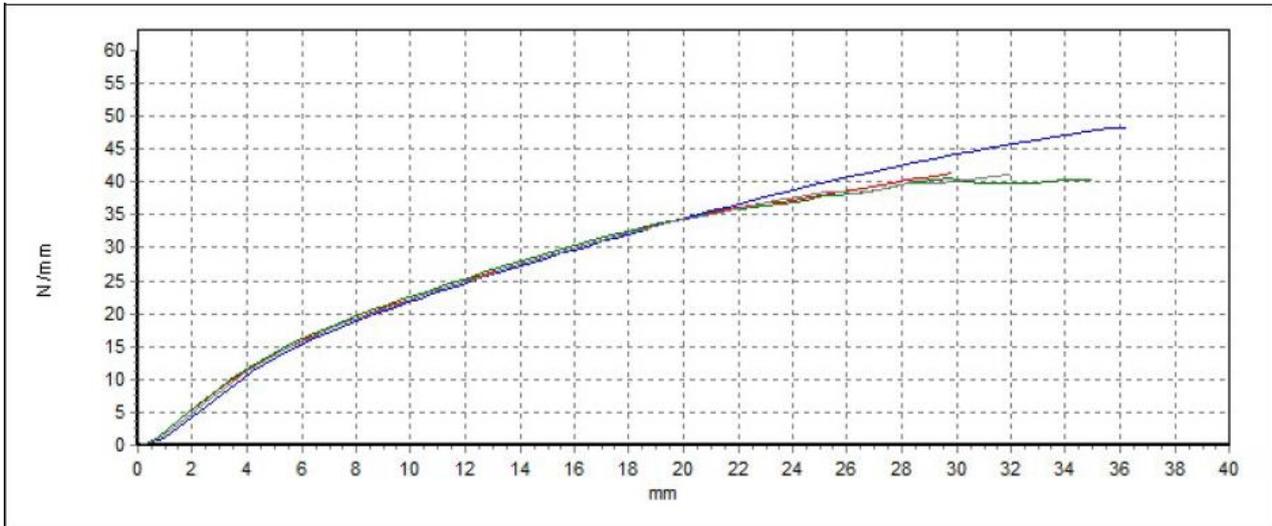


Figura 5.3.1

Il grafico in esame rappresenta l'andamento delle curve della mescola **70L** (Figura 5.3.2).  
Le curve hanno un'ottima ripetibilità nel tratto 0-22mm.  
Rispetto al 70S, la discesa repentina delle curve non accade, probabilmente a causa di uno strappo quasi immediato ed uniforme.  
Il punto di massimo della forza di taglio è all'incirca a 35 N/mm, mentre per la curva blu è circa 45 N/mm.



*Figura 5.3.2*

Il seguente grafico rappresenta l'andamento delle curve della mescola **80S** (Figura 5.3.3).

Le curve hanno un'ottima ripetibilità nel tratto 0-22mm.

Il punto di massimo della forza di taglio è diverso per ogni curva, con una media di circa 50 N/mm.

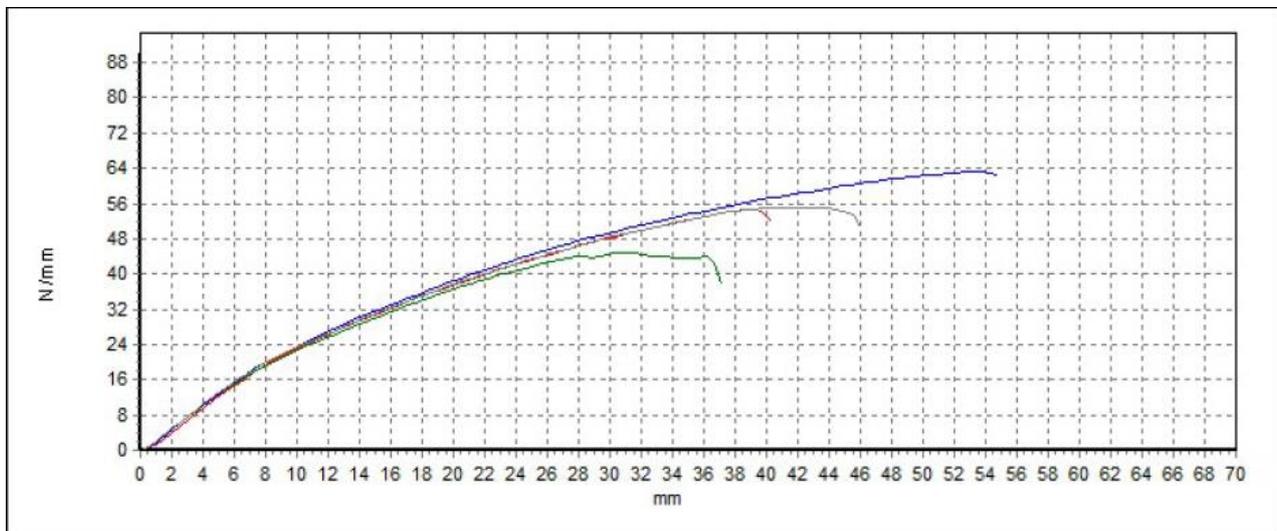


Figura 5.3.3

Il seguente grafico rappresenta l'andamento delle curve della mescola **80L** (Figura 5.3.4).

Le curve hanno un'ottima ripetibilità nel tratto 0-20mm.

Il punto di massimo della forza di taglio è all'incirca a 50 N/mm, con picchi di 60 N/mm per la curva verde.

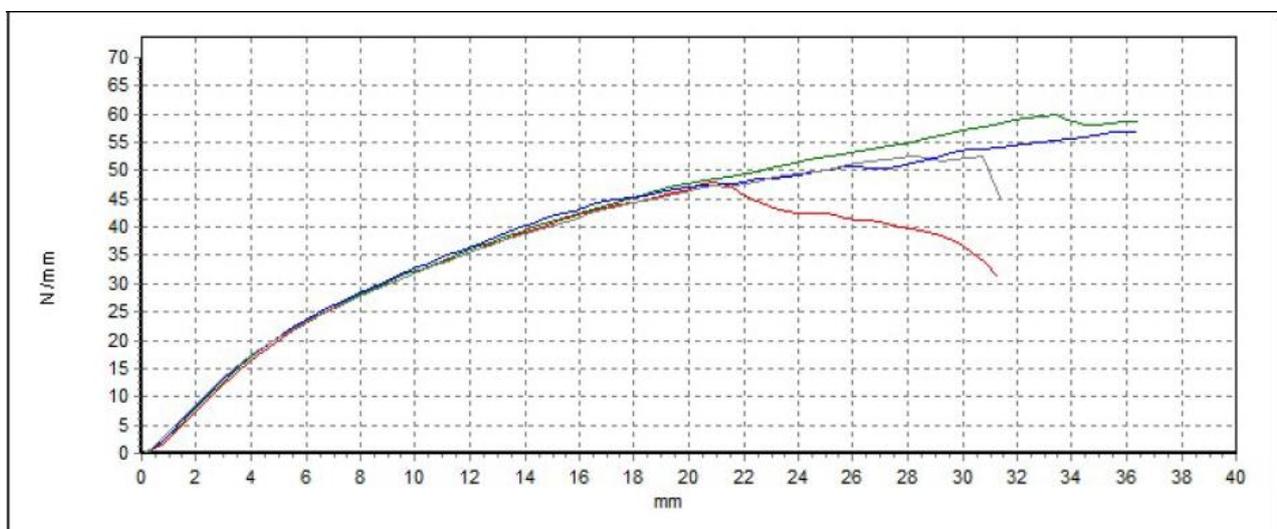


Figura 5.3.4

Il grafico in esame rappresenta l'andamento delle curve della mescola **90S** (Figura 5.3.5). Le curve presentano una scarsa ripetibilità in tutto il range di misura, in modo particolare nel tratto 20-40mm.

Il punto di massimo della forza di taglio è diverso per ogni curva, con una media di circa 55 N/mm. In tutte le curve, ad eccezione della blu, è presente una repentina discesa nel tratto finale. Come già detto per la mescola 70S, la discesa repentina è dovuta alla "rottura parziale", in determinati istanti di tempo, della sezione resistente del provino.

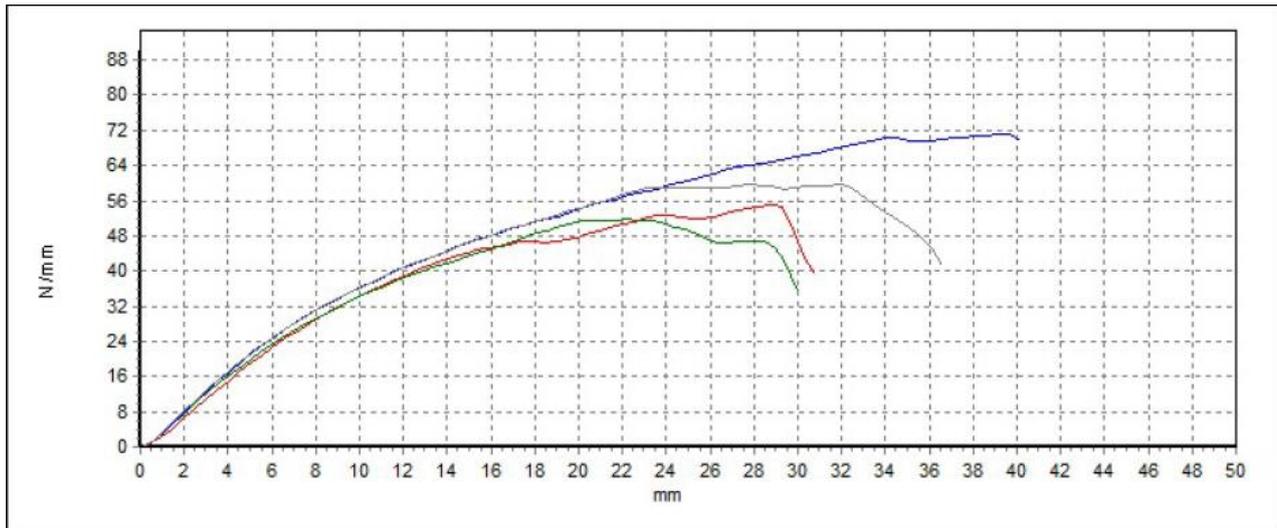


Figura 5.3.5

Il grafico in questione rappresenta l'andamento delle curve della mescola **90L** (Figura 5.3.6). È possibile fare le stesse considerazioni della mescola 90S, ad eccezione del fatto che il materiale sembrerebbe essere più duro a causa del suo minore allungamento e del fatto che non sono presenti repentine discese nei tratti finali delle curve.

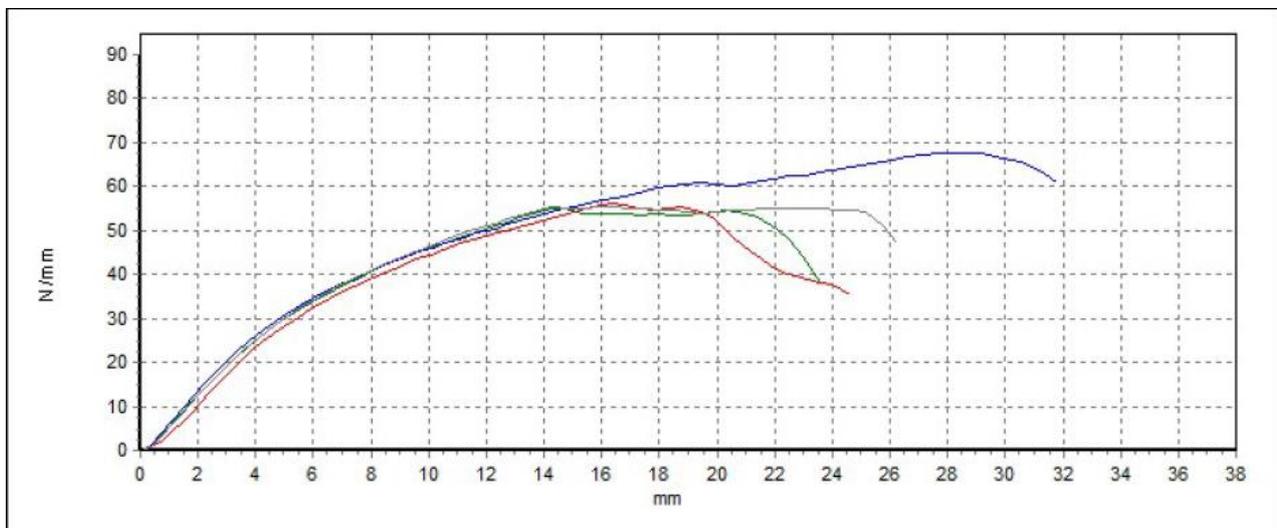
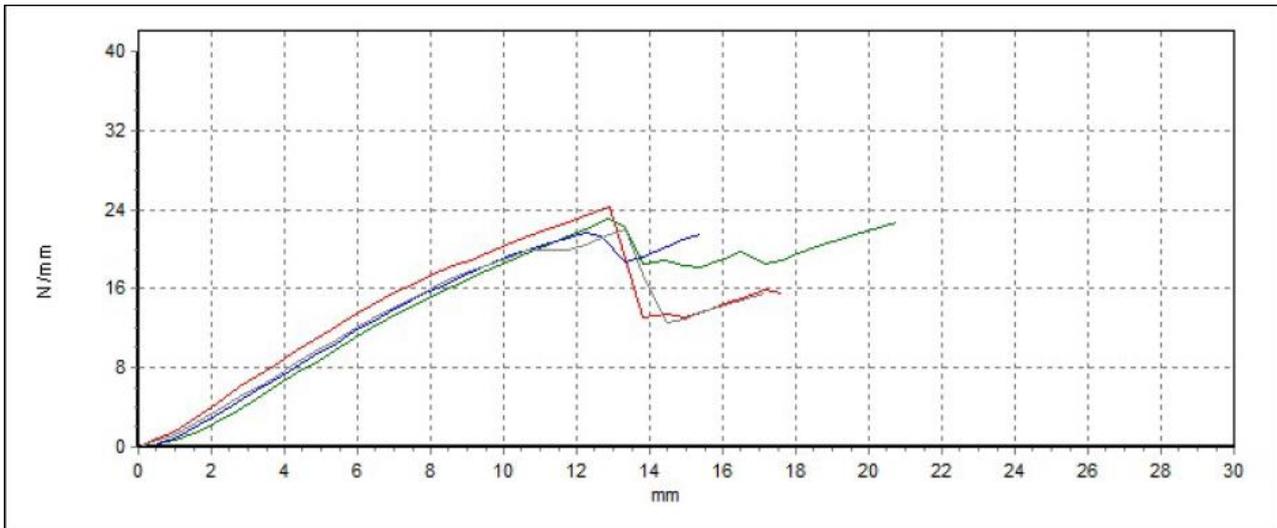


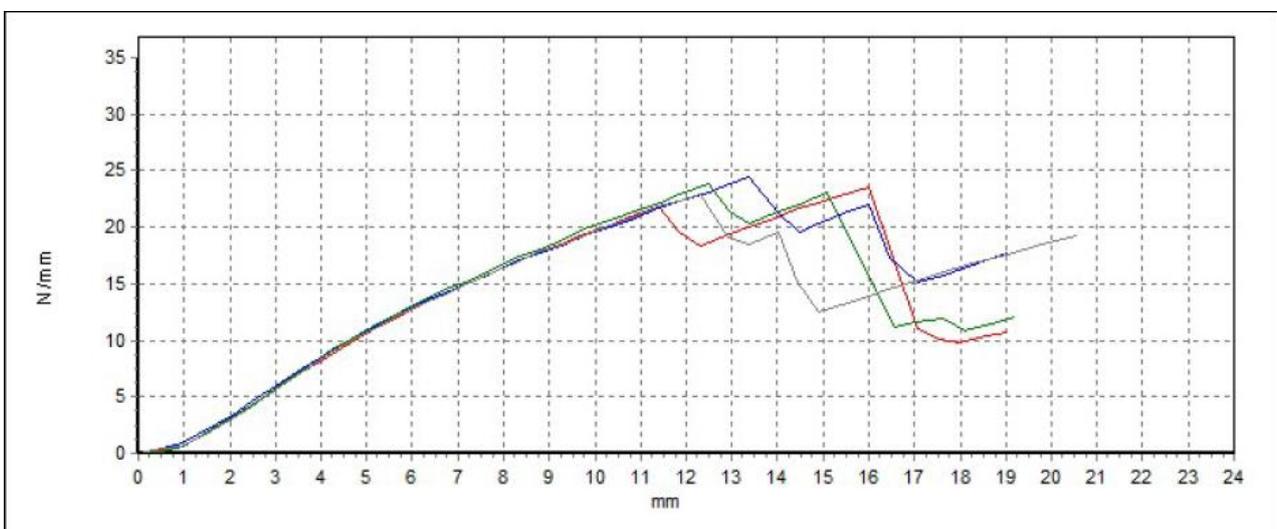
Figura 5.3.6

Il seguente grafico rappresenta l'andamento delle curve della mescola **80T** (Figura 5.3.7). Il punto di massimo della forza di taglio è compreso tra 20 e 24 N/mm. Le curve presentano degli andamenti particolari, infatti sono presenti delle continue variazioni di forza di taglio. Questi eventi potrebbero essere giustificati con la rottura parziale, in determinati istanti di tempo, della sezione resistente del provino. Dunque non si è verificato uno strappo costante nel tempo, bensì dei micro strappi improvvisi durante la prova.



*Figura 5.3.7*

Il grafico in questione rappresenta l'andamento delle curve della mescola **80M** (Figura 5.3.8). È possibile fare le stesse considerazioni della mescola 80T, ad eccezione dell'ottima ripetibilità nel tratto 0-11mm.

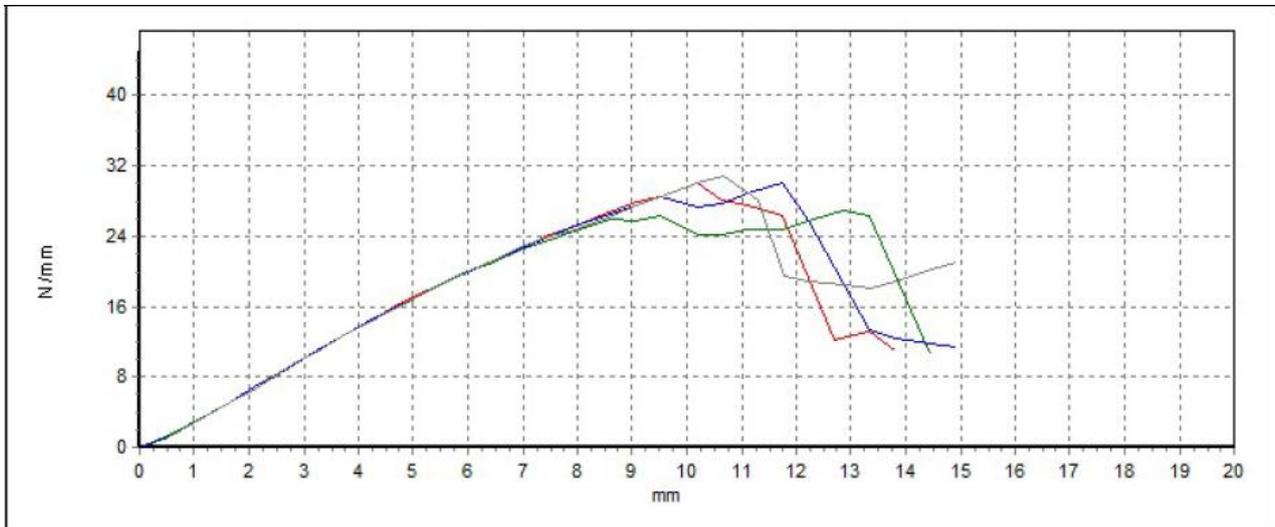


*Figura 5.3.8*

Il grafico in questione rappresenta l'andamento delle curve della mescola **90T** (Figura 5.3.9).

La ripetibilità delle curve nel tratto 0-8mm è ottima.

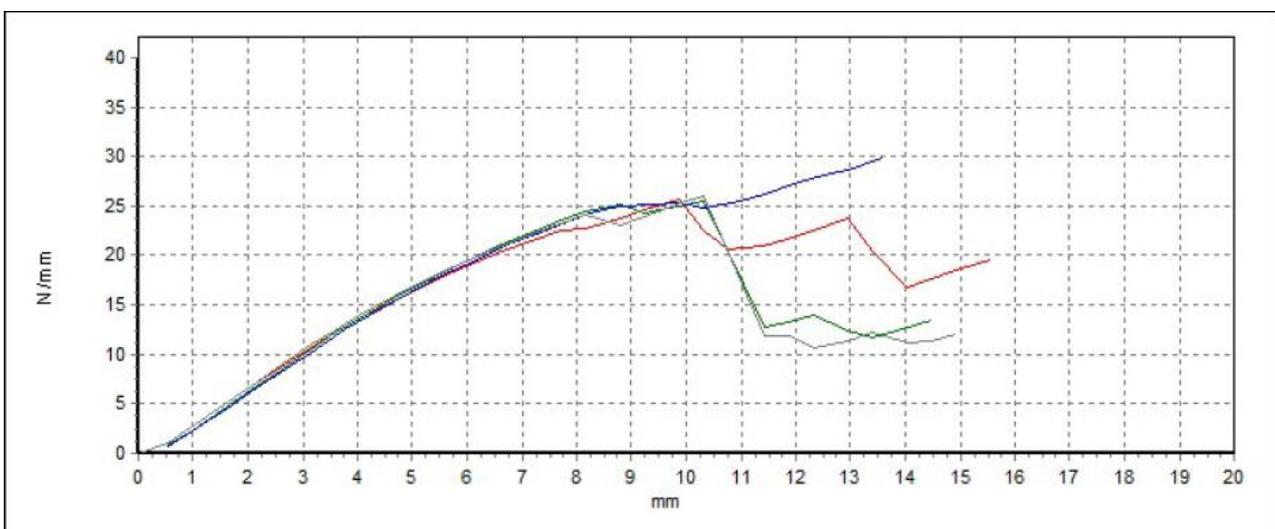
Si possono fare le stesse considerazioni della mescola 80T riguardo l'andamento delle curve nel tratto 9-15mm.



*Figura 5.3.9*

Il seguente grafico rappresenta l'andamento delle curve della mescola **90M** (Figura 5.3.10).

Si possono fare le stesse considerazioni della mescola 90T, ad eccezione della curva blu che non presenta variazioni di forza di taglio come le altre curve, ma piuttosto una sorta di appiattimento della forza di taglio nella zona 8-11mm.



*Figura 5.3.10*

Il grafico in questione rappresenta l'andamento delle curve della mescola **95T** (Figura 5.3.11). Le curve presenti sono tre invece che quattro poiché ci sono stati problemi con la produzione dei provini.

Si nota un'ottima ripetibilità nel tratto 0-11mm, ovvero fino al punto di massimo della forza di taglio applicata. Nel tratto 11-18mm si ha una discesa, per tutte le curve, dovuta probabilmente alla diminuzione della sezione resistente del provino.

Il punto di massimo della forza di taglio è ben definito per tutte le curve ed è all'incirca a 58 N/mm.

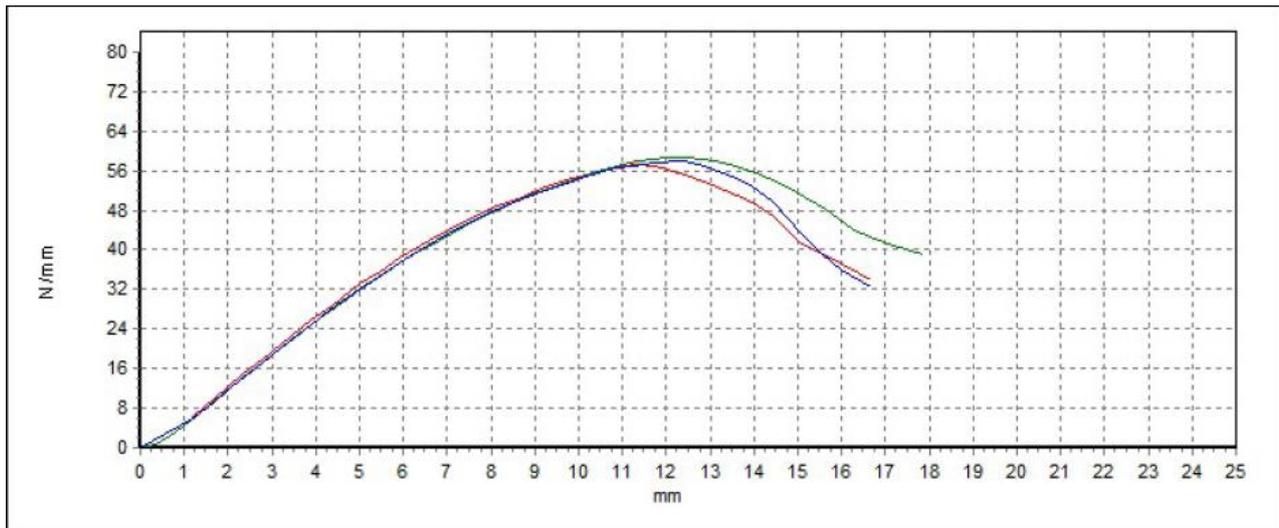


Figura 5.3.11

Il seguente grafico rappresenta l'andamento delle curve della mescola **95M** (Figura 5.3.12). È possibile fare le stesse considerazioni della mescola 90T. Il punto di massimo della forza di taglio è compreso tra 50 e 55 N/mm.

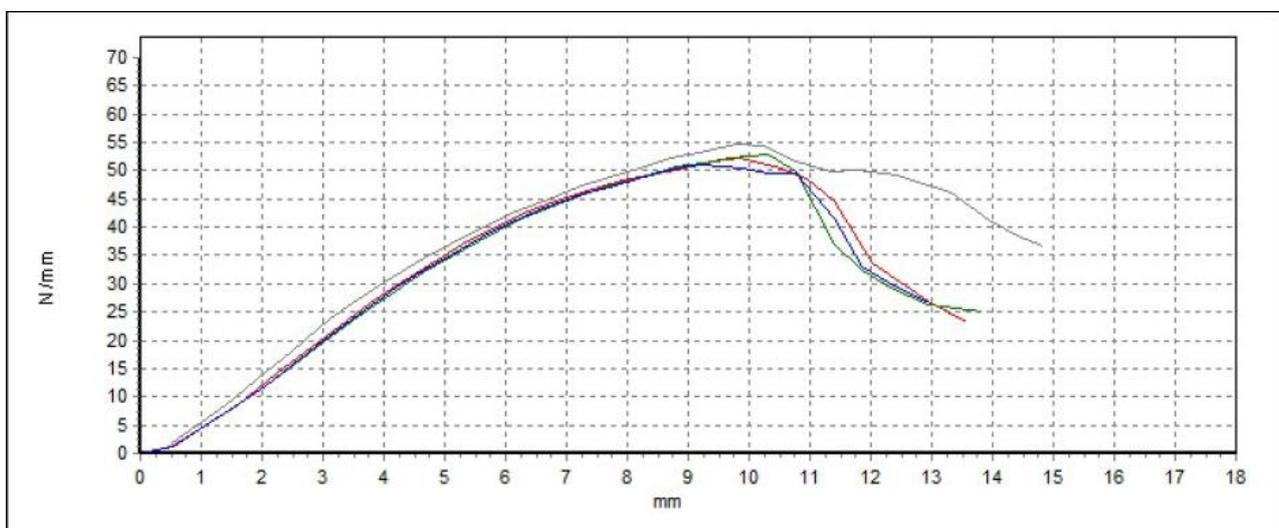
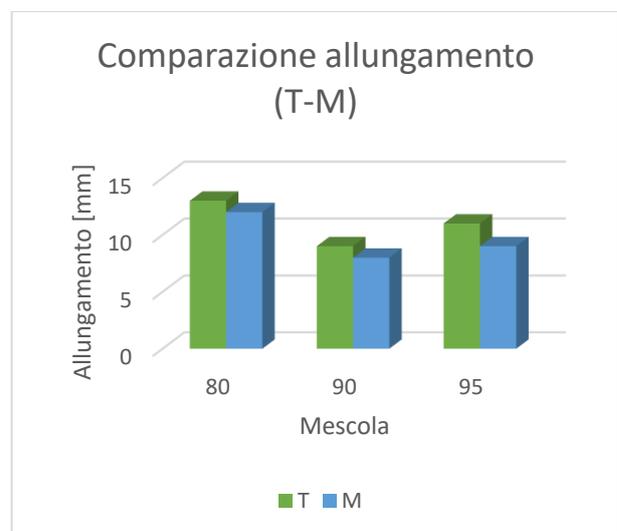
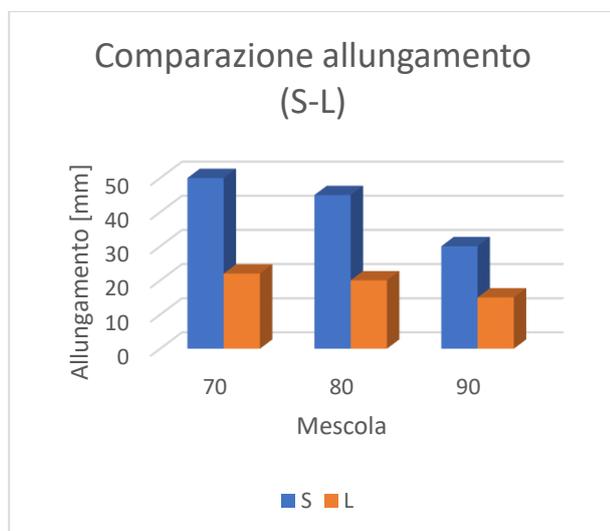
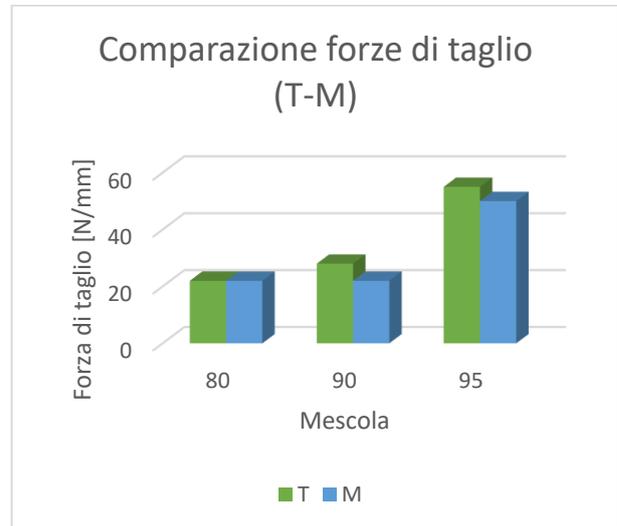
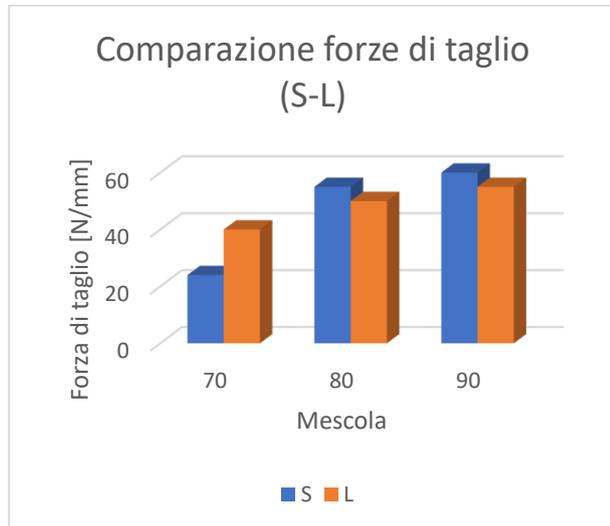


Figura 5.3.12

Con i seguenti istogrammi si vanno a comparare le mescole poliuretaniche in funzione della forza di taglio e dell'allungamento necessari al collasso dei provini.

Ogni mescola poliuretanică è stata confrontata con la sua rispettiva mescola in modo da equiparare in modo diretto i due additivi.



## 5.4) DENSITÀ

Per quanto riguarda la prova di densità è possibile analizzare la tabella 5.4.1.

Il valore per ciascuna miscela poliuretanica è una media calcolata a partire da quattro provini.

L'unità di misura è  $[g/cm^3]$ .

Si nota che la densità delle mescole poliuretaniche realizzate con ADDOLINK 1604 DW, ad eccezione del 70, è leggermente inferiore.

<b>70S</b>	<b>70L</b>
1,210	1,210
<b>80S</b>	<b>80L</b>
1,250	1,240
<b>90S</b>	<b>90L</b>
1,260	1,250
<b>80T</b>	<b>80M</b>
1,060	1,040
<b>90T</b>	<b>90M</b>
1,080	1,060
<b>95T</b>	<b>95M</b>
1,120	1,110

*Tabella 5.4.1*

## 5.5) DUREZZA

Per la prova di durezza è possibile analizzare la tabella 5.5.1.

Il valore per ciascuna mescola poliuretanicica è una media calcolata a partire da quattro provini. L'unità di misura è [shore A].

Si nota che la durezza delle mescole realizzate con ADDOLINK 1604 DW è superiore.

In modo particolare le mescole poliuretanicche: 70L,80L e 95L hanno valori di durezza maggiori rispetto alle aspettative, probabilmente è dovuto ad un'errata formulazione delle percentuali della mescola.

La differenza tende ad appiattirsi con le mescole T-M, infatti le mescole 80M e 90M hanno addirittura valori di durezza inferiori alle corrispondenti mescole realizzate con MOCA.

<b>70S</b>	<b>70L</b>
74,6	84,8
<b>80S</b>	<b>80L</b>
87,1	90,2
<b>90S</b>	<b>90L</b>
92,9	95,7
<b>80T</b>	<b>80M</b>
83,9	82,3
<b>90T</b>	<b>90M</b>
90,9	90,1
<b>95T</b>	<b>95M</b>
94,4	96,4

*Tabella 5.5.1*

## 5.6) RESISTIVITÀ

Per la prova di resistività è possibile analizzare la tabella 5.6.1.

Il valore per ciascuna mescola poliuretanicca è una media calcolata a partire da quattro provini.

L'unità di misura è [Ohm\*cm].

I valori di resistività sono paragonabili per tutte le mescole, ad eccezione delle 90 Shore A.

La mescola poliuretanicca 90S ha una resistività maggiore della 90L, e la 90M maggiore della 90T.

<b>70S</b>	<b>70L</b>
6.217e+6	1.291e+7
<b>80S</b>	<b>80L</b>
2.270e+6	4.241e+6
<b>90S</b>	<b>90L</b>
3.358e+6	2.921e+4
<b>80T</b>	<b>80M</b>
2.452e+5	4.169e+5
<b>90T</b>	<b>90M</b>
9.379e+4	1.267e+6
<b>95T</b>	<b>95M</b>
6.115e+5	7.418e+5

*Tabella 5.6.1*

## 6) CONCLUSIONI

Giunti alla conclusione di questo lavoro di tesi si possono trarre le conclusioni su quanto visto nei paragrafi precedenti.

Dalle prove effettuate si evince che l'estensore di catena chiamato ADDOLINK 1604 DW potrebbe essere considerato un valido sostituto al vecchio estensore di catena chiamato MOCA.

Tuttavia, l'ADDOLINK 1604 DW non ha predominato chiaramente sul MOCA.

Per le mescole TDI/ESTERE (S-L), la mescola L, in generale, ha avuto un comportamento migliore della S, mentre per le mescole TDI/PTMEG (T-M), in generale, la mescola T ha avuto un comportamento migliore della M.

Nonostante i risultati ottenuti, non è ancora possibile affermare con certezza se l'ADDOLINK possa rimpiazzare il MOCA, infatti bisognerà realizzare altri test.

In particolare, è necessario analizzare il comportamento delle mescole poliuretaniche L e M: ai liquidi, al calore e alla fatica.

Un test molto importante da effettuare è il COMPRESSION SET, ossia prove di sollecitazione per periodi di tempo prolungati ad una determinata temperatura.

Si realizzeranno anche mescole poliuretaniche con diverse concentrazioni di ADDOLINK 1604 DW, in modo da capire meglio il comportamento di queste ultime ed avere un buon compromesso con le caratteristiche meccaniche.

Infatti si necessita di uno studio più approfondito riguardo le percentuali di ADDOLINK 1604 DW, dato che le durezze delle mescole L si sono rivelate maggiori del previsto.

Dunque, prossimamente, questo lavoro verrà portato avanti in modo da essere pronti nel caso l'Europa bandisse definitivamente il MOCA dal mercato.

La realizzazione del reparto "ricerca e sviluppo" in un'azienda porta molti benefici, in quanto è possibile, come nel lavoro da me svolto, trovare la soluzione ad un problema o addirittura sperimentare nuovi materiali per ottenere mescole del tutto nuove.

È fondamentale quindi ricercare sempre l'innovazione al fine di progredire e portare scienza e tecnologia ad un livello sempre più alto.

## BIBLIOGRAFIA

Capodarca, F. (2018-2019). Valutazione della migrazione di sostanze chimiche in prodotti a matrice poliuretanica, destinati al contatto alimentare. Relazione di stage, Università degli studi di Camerino, Scienze e tecnologie, Camerino.

Covestro. (2020). Tratto da [www.covestro.com](http://www.covestro.com): <https://solutions.covestro.com/en>

Norma ISO 1853. (2012, Novembre).

Norma ISO 23529. (2011, Giugno).

Norma ISO 2781. (2018, Giugno).

Norma ISO 34-1. (2015, Novembre).

Norma ISO 37. (2011, Dicembre).

Norma ISO 48-4. (2019, Febbraio).

Norma ISO 604. (2008, Ottobre).

Società Gibitre Instruments. (s.d.).

[https://www.gibitre.it/page\\_sin.php?ProdottoN=Dinamo&from=ricerca\\_norme](https://www.gibitre.it/page_sin.php?ProdottoN=Dinamo&from=ricerca_norme). Tratto da Sito Web Società Gibitre Instruments: <https://www.gibitre.it/>