

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

- Sede di Forlì -

*CORSO DI LAUREA*  
IN INGEGNERIA MECCANICA  
Classe L - 9

ELABORATO FINALE DI LAUREA  
In TECNOLOGIA MECCANICA A

Titolo dell'elaborato:  
**CARATTERIZZAZIONE DI PROFILI ESTRUSI**  
**IN LEGA DI MAGNESIO ZM21**  
**CARICATA CON CARBURO DI SILICIO**

CANDIDATO

Luca Moretti

RELATORE

Prof. Lorenzo Donati

CORRELATORE

Ing. Claudia Bandini

Anno Accademico 2012/2013

Sessione II



“Non è perché le cose sono difficili che non osiamo farle,  
è perché non osiamo farle che diventano difficili”  
(Seneca)



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	1
<b>CAPITOLO 1: LEGE DI MAGNESIO</b> .....	3
1.1 MAGNESIO PURO.....	3
1.2 LEGHE DI MAGNESIO.....	4
1.3 VANTAGGI – SVANTAGGI.....	8
1.4 LEGA ZM21.....	9
1.5 LEGHE DI MAGNESIO CARICATE.....	10
<b>CAPITOLO 2: PRODUZIONE DI ESTRUSI IN ZM21+SiC</b> .....	15
<b>CAPITOLO 3: CARATTERIZZAZIONE DELLA LEGA ZM21+SiC</b> .....	21
3.1 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE.....	21
3.1.1 Prova di compressione.....	21
3.1.2 Prova di trazione.....	22
3.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA.....	24
3.2.1 Pressa.....	24
3.2.2 Estensometro.....	25
3.2.3 Estensimetri.....	26
3.3 PROVE SPERIMENTALI.....	26
3.3.1 Metallografie.....	26
3.3.2 Calibrazione a compressione.....	28
3.3.3 Trazione.....	51
3.3.4 Confronto dei risultati.....	73
<b>CONCLUSIONI</b> .....	79
<b>APPENDICE A: Scheda tecnica estensimetri</b> .....	81
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	83



# **INTRODUZIONE**

L'attività sperimentale presentata in questo elaborato è volta a conoscere le proprietà meccaniche di una lega di magnesio rinforzata con particelle ceramiche (Carburo di silicio SiC), queste leghe vengono commercialmente definite composti a matrice metallica o con la sigla inglese MMC (metal matrix composite).

L'interesse crescente verso le leghe di magnesio è volto a sfruttarne la minor densità rispetto all'alluminio, dato significativo in ambito automobilistico considerando la necessità di ridurre pesi e consumi. Le problematiche da affrontare sono tuttavia legate alle caratteristiche meccaniche delle leghe di magnesio che presentano:

- minor modulo elastico,
- tensioni di snervamento a compressione inferiore nei confronti della tensione di snervamento a trazione
- costi di produzione per processi di estrusione generalmente più elevati.

Sulle problematiche appena affrontate si ritiene possibile intervenire mediante l'utilizzo di leghe caricate, per ottenere incrementi del modulo di Young e delle proprietà a compressione. Per questi motivi è stata prodotta una lega di magnesio caricata con carburo di silicio che verrà caratterizzata per verificare i possibili miglioramenti delle caratteristiche meccaniche.

La lega caricata è stata prodotta presso l'istituto di ricerca Technion in Israele e successivamente deformata plasticamente tramite processo di estrusione presso l'azienda ALUBIN che ha poi fornito il materiale sotto forma di barre a sezione circolare di diametro 20mm. Le barre sono state tornite nei laboratori della Facoltà di Ingegneria con sede a Bologna per ottenere i provini. I provini così ottenuti sono stati sottoposti a prove di trazione e compressione presso i laboratori della Seconda Facoltà di Ingegneria con sede a Forlì.

Scopo del lavoro sarà pertanto il confronto fra le proprietà meccaniche del materiale base ZM21 rispetto al materiale prodotto in Israele con rinforzo di carburo di silicio, con

particolare riferimento alle proprietà a trazione, a compressione e alla distribuzione di particelle nella matrice (analisi metallografica).

Nel CAPITOLO 1 verrà presentata una panoramica sulla diffusione, reperibilità e sulle caratteristiche meccaniche del magnesio. Verranno approfonditi gli utilizzi, le proprietà delle sue leghe ed elencati i principali elementi leganti utilizzabili. La lega ZM21 è stata trattata separatamente per riportarne più approfonditamente le caratteristiche. Successivamente sono state trattate le leghe caricate ed i motivi che ne accompagnano sviluppo e ricerca.

Nel CAPITOLO 2 verrà trattato il metodo di produzione della lega caricata e delle billette con attenzione agli accorgimenti seguiti, le problematiche riscontrate durante la lavorazione, i risultati ottenuti ed i possibili miglioramenti. Trattato in fine il processo di estrusione, utilizzato per produrre le barre.

Nel CAPITOLO 3 verrà ampiamente esposto il lavoro sperimentale partendo dalla descrizione delle attrezzature e della strumentazione utilizzati. Trattate inoltre le motivazioni per le quali sono state eseguite queste prove. La maggior parte del capitolo sarà comunque riservata a esporre i risultati relativi alle singole prove e spiegare i risultati ottenuti. Nella parte finale del capitolo saranno confrontati e commentati i risultati delle varie prove anche attraverso grafici per facilitare la lettura dei dati ottenuti.



# CAPITOLO 1

## LEGHE DI MAGNESIO

### 1.1 MAGNESIO PURO

Il magnesio è uno tra i metalli più leggeri, il suo peso specifico è infatti attorno a  $1,7\text{g/cm}^3$ , inferiore anche a quello dell'alluminio ( $2,7\text{g/cm}^3$ ). La disponibilità è elevatissima, grazie alla sua presenza in più di sessanta minerali, anche se solo pochi di questi sono di interesse industriale, i principali sono la dolomite e la magnesite, è inoltre il terzo elemento per abbondanza disciolto nell'acqua marina da cui viene estratto tramite un processo elettrolitico, motivo per cui è considerato inesauribile. [9]

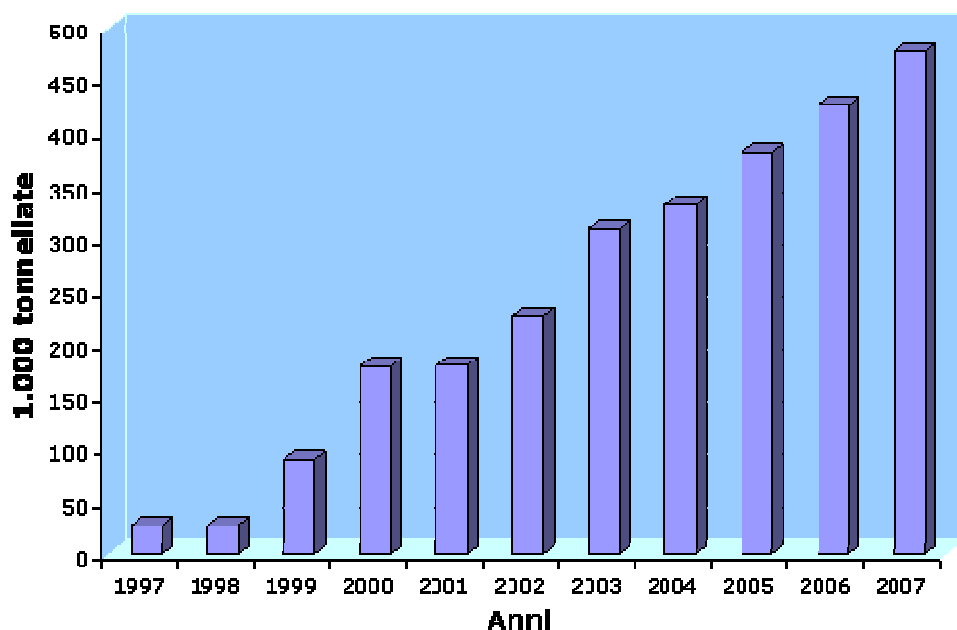


Figura 1.1: Consumo annuo di magnesio nel mondo<sup>[11]</sup>.

Nonostante l'eccezionale disponibilità in natura, ancora, il magnesio è molto meno utilizzato rispetto all'alluminio, ad esempio nel 2007 mentre il consumo di magnesio non raggiungeva le 500'000 tonnellate, per l'alluminio si superavano le 2'000'000 di tonnellate annue.

La struttura cristallina del magnesio a temperatura ambiente è HCP, cioè la cella unitaria ha forma esagonale compatta; dato che la struttura cristallina influenza la duttilità, il magnesio non ha quindi una buona plasticità con un allungamento percentuale a rottura attorno al 10%.

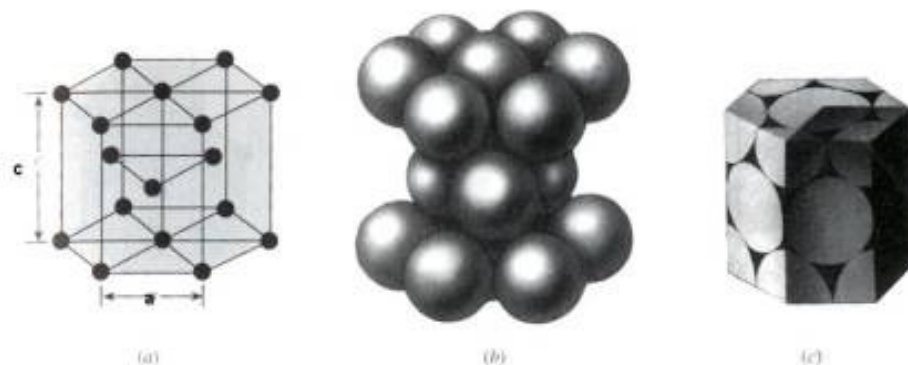


Figura 1.2: Struttura cristallina HCP<sup>[10]</sup>.

Il magnesio puro non è considerato idoneo ad un utilizzo strutturale a causa di alcuni aspetti negativi tra cui la bassa resistenza meccanica che si attesta sui 190MPa, è facilmente infiammabile se entra a contatto con l'ossigeno soprattutto se in forma di trucioli o polvere in presenza di elevate temperature, ha una buona fusibilità ma con processi che richiedono particolari accorgimenti, da eseguirsi in assenza di ossigeno.

Dagli elementi forniti è evidente che in forma pura non presenta particolari interessi per la produzione di componenti strutturali, tuttavia aggiungendo degli elementi leganti è possibile modificarne radicalmente il comportamento.

## 1.2 LEGHE DI MAGNESIO

I principali elementi leganti che vengono utilizzati per formare le leghe di magnesio sono: Alluminio, Zinco, Manganese e Metalli delle terre rare (Scandio Ittrio e lantanidi). Questi elementi contribuiscono a modificare le caratteristiche e le proprietà fisiche, chimiche e meccaniche del materiale e permettono quindi di ottenere leghe per diverse applicazioni.

L'Alluminio, che viene indicato nel nome della lega con la lettera A, è utilizzato per migliorare la colabilità e la resistenza meccanica, la durezza e la resistenza alla corrosione causa tuttavia anche l'aumento della fragilità, le leghe che contengono alluminio sono adatte ad essere lavorate per deformazione plastica o per colata; Zinco, indicato con la lettera Z, in lega aumenta la resistenza a trazione e migliora la resilienza (quantità di

energia che il materiale può assorbire deformandosi elasticamente) e la duttilità (capacità di deformarsi plasticamente prima di giungere a rottura); Manganese, indicato con la lettera M contrasta la corrosione e in fase di liquido serve a ridurre la solubilità del ferro e aumenta la malleabilità; Zirconio, indicato con la lettera K affina il grano; Torio, indicato con la lettera H, affina il grano e aggiunto a leghe magnesio-zinco aumenta la resistenza alle altre temperature; Terre Rare indicate con la lettera E, aumentano la resistenza a caldo; Rame indicato con la lettera C, aumenta la fluidità allo stato liquido; Argento indicato con la lettera Q, aggiunto alle leghe di magnesio-terre rare ne aumenta considerevolmente la resistenza a tutte le temperature; Scandio, migliora la resistenza allo scorrimento viscoso quando forma precipitati, mentre, se entra solo in soluzione aumenta il punto di fusione della lega; Litio indicato con la lettera L, conferisce al magnesio caratteristiche meccaniche inferiori ma permette di raggiungere densità di 1,3 grammi al centimetro cubo; Calcio, diminuisce la densità. [6]

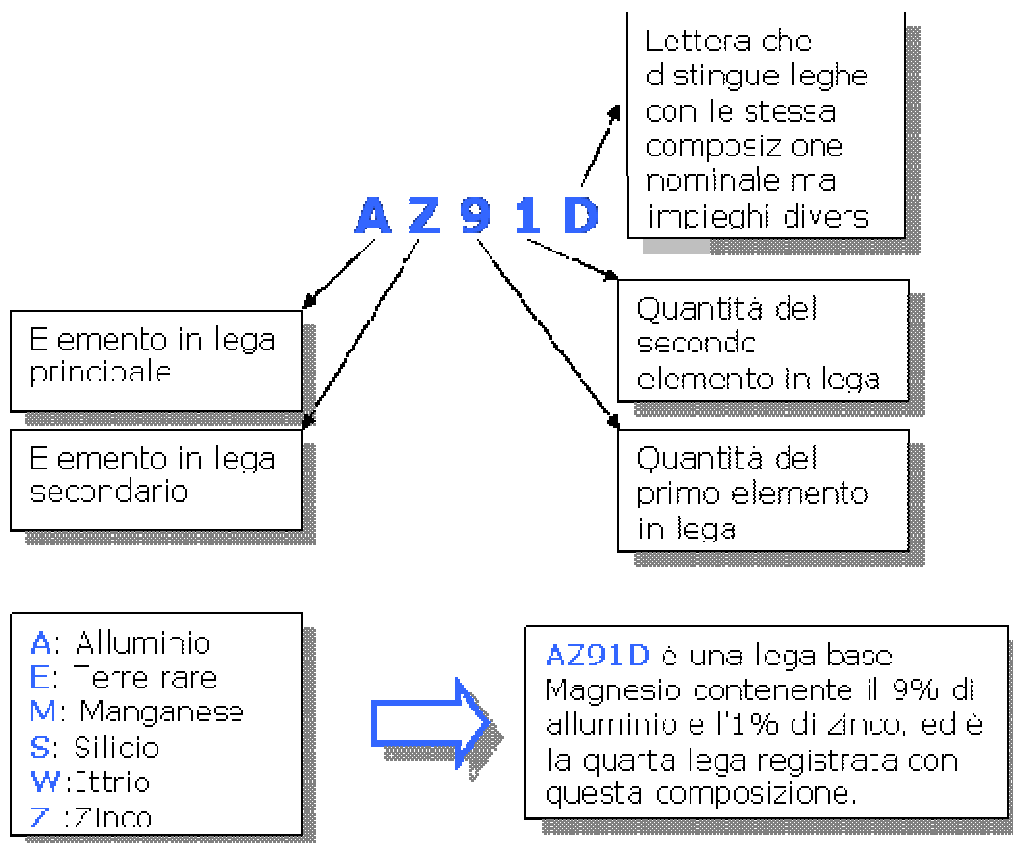


Figura 1.3: Nomenclatura leghe di magnesio<sup>[6]</sup>.

Le leghe di magnesio vengono indicate con due lettere relative ai due elementi di lega presenti in maggiore tenore di peso e ordinate in senso decrescente; di seguito vengono indicate le rispettive percentuali. Una lettera ulteriore definisce leghe con la medesima composizione nominale ma con diversi impieghi.

Per esempio la lega AZ91D, è una delle leghe più usate in presso-fusione ed è una lega di magnesio in cui sono presenti in lega l'alluminio e lo zinco rispettivamente con una concentrazione del 9% e dell'1% mentre l'ultima lettera identifica leghe con la stessa composizione nominale ma con impieghi diversi.<sup>[5]</sup>

Le leghe di magnesio sono usate per un'ampia varietà di applicazioni strutturali, generalmente le leghe con una bassa quantità di alluminio sono usate per la produzione di pezzi lavorati plasticamente, mentre quelle a più alta percentuale sono principalmente utilizzate per la colata.

La maggior parte delle applicazioni delle leghe di magnesio adoperano la lega AZ91, lega da pressofusione, la quale presenta una resistenza insufficiente a creep oltre i 130°C. Sono tuttavia disponibili leghe che mostrano temperature di servizio fino a oltre 300°C come mostrato nella figura 1.4.

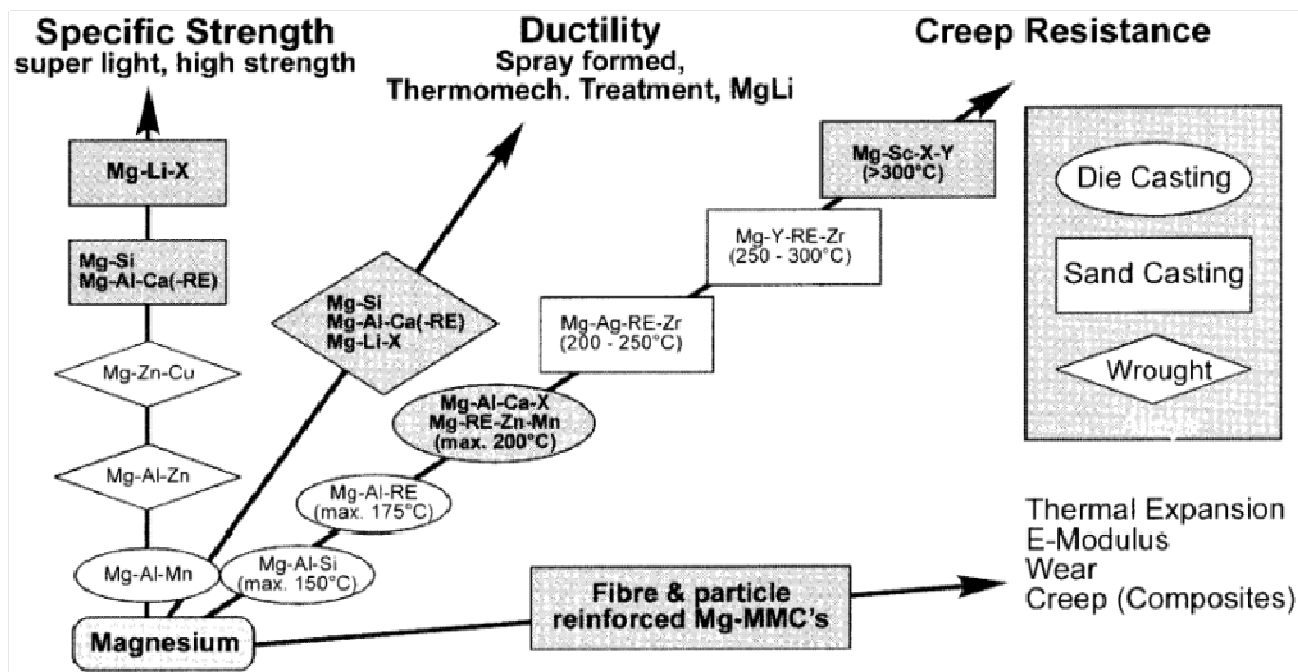


Figura 1.4: Correlazione tra composizione chimica e proprietà meccaniche<sup>[4]</sup>.

Uno dei motivi che hanno contribuito al veloce affermarsi del magnesio sul mercato come componente strutturale, è stato lo sviluppo del processo di pressocolata, particolarmente dopo i primi anni '80 quando si scoprì la particolare resistenza alla corrosione per leghe a elevata purezza.

L'elevata purezza raggiungibile per queste leghe è ottenuta riducendo le impurità di nichel ( $<10\text{ppm}$ ) ferro ( $<0.017\%$ ) e rame ( $<300\text{ppm}$ ), inserendo ad esempio il manganese tra gli elementi leganti, è possibile limitare la solubilità del ferro, questi accorgimenti sono necessari perché il magnesio ha un potenziale di riduzione fortemente negativo, quando viene a contatto con un metallo più nobile in presenza di un elettrolita, tra i due si genera una coppia galvanica (passaggio di elettroni) che dà luogo alla corrosione del magnesio<sup>[3]</sup>.

La resistenza alla corrosione ottenuta da queste leghe è migliore rispetto a quella di molte leghe di acciaio e di alluminio e resistono bene anche all'ambiente marino, considerato uno dei più aggressivi.

Le leghe di magnesio possono essere inoltre lavorate per deformazione plastica a caldo come forgiatura, laminazione, ed estrusione come per la lega oggetto di studio. Le leghe maggiormente utilizzate per deformazione plastica sono: AZ31, AZ61A, AZ80A, ZK60A, ZM21<sup>[7]</sup>.

Le leghe di magnesio sono utilizzate in diversi settori:

Automobilistico:

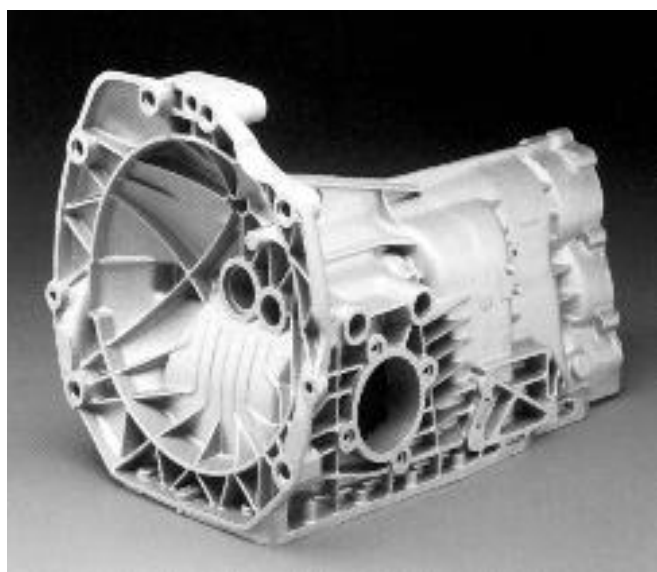


Figura 1.5: a)cerchio , b)scatola del cambio<sup>[14]</sup>.

Fotografico:



Sportivo:



Fig 1.6: a) corpo macchina fotografica canon EOS 5D MARK III b) telaio pattino rollerblade spark 84w magnesio.

### 1.3 VANTAGGI - SVANTAGGI

Le proprietà più interessanti delle leghe di magnesio oltre alla densità e la resistenza alla corrosione sono: il migliore rapporto resistenza-peso tra tutti i metalli di più comune uso strutturale, l'eccezionale stabilità dimensionale e l'alta resistenza a impatto e ad ammaccature, deformandosi, è in grado di assorbire una grande quantità di energia. Le leghe di magnesio hanno inoltre eccellenti capacità di assorbimento vibrazionale e per la loro bassa inerzia, rappresentano una valida scelta per le parti meccaniche che subiscono frequenti e improvvisi cambi di direzione del moto ad alta velocità.

I principali svantaggi sono dovuti alle limitate proprietà meccaniche a temperature elevate ed i maggiori costi industriali necessari per evitare il contatto tra il magnesio fuso e l'ossigeno, le attrezzature devono essere quindi immerse in atmosfera controllata, per questo motivo, anche se la lavorazione del magnesio non necessita di particolari macchinari ad uso esclusivo i costi da sostenere per rendere sicuro il processo risultano maggiori rispetto ad esempio all'alluminio.

Il processo di produzione maggiormente utilizzato per produrre componenti in magnesio è la pressocolata, questo processo garantisce una produttività elevata in quanto il magnesio possiede un'ottima conduzione termica ed un basso calore specifico volumico (inferiore rispetto all'alluminio), queste due caratteristiche permettono incrementi nella velocità di produzione rispetto all'alluminio fino al 50%, ed anche una maggiore durata degli stampi date le basse temperature di esercizio. Questo processo possiede anche degli

svantaggi, legati alla presenza di porosità dovuta al moto vorticoso della lega in ingresso nello stampo ed alla bassa resistenza a creep dei componenti così prodotti a causa della grana fine ottenibile.

Il magnesio può essere inoltre totalmente riciclato senza che vi sia uno scadimento delle proprietà fisiche e meccaniche e l'energia necessaria per il riciclo è inferiore a quella necessaria per il riciclo degli altri metalli e pari al 4% dell'energia necessaria per la produzione della lega a partire dal minerale.

#### 1.4 LEGA ZM21

La lega di magnesio utilizzata per le prove che si andranno a condurre è la ZM21, come spiegato nel paragrafo 1.1 il nome della lega indica gli elementi leganti maggiormente presenti e le rispettive percentuali, in questo caso sono quindi zinco e manganese.

Le specifiche di questa lega sono:

Zinco:	1.75%<Zn<2.30%
Manganese:	0.6%<Mn<1.6%
Densità:	1.78g/cm <sup>3</sup>
Resistenza a trazione, rottura:	230-245MPa
Resistenza a trazione, snervamento:	150-160MPa
Resistenza a compressione, snervamento	93MPa
Allungamento a rottura:	8-10%
Modulo di elasticità:	45GPa
Coefficiente di poisson:	0.35 <sup>[13]</sup>

La lega ZM21 presenta una bassa tensione di flusso plastico ed una elevata duttilità, caratteristiche che la rendono ben lavorabile per deformazione plastica, conservando però buone proprietà meccaniche.

Il prezzo dell'alluminio è circa 2500\$/ton mentre il magnesio 4000\$/ton a parità di volume tuttavia la differenza di prezzo si riduce al 7% (la densità del magnesio è del 30% inferiore rispetto alla densità dell'alluminio). Il costo totale del profilo estruso è fortemente legato alla velocità di estrusione con costi di utilizzo della pressa di 3000€/h

in questo senso la lega ZM21 fornisce ottimi risultati, apprezzabili se confrontato con altre leghe. Le leghe di alluminio permettono velocità di estrusione molto elevate che si attestano su 30-40 m/min, una lega di magnesio come la AZ31 permette velocità di estrusione molto basse, 5-6 m/min questo comporta dei costi di produzione molto elevati dovuti ai maggiori tempi di utilizzo della pressa per unità di lunghezza estrusa, la lega ZM21 permette di avvicinare la produttività delle leghe di magnesio a quella delle leghe di alluminio riducendo quindi i costi e garantendo al magnesio una maggiore competitività.

### **1.5 LEGHE DI MAGNESIO CARICATE (MMC)**

Per migliorare le proprietà meccaniche delle leghe di magnesio, significativi sforzi sono stati fatti per sviluppare leghe di magnesio caricate (MMCs, metal matrix composites), le quali presentano basso peso specifico ma superiori proprietà meccaniche tra cui resistenza meccanica, rigidità e resistenza a creep. Per la produzione di queste leghe caricate vengono utilizzate particelle ceramiche che oltre ai vantaggi già elencati presentano anche svantaggi come la minor duttilità, per questo motivo l'utilizzo di queste leghe è ancora piuttosto limitato, continua tuttavia la ricerca per riuscire a ottenere leghe per le quali all'incremento di resistenza sia legata una minor riduzione di duttilità.

Le particelle ceramiche maggiormente utilizzate per questo scopo sono  $Al_2O_3$  (ossido di alluminio) e SiC (carburo di silicio). Le particelle di SiC hanno elevata densità e durezza accompagnata da notevole fragilità, la temperatura di fusione è  $2750^\circ C$ , estremamente più alte rispetto ai  $650^\circ C$  a cui fonde il magnesio, per questo motivo le particelle ceramiche devono essere aggiunte in forma solida all'interno della lega allo stato liquido ed in fase di solidificazione si vanno ad inserire in posizione intergranulare. Da un lato, le particelle garantiscono un incremento della durezza e della resistenza meccanica della lega dall'altro tuttavia, le discontinuità nella matrice dovute alla presenza di particelle tra i grani genera effetti d'intaglio che possono essere punti in cui si generano incrementi di tensione localizzata da cui le fratture si possono innescare.

Un miglioramento in questo senso si è ottenuto concentrando la ricerca sul tipo di forma e sulle dimensioni delle particelle che si vanno ad inserire, la riduzione nelle dimensioni



delle particelle nell'ordine di grandezza di  $10^{-6}$ m migliora notevolmente la resistenza permettendo di ottenere un materiale più omogeneo e dalle proprietà meccaniche uniche.

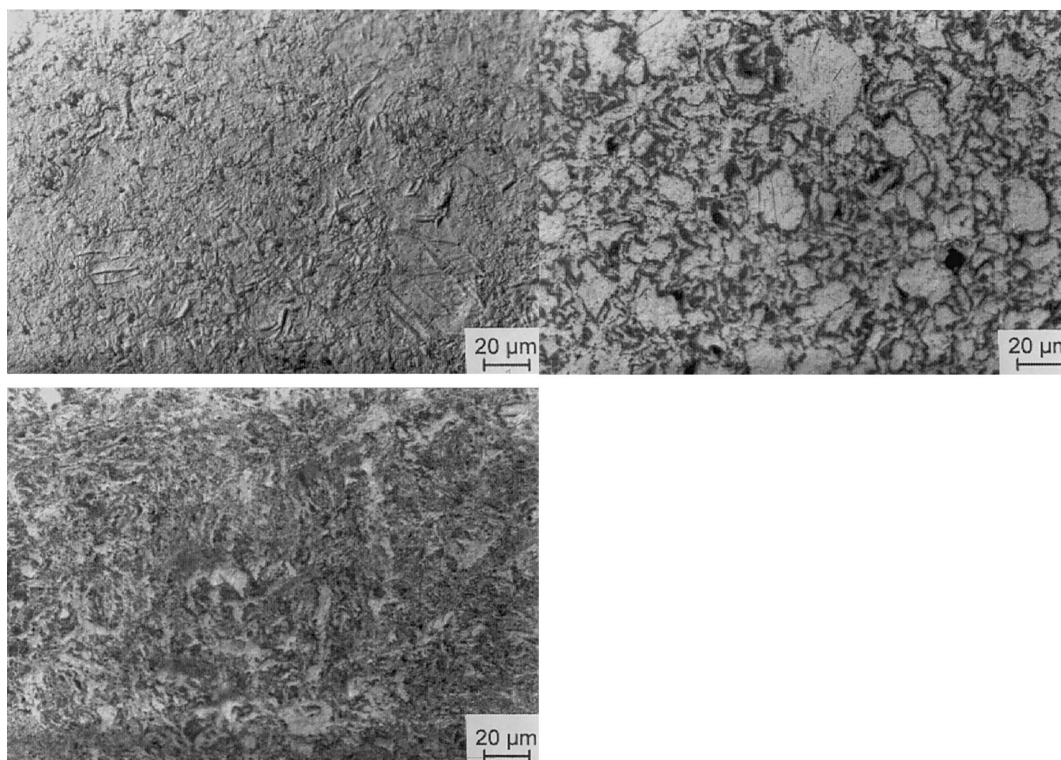


Figura 1.7: Metallografie a) polvere di magnesio 40μm estrusa b) polvere di magnesio 40μm mescolata con SiC estrusa c) polvere di magnesio più fine mescolata con SiC ed estrusa<sup>[1]</sup>.

Anche la forma delle particelle modifica la resistenza del materiale, forme tondeggianti ad esempio riducono l'effetto d'intaglio e rendono più sfavorevole la formazione e la propagazione di fratture.

Le particelle ceramiche presenti in lega si vanno a posizionare lungo il bordo dei grani, se questi hanno grandi dimensioni come in fig.1.7b, il materiale risulta localmente disomogeneo e si evidenziano grandi aree (sempre nell'ordine dei micron) in cui è assente il rinforzo. In presenza di grani più fini quindi il materiale risulta più omogeneo come mostrato in fig.1.7c, la grana più fine garantisce inoltre un incremento della tensione di snervamento e di rottura, anche in questo caso accompagnato da una piccola riduzione dell'allungamento a rottura come si può constatare dalla figura 1.8a

Le variazioni di resistenza meccanica e duttilità nelle tre leghe delle quali sono riportate le metallografie in fig.1.7 risultano evidenti in figura 1.8, a temperatura ambiente (fig.1.8a) la variazione della composizione comporta per le leghe caricate una riduzione di duttilità tale da comportare la rottura quasi in assenza di deformazione plastica causando

una rottura maggiormente fragile anche se per carichi più elevati, a fronte di un incremento della tensione di rottura del 20%, la riduzione della duttilità è di circa il 50%.

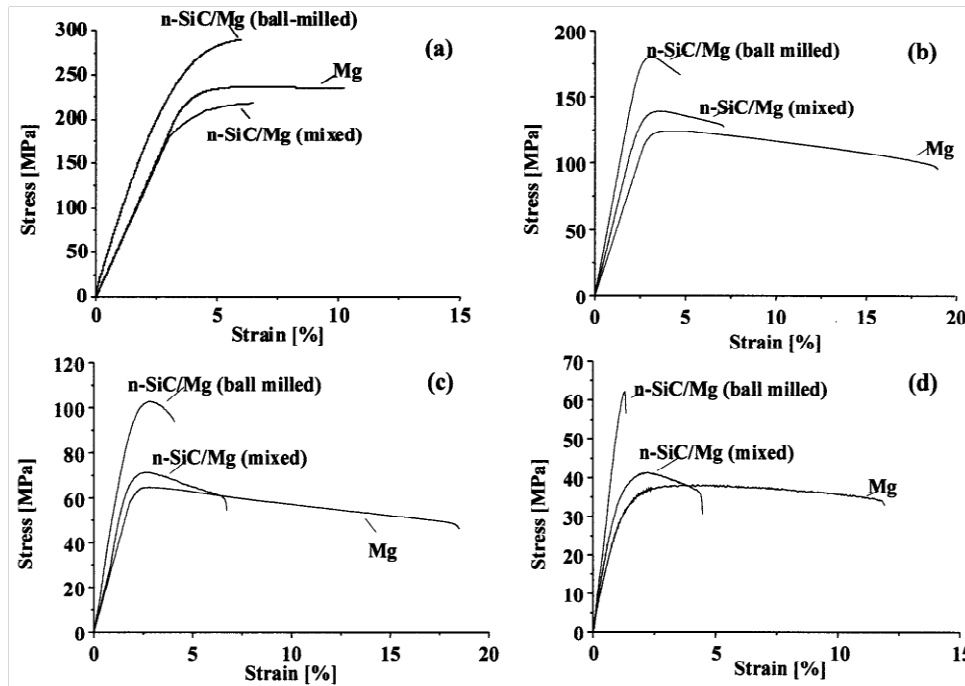


Figura 1.8: Grafici stress-strain Mg e Mg+SiC a) temperatura ambiente, b) 100°C, c) 200°C d) 300°C <sup>[1]</sup>.

All'aumentare della temperatura tuttavia la deformazione a rottura del magnesio puro aumenta fino a oltre il 15% mentre per le leghe caricate si ha una riduzione ulteriore, anche la rottura in alcuni casi avviene a tensioni inferiori per le leghe caricate rispetto a quanto accade al magnesio puro, come mostrano le figure 1.8c,d.

Fino ad ora sono state descritte le caratteristiche di una lega caricata prodotta mescolando polveri di magnesio e di SiC, un'altra tecnica per produrre queste leghe consiste nel disperdere le particelle ceramiche all'interno della lega di magnesio allo stato liquido, in questo caso la dispersione può essere eseguita in due modi, utilizzando un mescolatore oppure una sonda. In entrambi i casi la lega deve essere colata in un recipiente riscaldato, all'interno del quale deve essere aggiunta la polvere ceramica, da questo punto le tecniche possibili sono due: inserire un mescolatore a pale che generando un moto vorticoso mescola la lega e disperde le particelle; oppure inserire una sonda che genera vibrazioni ultrasoniche producendo cavitazione, questo fenomeno è estremamente localizzato e violento e consente di disgregare agglomerati di particelle e di garantire una pulizia superficiale delle stesse migliorandone la bagnabilità. Anche in questi casi le particelle si andranno ad inserire negli interstizi tra i grani come dimostrano le

metallografie di fig.1.9 ed apportando gli stessi miglioramenti riscontrati per le leghe ottenute da polvere.

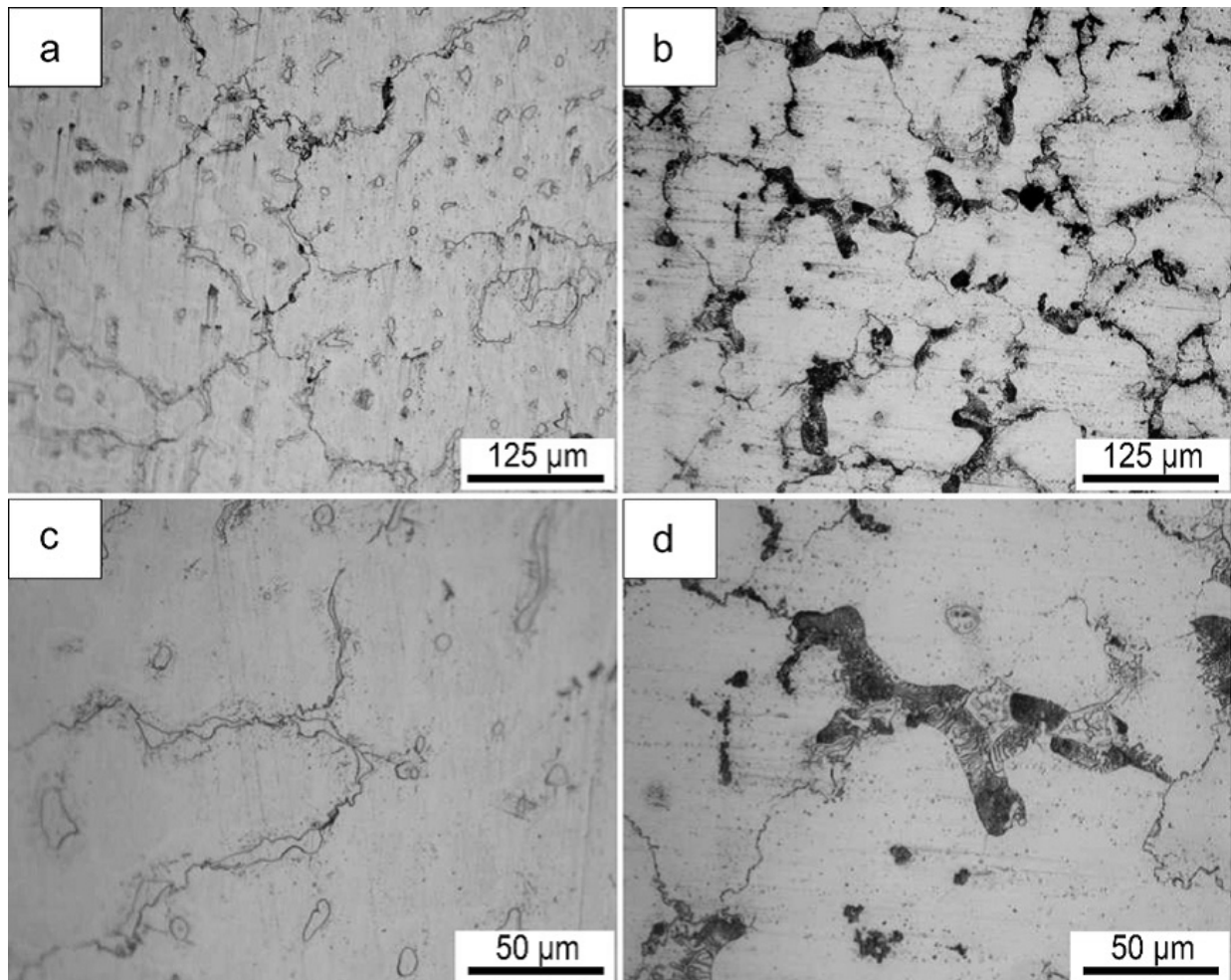


Figura 1.9: a,c) Lega AZ91 b,d) Lega AZ91 caricata con carburo di silicio<sup>[2]</sup>.



## CAPITOLO 2

### **PRODUZIONE DI ESTRUSI IN ZM21+SiC**

Per produrre la lega caricata è stato utilizzato il procedimento di Stir-Casting che consiste nel mescolamento della lega fusa (ZM21) con le particelle di SiC. Non è stato possibile ottenere informazioni relative ai parametri dei processi di produzione della lega, come temperatura e tempo di fusione, tempo e temperatura di mescolamento per la dispersione del SiC, tempo e modo di raffreddamento. È tuttavia possibile descrivere i risultati ottenuti dai processi utilizzati.

Lo Stir-Casting prevede la colata della lega allo stato liquido in uno stampo riscaldato, l'inserimento di un mescolatore e delle particelle da disperdere nella lega. Il tempo di mescolamento e la velocità di rotazione del mescolatore sono determinanti per garantire una buona dispersione delle particelle; durante questo tempo la lega deve essere mantenuta in temperatura per garantire una viscosità non troppo elevata in modo da permettere la rotazione del mescolatore, questo accorgimento garantisce una buona distribuzione delle particelle all'interno della lega fusa.

Il procedimento possiede tuttavia anche aspetti negativi: a causa del moto vorticoso impresso dal mescolatore infatti, nel liquido vengono a formarsi inclusioni di gas, che possono permanere anche una volta raggiunta la solidificazione sotto forma di cavità. Un altro aspetto negativo è strettamente legato al primo: l'elevata reattività del magnesio a contatto con l'ossigeno, comporta la formazione di ossidi di magnesio, caratterizzati da maggior durezza e fragilità.

Queste due problematiche possono essere enormemente ridotte eseguendo il procedimento di mescolamento in un contenitore sotto vuoto, procedimento tuttavia non utilizzato per il materiale in esame, come è possibile constatare anche osservando le billette di figura 2.1.



Figura 2.1: Billette in lega ZM21+SiC, evidenti ossidi e cavità.

Come primo tentativo la billetta così ottenuta è stata posizionata in pressa ed estrusa dalla matrice di Fig.2.2 ad una temperatura di  $450^{\circ}$ . Per scaldare la billetta prima dell'estrusione è stato utilizzato un forno elettrico. La billetta è stata avvolta da una lamiera, come mostra la fig.2.3 per proteggere la superficie esterna ed evitare possibili combustioni dovute alla esposizione del materiale ad elevate temperature



Figura 2.2: Matrice a ponte<sup>1</sup> per l'estrusione del primo profilo a)Matrice b)Mandrino.

---

<sup>1</sup> La matrice a ponte serve per realizzare profili tubolari che necessitano di un componente per creare l'esterno del profilo (matrice) e di un componente per creare il profilo interno (mandrino) il metallo durante l'estrusione attraversa prima il mandrino e poi la matrice.



Figura 2.3: Particolare protezione billetta per il riscaldamento in forno.

Il profilo estruso ottenuto dalla billetta formata e preparata con i procedimenti sopra riportati mostra evidenti difetti dovuti alla presenza di ossidi e cavità. In queste condizioni non sarebbe possibile alcun tipo di utilizzo. Successivamente, è stata estrusa per confronto una billetta in ZM21 non caricato, le differenze tra i profili in ZM21 e ZM21+SiC sono mostrati in Fig 2.4

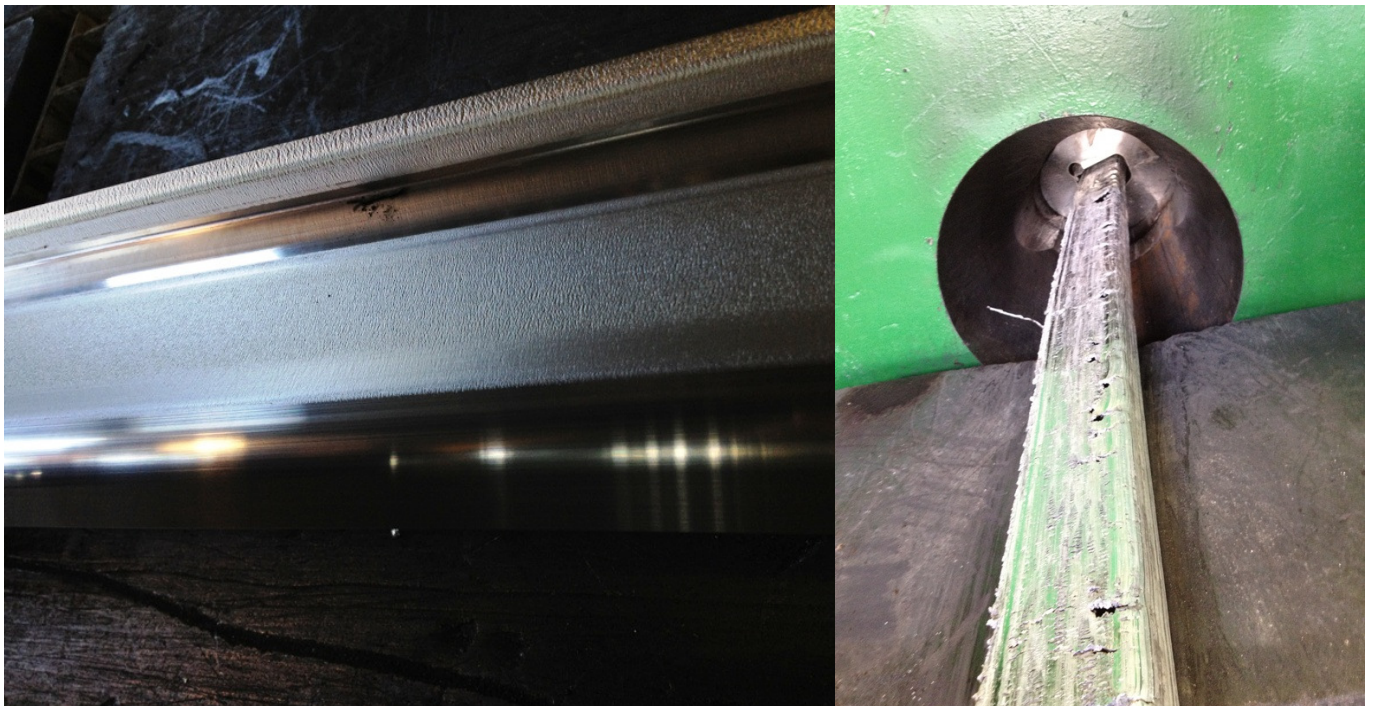


Figura 2.4: Profilo estruso a)ZM21 b)ZM21+SiC

Visti gli scarsi risultati ottenuti nel primo tentativo, per ridurre le porosità interne è stata eseguita una ricalcatura a caldo sulla billetta grezza. Quest'ultima è stata portata a 450° e pressata contro una matrice chiusa, la billetta così ottenuta mostra una riduzione di altezza del 30% portando alla chiusura delle cavità lasciate dal processo di stir-casting. Rimettendo in pressa la matrice a ponte e riportando la billetta a temperatura, è stata eseguita l'estrusione. L'aspetto del profilo così ottenuto (fig.2.5) risulta molto più simile a quello ottenuto dall'estrusione della lega non caricata (fig.2.4a).



Figura 2.5: Profilo estruso da billetta precedentemente compressa.

Le barre  $\phi 20$  da cui sono stati ottenuti i provini da sottoporre alle prove di trazione e compressione, sono state prodotte comprimendo la billetta contro una matrice ad una sola luce. L'operazione di ricalcatura ha evitato la presenza di cavità all'interno del materiale, le quali non sono state infatti riscontrate nell'analisi dei provini rotti. Gli ossidi tuttavia sono rimasti all'interno del materiale venendo semplicemente modificati nella forma in fase di estrusione. Alcuni provini mostravano già superficialmente la presenza di ossidi, una volta terminate le prove di trazione e compressione tuttavia, sono apparsi altri difetti su molti dei provini, specialmente quelli sottoposti a trazione.



I provini con le inclusioni di maggiori dimensioni (fino al 50% dell'area resistente) hanno evidenziato resistenze meccaniche estremamente basse, pari a circa il 50% rispetto a quelle ottenute dai provini con inclusioni di piccole dimensioni.



# **CAPITOLO 3**

## **CARATTERIZZAZIONE DELLA LEGA ZM21+SiC**

### **3.1 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE**

Le prove di caratterizzazione di un materiale servono per indagare tre categorie di proprietà: proprietà tecnologiche, proprietà meccaniche e proprietà fisiche.

Proprietà tecnologiche: duttilità, malleabilità, truciolabilità, saldabilità, fusibilità, temprabilità, colabilità.

Proprietà fisiche: peso specifico, punto di fusione, dilatazione termica, calore specifico, viscosità, conducibilità termica ed elettrica, caratteristiche ottiche e acustiche

Proprietà meccaniche: durezza, resistenza, tenacità, usura.

Il nostro interesse riguardo al materiale in esame è di indagare la resistenza meccanica, e le prove che si andranno a condurre saranno: trazione e compressione.

#### **3.1.1 Prova di compressione**

La prova di compressione è una prova distruttiva che si esegue applicando un carico di compressione alle superfici del provino attraverso un'attrezzatura in grado di garantire, per tutta la durata della prova, che il carico venga applicato in direzione normale alle superfici stesse. I provini hanno forma cilindrica e mentre la macchina applica il carico fino a portarli a rottura, il provino si accorcia nella direzione di applicazione del carico e conseguentemente si ha un aumento del diametro, questo aumento è meno pronunciato in prossimità del contatto tra il provino e le piastre che applicano il carico per effetto dell'attrito. L'attrito, genera tensioni tangenziali all'interfaccia che si oppongono all'espansione del provino provocando la barilottatura, in questo stato la configurazione di carico non è più monoassiale e deve essere evitato, per ridurre questo effetto bisogna ridurre il coefficiente d'attrito lubrificando all'interfaccia. Per condurre le prove di compressione sono stati prodotti nove provini cilindrici dei quali si riportano le dimensioni in figura 3.1a. Per garantire che il carico applicato al provino risulti

effettivamente normale alle superfici e diretto parallelamente all'asse del provino, la lavorazione deve garantire il parallelismo tra le superfici, condizione riportata infatti anche nel costruttivo di figura 3.1a.

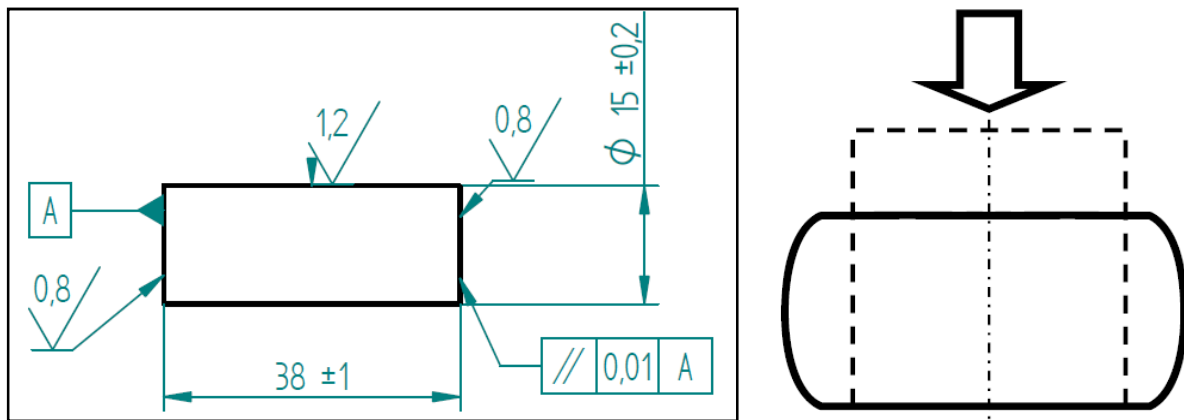


Figura 3.1: a)Disegno costruttivo provino di compressione, b) Barilottatura del provino dovuta all'attrito

Formule utilizzate:

Calcolo della tensione ingegneristica, non tiene conto della variazione della sezione durante la prova,  $R = \frac{F}{A_0}$

Calcolo della tensione vera, durante la prova, considerando il volume costante è possibile calcolare l'area resistente durante l'esecuzione della prova,  $\sigma = \frac{F}{A}$

Calcolo della deformazione ingegneristica,  $e = \frac{l-l_0}{l_0}$

Calcolo della deformazione vera,  $\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$

### 3.1.1 Prova di trazione

La prova di trazione è una prova distruttiva che si esegue sottoponendo un provino di opportuna forma e dimensione ad uno stato di tensione monoassiale. Il carico viene applicato mantenendo costante la velocità di deformazione, il provino quindi durante la prova si allunga nella direzione di applicazione del carico e si contrae sul piano ortogonale fino a rottura.

La normativa ISO 6892-1:2009(E) definisce le dimensioni dei provini per prove di trazione e il procedimento per trattare i dati ottenuti a fine prova. Per produrre provini proporzionali, deve essere verificata una relazione tra la lunghezza utile e la sua sezione,

$L_0 = k \times \sqrt{S_0}$  dove  $k=5,65$ ; questo valore tuttavia non è vincolante e può essere modificato, il valore di  $k$  da noi utilizzato è  $k=5,08$ . Le dimensioni da noi utilizzate sono riportate in fig. 3.2.

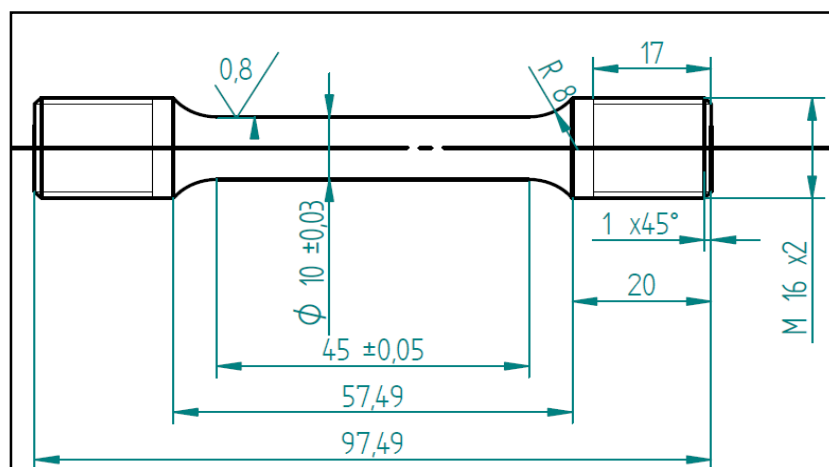


Figura 3.2: Disegno costruttivo provini trazione

I risultati della prova di trazione sono espressi nel diagramma forza-deformazione dal quale deriva il diagramma sforzo-allungamento.

Dal diagramma R-e è possibile leggere la tensione di snervamento, se il grafico ottenuto è simile a quello di figura 3.3a, la rilevazione dei valori non presenta difficoltà. Se però lo snervamento non è evidente, come in figura 3.3b e si concretizza semplicemente con la variazione della pendenza del grafico, risulta di difficile determinazione

Nel grafico 3.3b, la retta T identifica la pendenza del tratto elastico, fino a quando il grafico e la retta T rimangono sovrapposti il comportamento del materiale in esame risulta elastico, andando a rimuovere il carico il provino ritorna esattamente alle dimensioni di partenza. Se tuttavia si aumenta ancora il carico il grafico si allontana dalla retta T mostrando l'ingresso in campo plastico, rimuovendo il carico a questo punto, il provino non ritornerà più alle dimensioni iniziali ma percorrerà ad esempio la retta tratteggiata (parallela alla retta T) l'intersezione tra la retta tratteggiata e l'asse delle ascisse determina l'allungamento residuo. Sfruttando questa caratteristica dei materiali, di mantenere una deformazione plastica, è stato convenzionalmente stabilito che la tensione di snervamento è quella tensione che causa nel provino una deformazione permanente  $e=0.2\%$ . Il valore della tensione di snervamento è determinabile una volta ottenuto il grafico R-e semplicemente tracciando una retta parallela a T e passante per

l'ascissa 0.2% la lettura della tensione di snervamento avviene all'intersezione tra il grafico e la retta tracciata. Considerando l'equazione della retta T come  $R=me$  allora  $m = \frac{R}{e} = E$  il modulo di Young (E) è dato dal rapporto  $E = \frac{R}{e}$  oppure  $E = \frac{R \times 100}{e\%}$ .

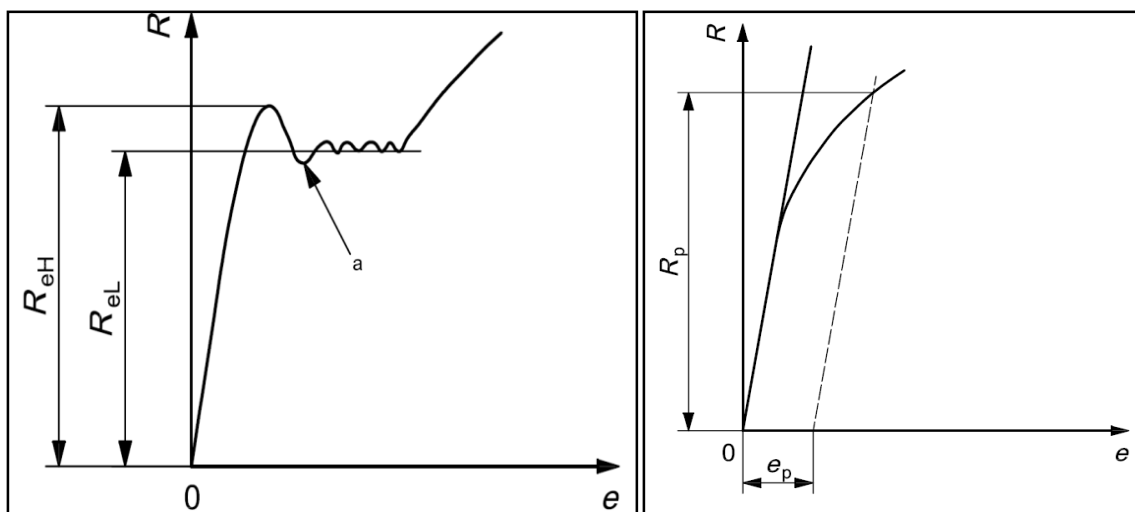


Figura 3.3: Grafico R-e a) con snervamento evidente b) senza snervamento evidente <sup>[19]</sup>

## 3.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

### 3.2.1 Pressa

La pressa utilizzata è prodotta dall'ITALSIGMA tipo fpf100, con potenza massima 100kN, presente nei laboratori della facoltà.





 <b>ITALSIGMA</b> S.r.l. VIA MASETTI, 50 - 47100 FORLÌ Tel.+ Fax+ 0543/796877			
Tipo	<b>FPF 100</b>	Forza massima	<b>100</b> kN
N° Serie	<b>0105</b>	Pressione di esercizio	<b>21</b> MPa
Anno	<b>1998</b>	Corsa cilindro	<b>100</b> mm
Massa	<b>Kg</b>	Press. max cilin. sollev.	<b>100</b> MPa

Figura 3.4: a) Pressa b) Particolate targa telaio pressa.

L'afferraggio presente in fig 3.4a è stato utilizzato per le prove di trazione, mentre per la compressione è stata utilizzata una fixture (Fig 3.5), costituita da una piastra di base in acciaio sulla quale sono fissate quattro guide cilindriche, sormontata da una seconda piastra che può scorrere sulle guide stesse per mezzo di quattro manicotti, il carico è stato applicato al provino tramite una sfera, necessaria per minimizzare gli attriti tra le guide e i manicotti

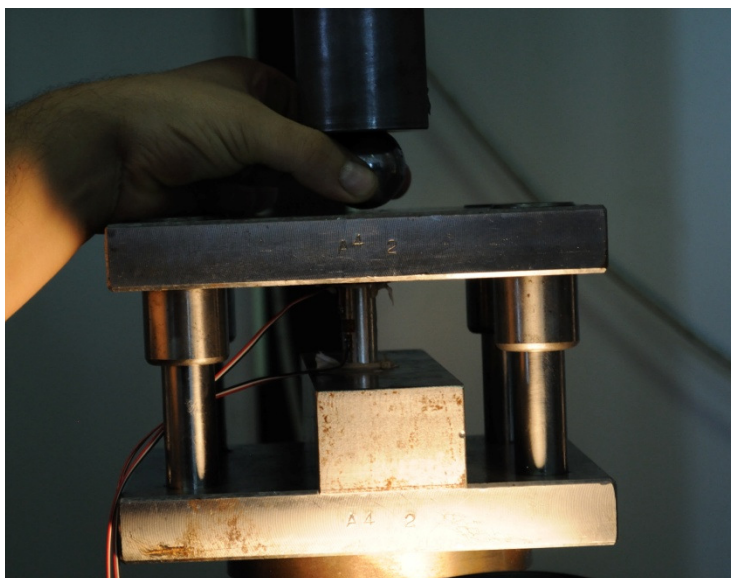


Figura 3.5: Attrezzatura impiegata per le prove di compressione con provino in posizione.

### 3.2.2 Estensometro

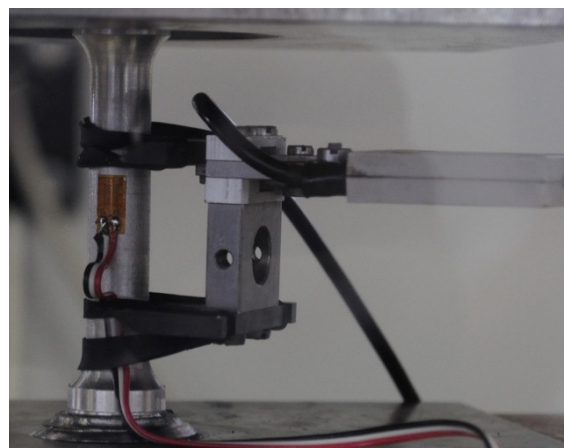


Figura 3.6 Estensometro, a)Particolare corpo e targhetta, b)Posizionamento sul provino.

L'estensometro è un componente elettromeccanico costituito da un corpo e da due lame, le lame, devono essere assicurate al provino tramite elastici, sono una fissa ed una mobile, la loro distanza iniziale è pari a 25mm e con una corsa di  $\pm 2,5$ mm, man mano che il

provino si deforma durante la prova, le due lame seguono questo movimento e causano una variazione di resistenza, che viene letta in uscita dall'estensometro.

### 3.2.3 Estensimetri

Gli estensimetri sono strumenti di misura utilizzati per rilevare deformazioni dimensionali su un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche, permettendo di legare la deformazione alla variazione di resistenza elettrica. In appendice A si riporta la scheda tecnica degli estensimetri utilizzati. Dell'applicazione degli estensimetri ai provini e della lettura dei valori ottenuti se ne è occupato l'ing. Paolo Proli che ci ha fornito direttamente i risultati ottenuti.

## 3.3 PROVE SPERIMENTALI

### 3.3.1 Metallografie

Le metallografie ottenute dalla barra tonda di diametro 20mm dalla quale sono stati ottenuti i provini evidenziano una ottima distribuzione delle particelle ceramiche all'interno della lega.

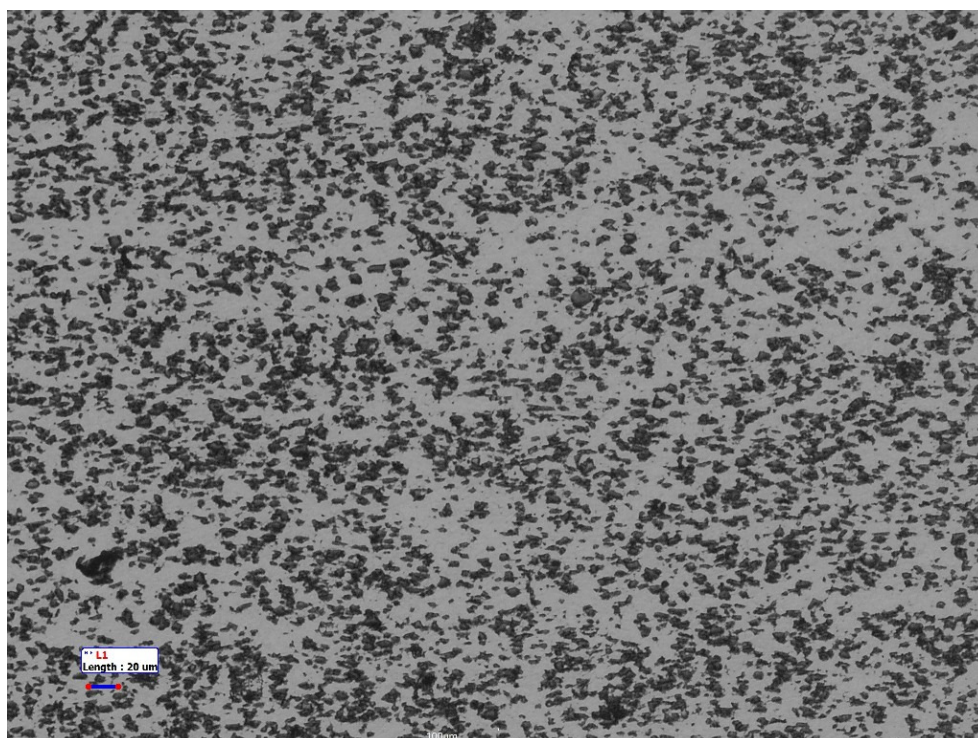


Figura 3.7: metallografia da barra  $\phi$ 20mm.



Dalla figura 3.7 è possibile notare l'elevata omogeneità di distribuzione del SiC. Le particelle oltre a essere ben distribuite, solo in pochi casi formano agglomerati di maggiori dimensioni che provocherebbero l'indebolimento del materiale.

Osservando un'immagine maggiormente ingrandita (figura 3.8), è possibile notare la perfetta adesione tra la matrice metallica e le particelle ceramiche, risultato molto positivo in quanto solo se le particelle si legano saldamente alla matrice, la lega risulta effettivamente rafforzata.

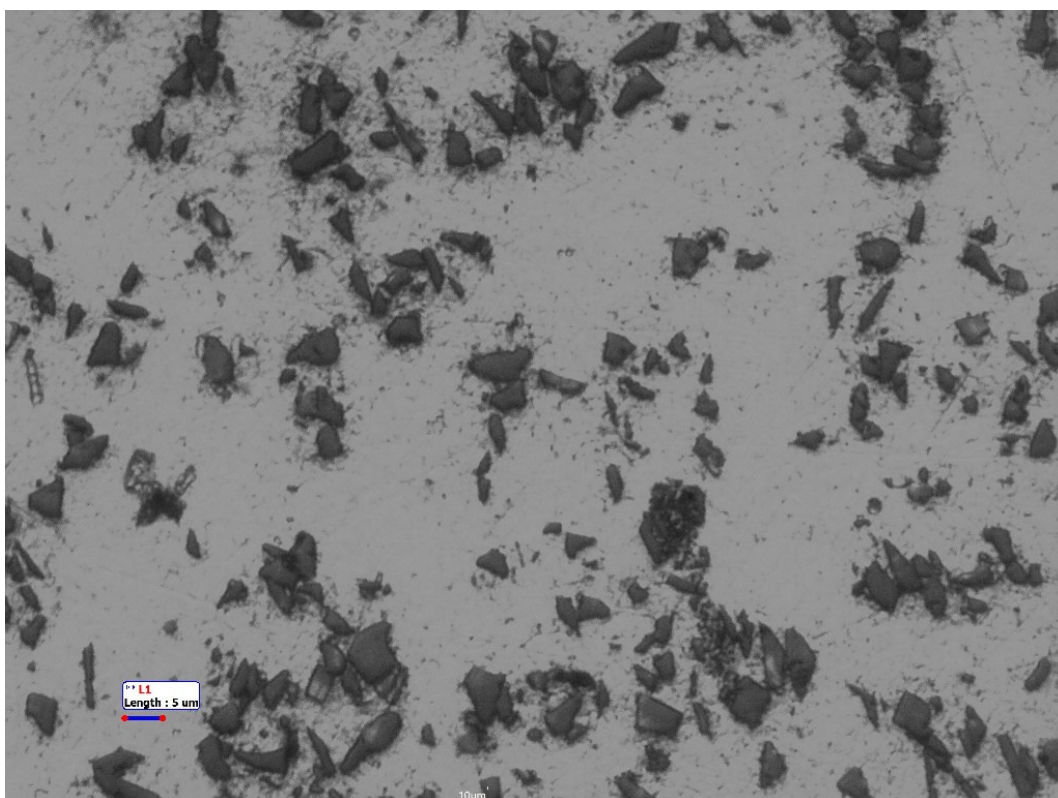


Figura 3.8: Metallografia da barra  $\phi 20\text{mm}$ .

Queste immagini sono tuttavia relative a porzioni di superficie che non presentano inclusioni, per questo motivo possiamo affermare che la distribuzione delle particelle è buona, eliminando le inclusioni di ossidi è possibile ottenere ancora miglioramenti.

### 3.3.2 Calibrazione a compressione

Il carico applicato dalla pressa sul provino oltre a produrre deformazioni elastiche e plastiche sul provino, produrrà deformazioni elastiche anche sulla struttura della pressa.

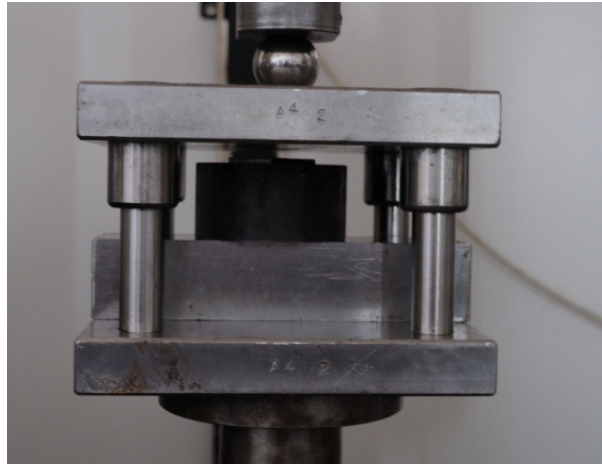


Figura 3.9: Particolare attrezzaggio per prova di calibrazione.

La prova di calibrazione è stata rivolta all'ottenimento del modulo di elasticità della pressa, quindi soggetta ad un carico di compressione, utile per correggere i risultati ottenuti nelle prove di compressione dei provini.

La prova è stata condotta con lo stesso attrezzaggio utilizzato per la prova di compressione, al posto del provino tuttavia è stato posizionato un elemento in acciaio estremamente più rigido. I dati ottenuti dalla pressa mostrano la relazione tra il carico applicato e l'avanzamento del pistone e sono forniti sotto forma di tabella nelle cui colonne sono riportati i valori del carico applicato (con segno negativo, essendo applicato un carico di compressione) e la posizione del pistone. Volendo ottenere il grafico load-stroke nel primo quadrante, i valori del carico e della deformazione sono stati cambiati di segno prima di andarli a graficare come mostra la figura 3.10.

Il grafico così ottenuto può essere diviso in due tratti, il tratto orizzontale, che mostra il recupero dei giochi all'interno della fixture e all'interno degli organi della pressa, ed il secondo tratto che mostra la deformazione in campo elastico della pressa all'aumentare del carico, solo questo secondo tratto rappresenta il comportamento elastico della pressa, deve quindi essere isolato come mostrato in figura 3.11, dall'equazione della retta è possibile determinare il modulo di elasticità della pressa che è  $E=134,49\text{GPa}$  in quanto,

$$E = \frac{\text{load}}{\text{stroke}} \text{ dall'equazione della retta quindi } y=mx, m = \frac{x}{y} = \frac{\text{load}}{\text{stroke}} = E$$

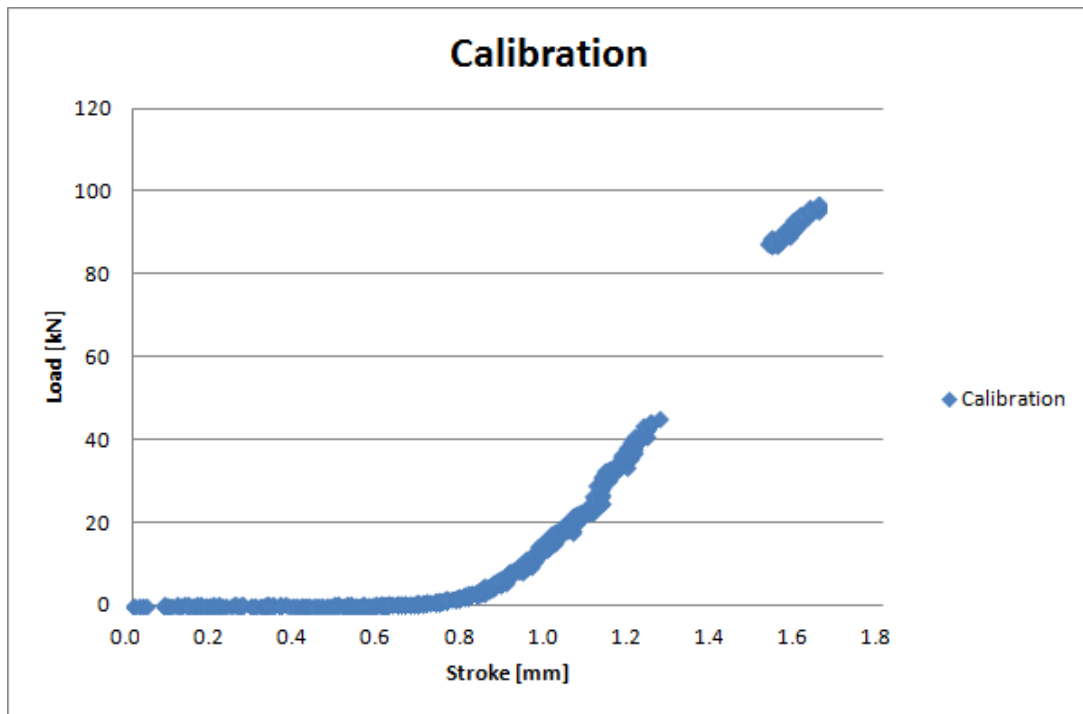


Figura 3.10: Grafico load-stroke prova di calibrazione.

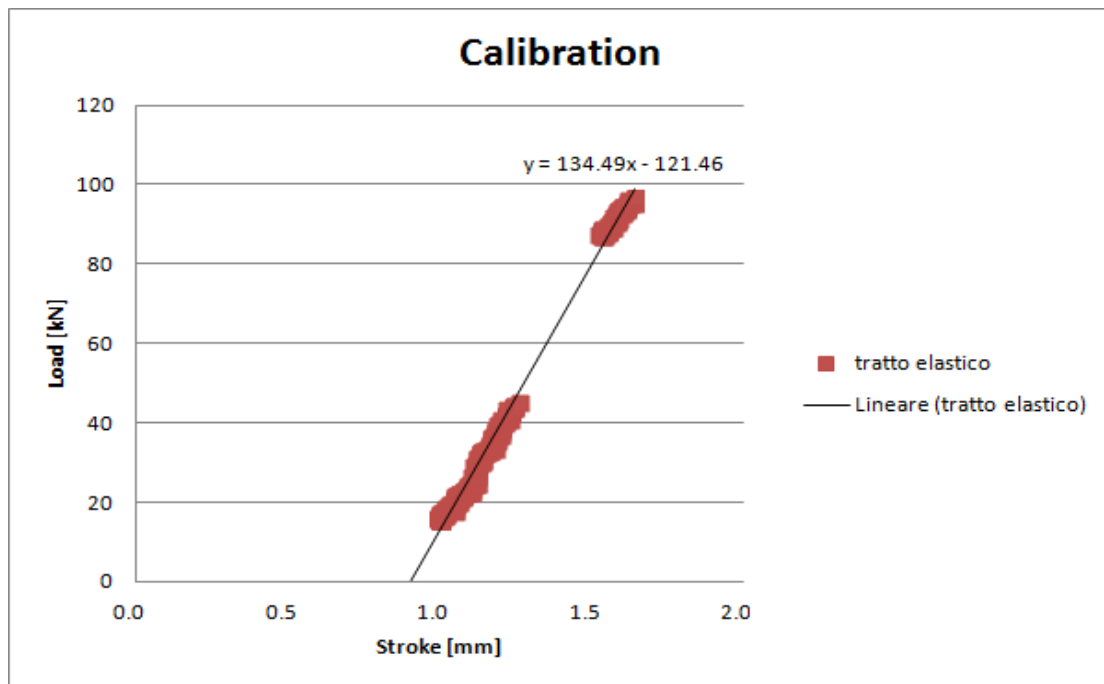


Figura 3.11: Tratto elastico prova di calibrazione con linea di tendenza.

In condizioni ideali non esiste il recupero dei giochi e le deformazioni sono legate solamente al carico a partire dal carico nullo. Il grafico deve essere quindi traslato in modo che la retta vada ad intersecare l'origine degli assi, come mostrato in figura 3.12.

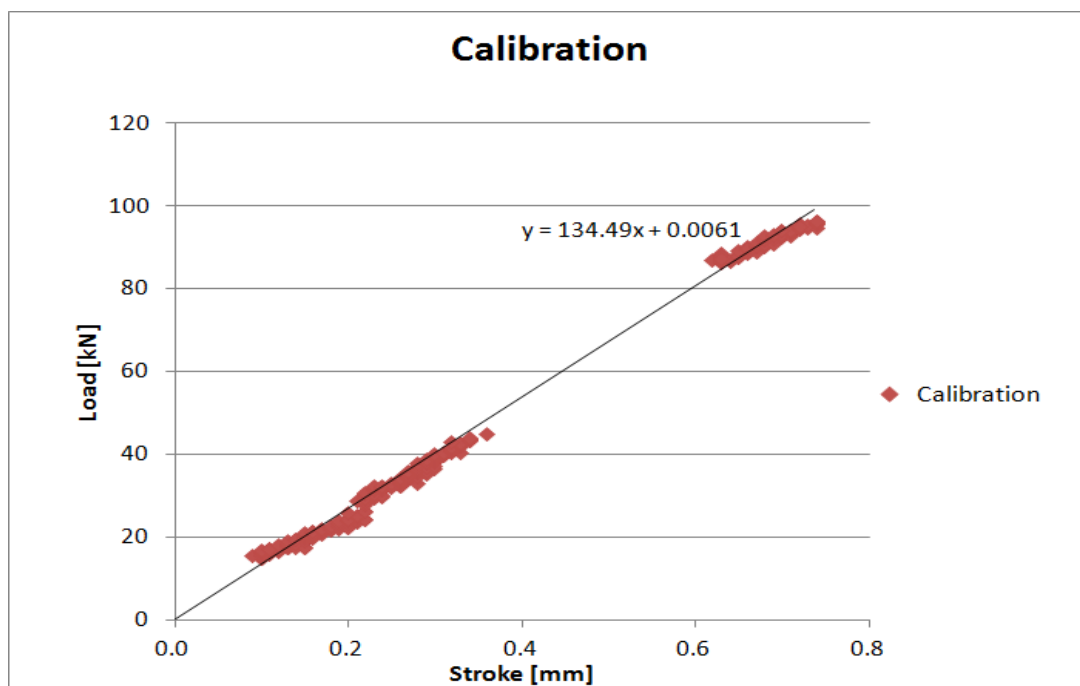


Figura 3.12: Grafico load-stroke di calibrazione della pressa

Ottenuto il modulo di Young è possibile correggere le deformazioni subite dal provino sottraendo la quota parte di deformazioni relative alla pressa.

### 3.3.2 Compressione

Sono stati prodotti 9 provini di compressione, come da fig.3.1a, per lavorazione al tornio da barra di diametro iniziale 20mm.



Figura 3.13: Provini 3-9 di compressione, lato con minori difetti superficiali.

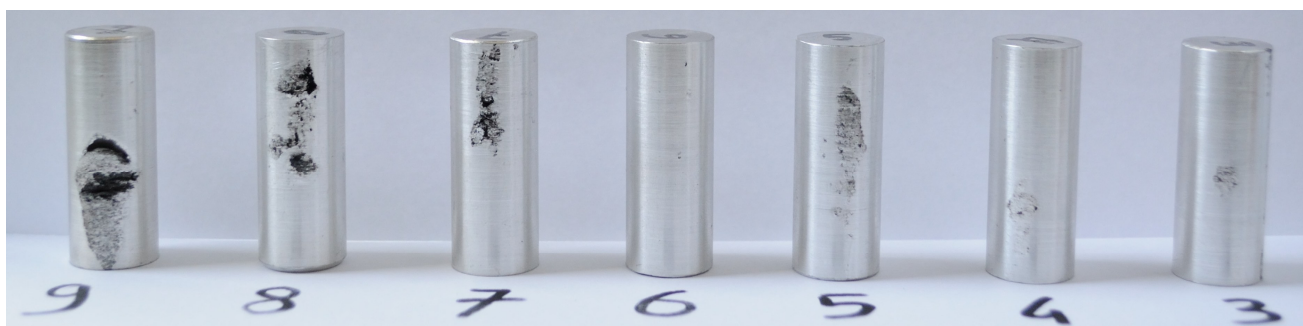


Figura 3.14: Provini 3-9 di compressione, lato con maggiori difetti superficiali.

La lavorazione al tornio ha evidenziato difetti più o meno estesi sulla superficie del provino, il provino 9 è quello con i difetti maggiormente evidenti, oltre ad un'inclusione superficiale con un'estensione pari a metà dell'altezza possiede anche una cavità profonda 2,5mm, sarà determinante vedere la variazione di resistenza dovuta a questi difetti.

Prima di iniziare la prova i provini sono stati tutti numerati e misurati in altezza e diametro, questo perché una volta terminata la prova, il diametro servirà per calcolare le tensioni di rottura e snervamento, mentre l'altezza per calcolare le deformazioni.

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial Height (mm)
1	15.03	37.82
2	15.03	37.65
3	14.99	37.73
4	14.97	37.72
5	14.99	37.74
6	15.00	37.81
7	15.00	37.75
8	14.99	37.76
9	14.99	37.76

Figura 3.15: Dimensioni iniziali dei provini compressione.

Come è stato spiegato nel capitolo 3.3.1 il provino sottoposto a compressione diminuisce in altezza e di conseguenza aumenta sul piano ortogonale, l'aumento di diametro genera degli strisciamenti all'interfaccia con la fixture per questo motivo il provino si rigonfia maggiormente nella zona centrale rispetto a quanto avviene all'interfaccia.



Figura 3.16: Posizionamento teflon a)superficie inferiore b)superficie superiore.

Per ridurre il più possibile questo effetto indesiderato e permettere al provino di mantenersi quanto più cilindrico per tutta la durata della prova è necessario ridurre il coefficiente di attrito, ogni provino è stato quindi posizionato all'interno della fixture ponendo sulle superfici due strati di olio e teflon come mostrato nelle figure 3.16 e 3.17

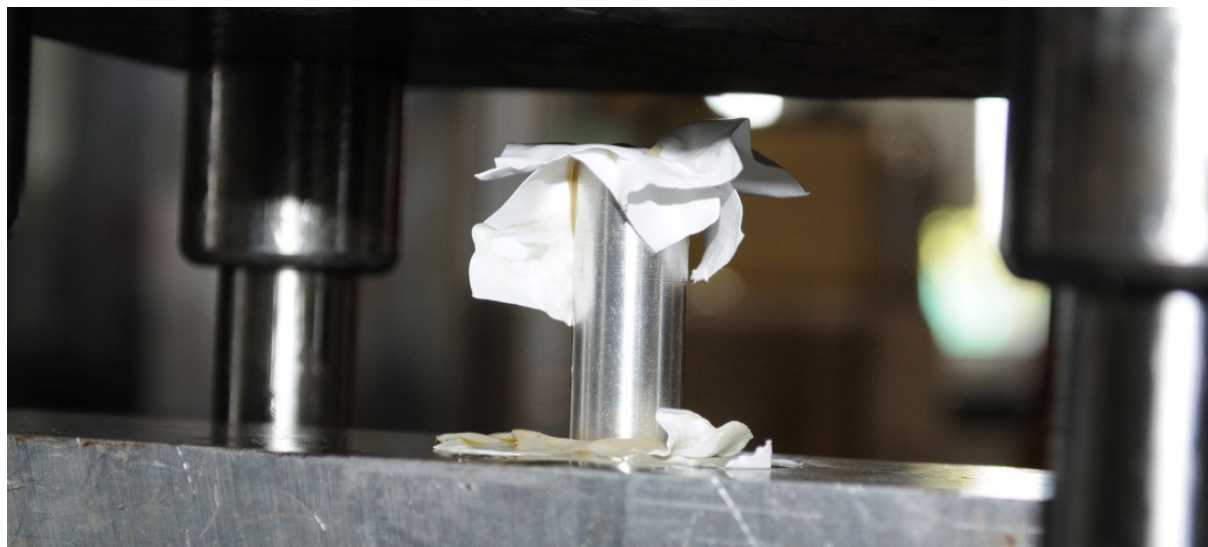


Figura 3.17: Provino posizionato nella fixture

Le prove sono state condotte tutte a velocità costante, pari a 0.05mm/s fino alla rottura del provino.

### Provino 1

Specimen	Initial Diameter $D_0$ [mm]	Initial Height $L_0$ [mm]	Initial Section area $A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	Final Diameter $D_f$ [mm]	Final Height $L_f$ [mm]	Final Section area $A_f$ [mm <sup>2</sup> ]	True strain @ break diameter
1	15.03	37.82	177.42	15.51	35.55	188.94	0.06

True strain @ break height	Elongation Diam %	Elongation @ break %	Maximum Load (kN)	Rsc (MPa)	Rmc (MPa)	Maximum Stress (MPa)	Mod.Elasticità [Gpa]
-0.06	3.19	9.71	81.2	--	458	430	83

Per ogni provino è stata prodotta una tabella con riportati tutti i valori relativi alle dimensioni prima e dopo la prova, vengono riportati inoltre i valori ottenuti dalla prova:

$\text{TrueStrain@BreakDiameter} = 2 \ln \frac{D_f}{D_0}$ , incremento di diametro dovuto allo schiacciamento

$\text{TrueStrain@BreakHeight} = \ln \frac{L_f}{L_0}$ , decremento di altezza dovuto allo schiacciamento

$$\text{ElongationDiam}\% = \frac{D_f - D_0}{D_0} 100, \text{ incremento di diametro dovuto allo schiacciamento}$$

I restanti valori sono ottenuti direttamente dai dati provenienti dalla pressa o dai grafici. I dati della pressa ed i calcoli eseguiti sono stati riportati per ogni provino sotto forma di tabella di cui si riporta l'intestazione:

load [kN]	Load _rel [kN]	Eng. Strengt h R [Mpa]	LVDT [mm]	LVDT_re l [mm]	Stroke [mm]	Stroke_ corr [mm]	Elongation	Real strength [Mpa]	Real Elongation
--------------	----------------------	---------------------------------	--------------	-------------------	----------------	-------------------------	------------	---------------------------	--------------------

Load(i), LVDT(i) riportano i valori ottenuti dalla pressa ed indicano rispettivamente il carico in kN letto dalla cella di carico e la posizione assoluta del pistone sempre della pressa, il pedice (i) indica che sono una serie di valori di lunghezza variabile da provino a provino in funzione della durata della prova (le letture sono ogni secondo).

Carico relativo,  $\text{Load\_rel} = \frac{\text{load}[i]}{\text{load}[0]}$ , utilizzato per azzerare il carico letto a inizio prova.

Tensione ingegneristica,  $\text{Eng. StrengthR}[i] = \frac{\text{load\_rel}[i] \times 1000}{\text{LVDT}[i]}$ , utilizzata per calcolare la tensione all'interno del provino durante l'esecuzione della prova.

LVDT\_rel posizione relative del pistone della pressa, fornisce il valore zero ad inizio prova,  $\text{LVDT\_rel}[i] = \text{LVDT}[i] - \text{LVDT}[0]$

Deformazione in mm dovuta al carico,  $\text{Stroke}[i] = \text{LVDT\_rel}[i] - \frac{\text{load\_rel}[i]}{E_p}$

( $E_p$  rappresenta il modulo di elasticità della pressa, serve per sottrarre dalla lettura della deformazione la quota parte relativa alla deformazione della pressa).

Per eliminare gli avanzamenti causati dal recupero dei giochi si utilizza lo  $\text{Stroke\_corretto}$ :  $\text{Stroke\_corretto}[i] = \text{stroke}[i] - C_s$

( $C_s$ , correzione stroke, per traslare il grafico strength-elongation in modo che la linea di tendenza intersechi l'origine, considerando l'equazione della linea di tendenza nel grafico

carico-deformazione  $y=mx+q$ ,  $Cs=q/m$ ).

La deformazione, valore adimensionale, è data dal rapporto tra la deformazione dovuta al carico applicato e la lunghezza iniziale,  $Elongation[i] = \frac{Stroke\_corretto[i]}{L_0}$ .

La tensione reale è ottenuta tenendo conto della variazione nel diametro del provino durante la prova a seguito dello schiacciamento dello stesso.

$$Real\_strength[i] = Eng.StrengthR[i] \times \frac{L_0 - Stroke\_corr[i]}{L_0}$$

(tramite la costanza del volume, tiene conto dell'aumento di diametro durante la prova).

$$La\ deformazione\ reale\ è:\ Real\_elongation = \left| \ln \left( \frac{L_0 - Stroke\_corretto[i]}{L_0} \right) \right| - C_r$$

( $C_r$ , correzione real elongation, per traslare il grafico in modo che la linea di tendenza intersechi l'origine).

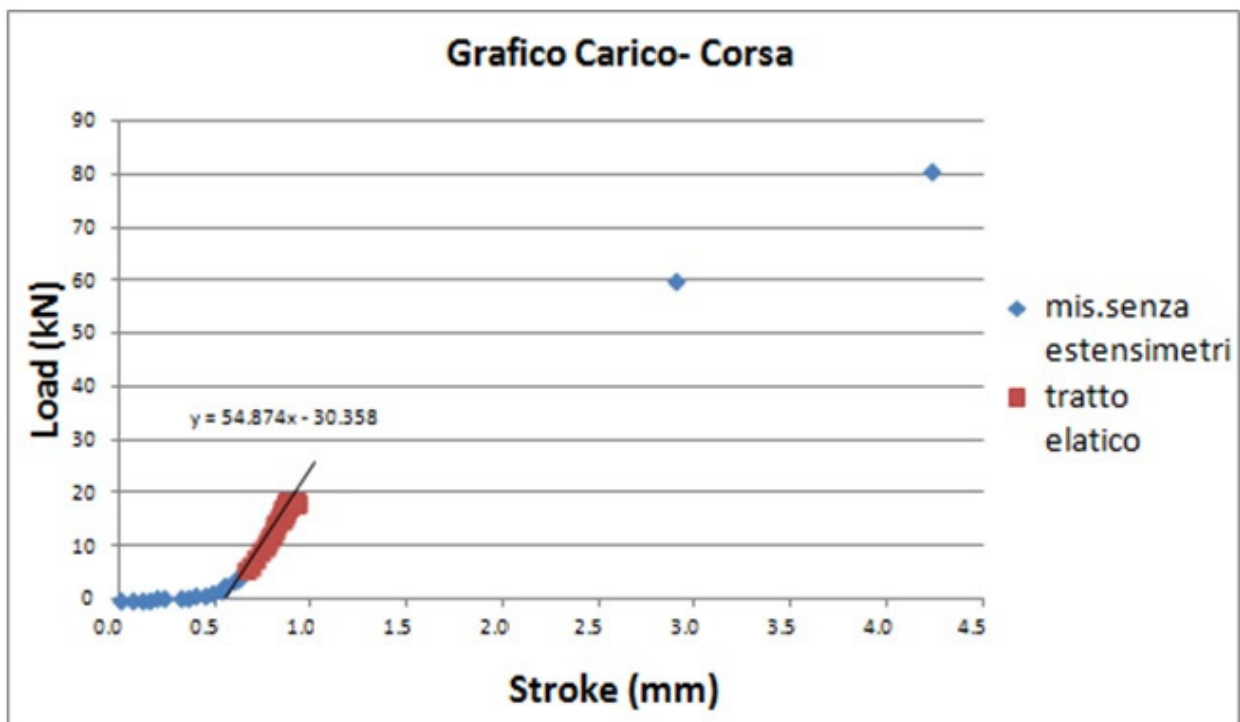


Figura 3.18: Grafico load\_rel-stroke, provino 1



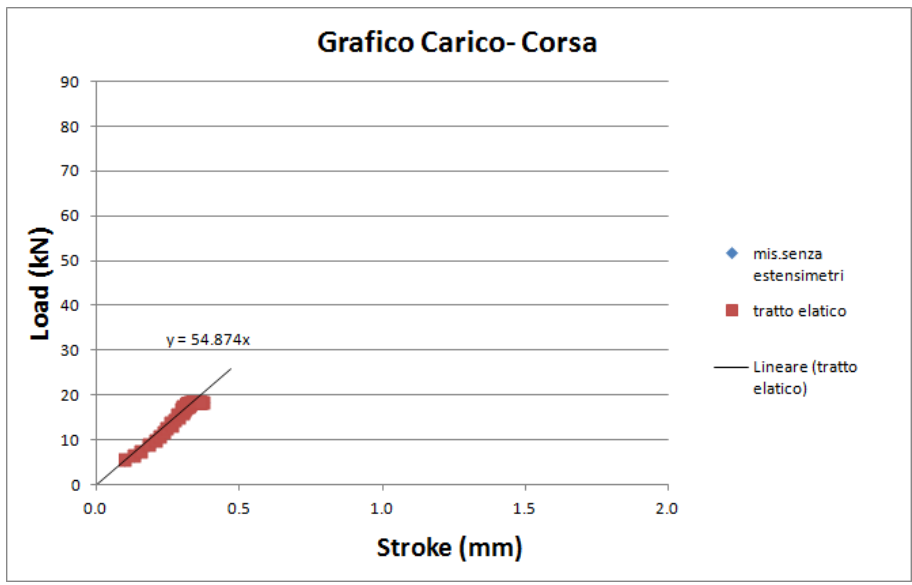


Figura 3.19: Grafico load\_rel-stroke corretto senza recupero dei giochi provino 1.

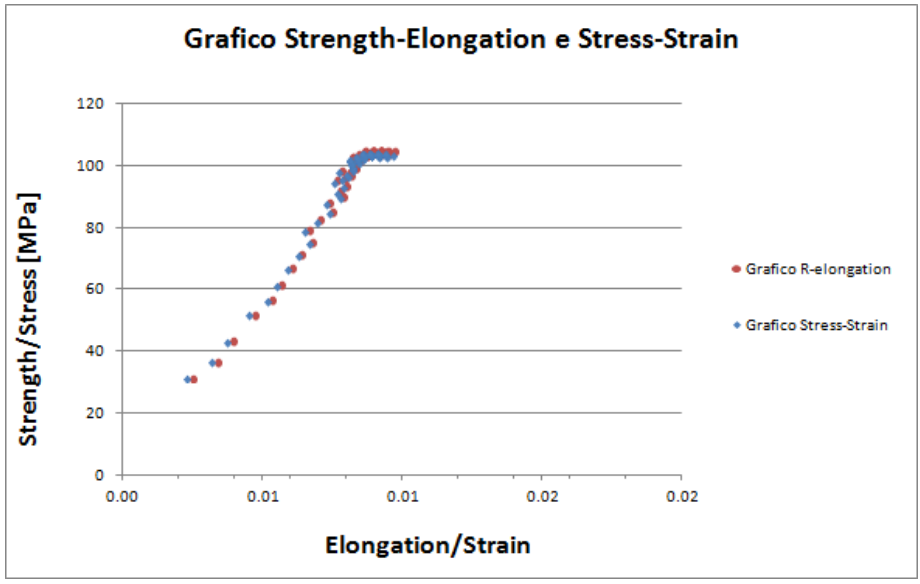


Figura 3.20: Grafico Strength-elongation e Stress-Strain, provino 1.

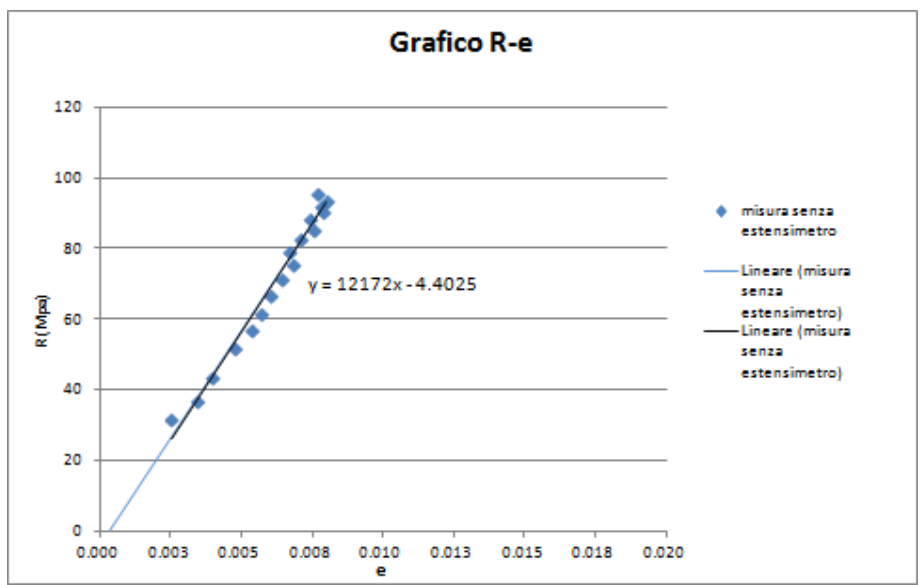


Figura 3.21: Grafico R-e, provino 1.

Dalle figure 3.18, 3.19, 3.20 è possibile distinguere un'elevata concentrazione di punti in prossimità dello snervamento, la pressa permette di lavorare a due livelli di potenza, per questa prova tuttavia era rimasta accidentalmente impostata sul livello più basso. Una volta notato che il carico non aumentava oltre i 20kN, è stata riportata manualmente al livello di potenza massima, questo ha determinato un rapido innalzamento del carico applicato come mostrano i due punti isolati in figura 3.18 portando il provino a rottura. Nonostante non sia stato possibile determinare la tensione di snervamento, la tensione di rottura è stata considerata pari a quella dell'ultimo punto ottenuto sul grafico prima della rottura, dal confronto con il valore medio ottenuto dalle prove, il risultato è perfettamente coerente ed è  $R_{mc}=457,6\text{[MPa]}$ , mentre  $R_{mc_{medio}}=451,7\text{[MPa]}$ .

Il provino 1 è stato inoltre strumentato con un estensimetro al fine di determinare direttamente la deformazione del provino escludendo quelle degli organi circostanti. Mediante la lettura della deformazione ottenuta dall'estensimetro è stato possibile determinare il modulo di Young(E), valore che determina il legame tra la tensione e la deformazione  $E = \frac{R}{e}$  il valore ottenuto è stato  $E=83\text{[GPa]}$ .

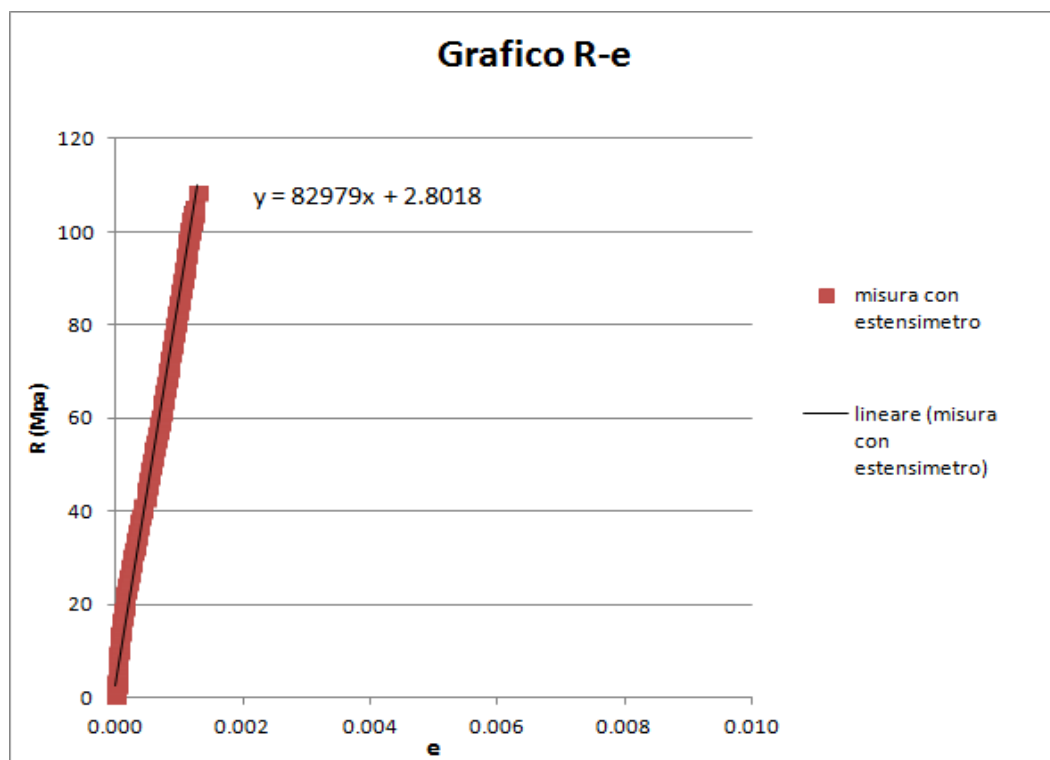


Figura 3.22: Grafico R-e con estensimetro e relativo modulo di Young, provino 1.

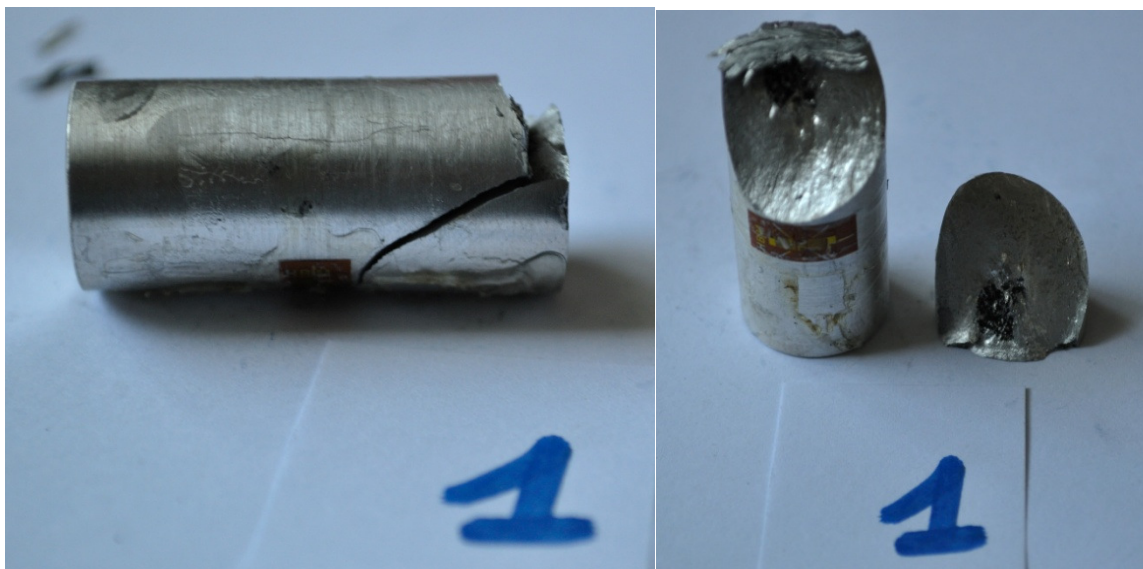


Figura 3.23: Provino 1 a prova terminata.

Mentre la tensione viene calcolata a partire dai valori ottenuti dalla cella di carico della pressa, la deformazione può essere ottenuta in due modi: il primo modo, dall'LVDT, come in figura 3.21, questo valore evidenzia solamente l'avanzamento del pistone della pressa, non è possibile tuttavia isolare le deformazioni avvenute sul provino da quelle avvenute sulla pressa; il secondo modo prevede l'utilizzo di estensimetri, come in figura 3.22, in questo caso le deformazioni rilevate saranno da imputare solamente al provino escludendo quanto accade sulla pressa.

Per le constatazioni appena riportate, il valore del modulo di Young più attendibile per i provini di compressione è proprio quello ottenuto dalla misurazione con l'estensimetro, per questa ragione nel report finale verrà riportato un solo valore del modulo di resistenza relativo proprio al provino 1. La prova è considerata valida, il valore della tensione di rottura ottenuto  $R_{mc}=458$  è prossimo al valore medio ottenuto durante le prove che è  $R_{mc_{medio}}=452$ . La rottura è avvenuta in prossimità di una estremità, la superficie di frattura ha un'inclinazione a  $45^\circ$  tipica del materiale in esame, sulla superficie di rottura sono presenti degli ossidi che non hanno tuttavia comportato una riduzione delle caratteristiche meccaniche come è già stato spiegato.

## Provino 2

Specimen	Initial Diameter $D_0$ [mm]	Initial Height $L_0$ [mm]	Initial Section area $A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	Final Diameter $D_f$ [mm]	Final Height $L_f$ [mm]	Final Section area $A_f$ [mm <sup>2</sup> ]	True strain @ break diameter
2	15.03	37.65	177.42	15.63	33.63	191.87	0.08

True strain @ break height	Elongation Diam %	Elongation @ break %	Maximum Load @ break (kN)	Rsc (MPa)	Rmc (MPa)	Maximum Stress (MPa)
-0.11	3.99	6.00	78.1	145	440	407

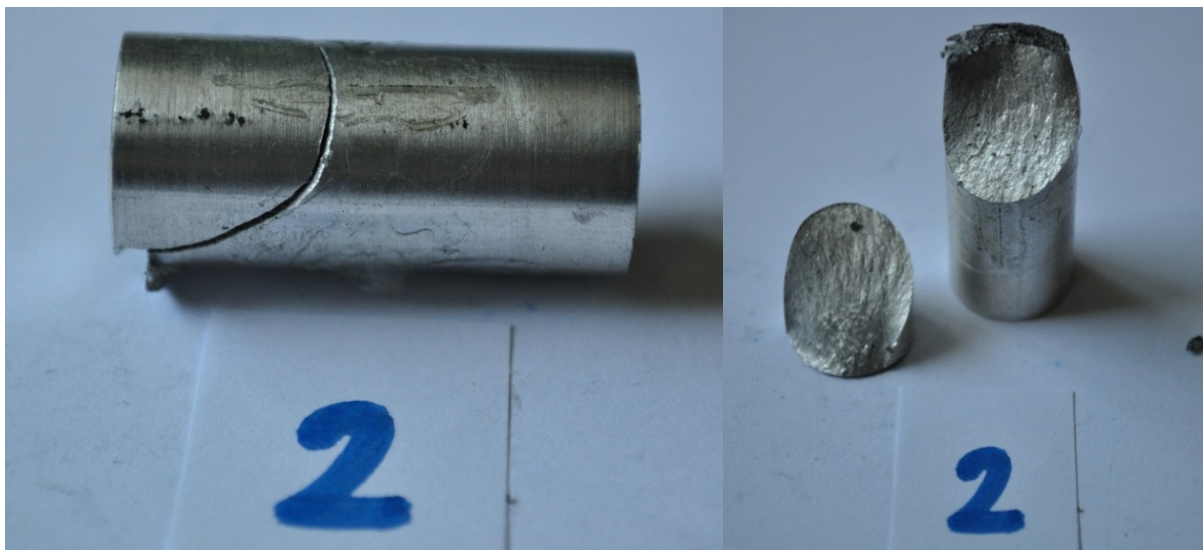


Figura 3.24: Provino 2 a prova terminata.

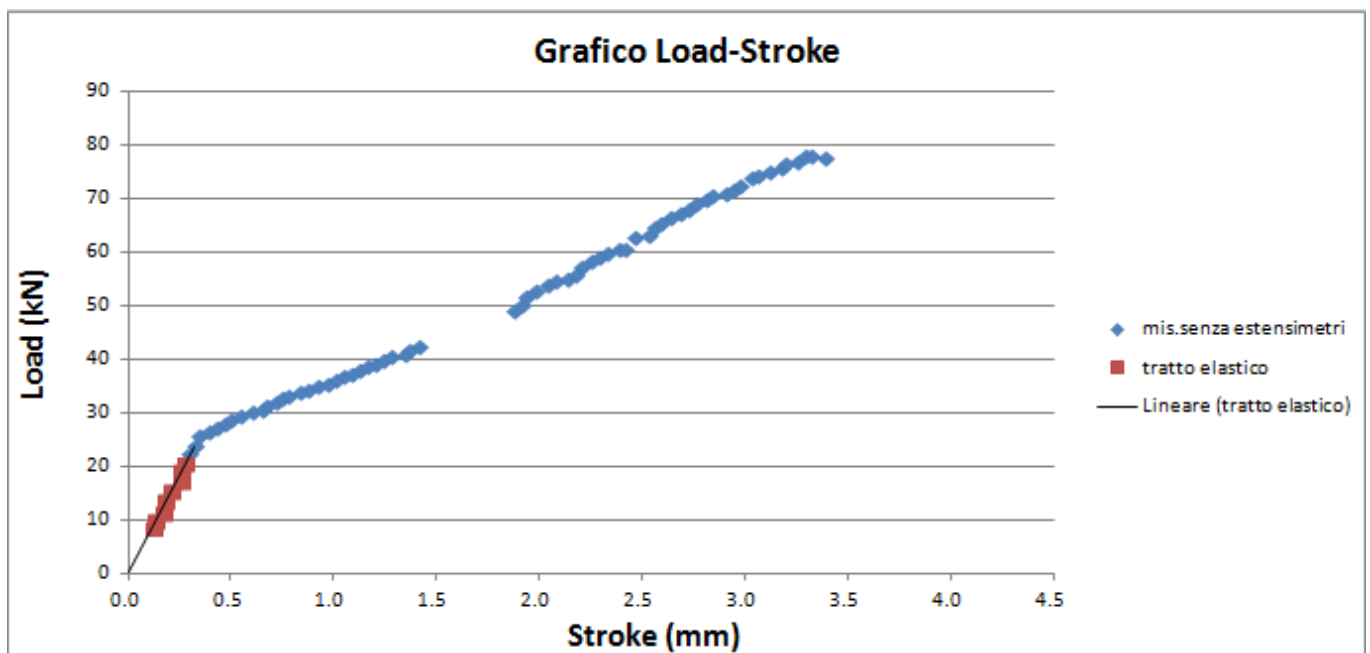


Figura 3.25: Grafico load-stroke provino 2.

I grafici 3.25 (Load-Stroke) e 3.26 (Strength-elongation e Stress-strain) mostrano un tratto elastico pronunciato e sono facilmente determinabili: tensione di snervamento  $R_{sc}=145$  [MPa], tensione di rottura  $R_{mc}=440$  [MPa] e l'allungamento a rottura  $\epsilon=6\%$  ottenuto dal grafico Strength-elongation la discontinuità nel grafico è dovuta a problematiche nell'acquisizione dati, tuttavia la misurazione del provino ricomposto a prova terminata e la lunghezza finale ottenuta dal grafico coincidono.

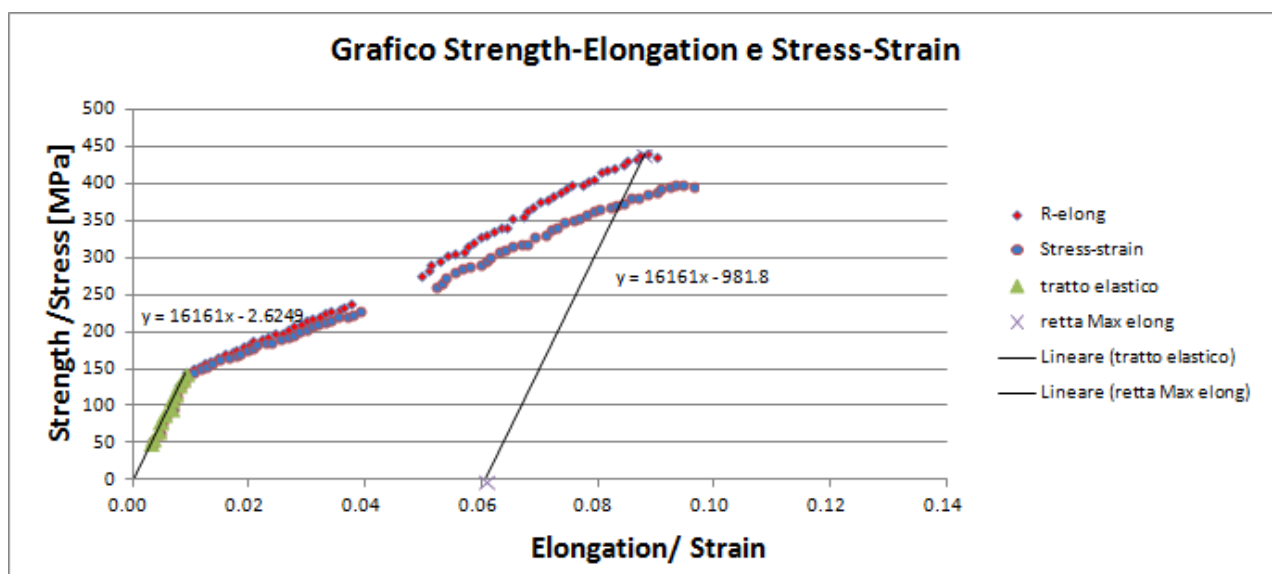


Figura 3.26: Grafico Strength-Elongation e Stress-Strain provino 2.

La rottura è avvenuta in prossimità di una estremità, la superficie di frattura è risultata inclinata a  $45^\circ$  rottura tipica per questo materiale. La superficie di frattura ha evidenziato la presenza di una inclusione interna di piccolissime dimensioni che non ha provocato la riduzione delle caratteristiche meccaniche che sono risultate in linea con i valori medi,  $R_{sc}=145$   $R_{mc}=440$  mentre i valori medi ottenuti dalle prove sono  $R_{sc_{medio}}=148$   $R_{mc_{medio}}=452$

### Provino 3

Specimen	Initial Diameter $D_0$ (mm)	Initial Height $L_0$ (mm)	Initial Section area $A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	Final Diameter $D_f$ (mm)	Final Height $L_f$ (mm)	Final Section area $A_f$ [mm <sup>2</sup> ]	True strain @ break diameter
<b>3</b>	14.99	37.73	176.48	15.58	35.25	190.64	0.08

True strain @ break height	True strain @ break height	Elongation Diam %	Elongation @ break %	Maximum Load @ break (kN)	Rsc (MPa)	Rmc (MPa)	Maximum Stress (MPa)
-0.07	-1.61	3.94	7.52	82.3	162	466	432

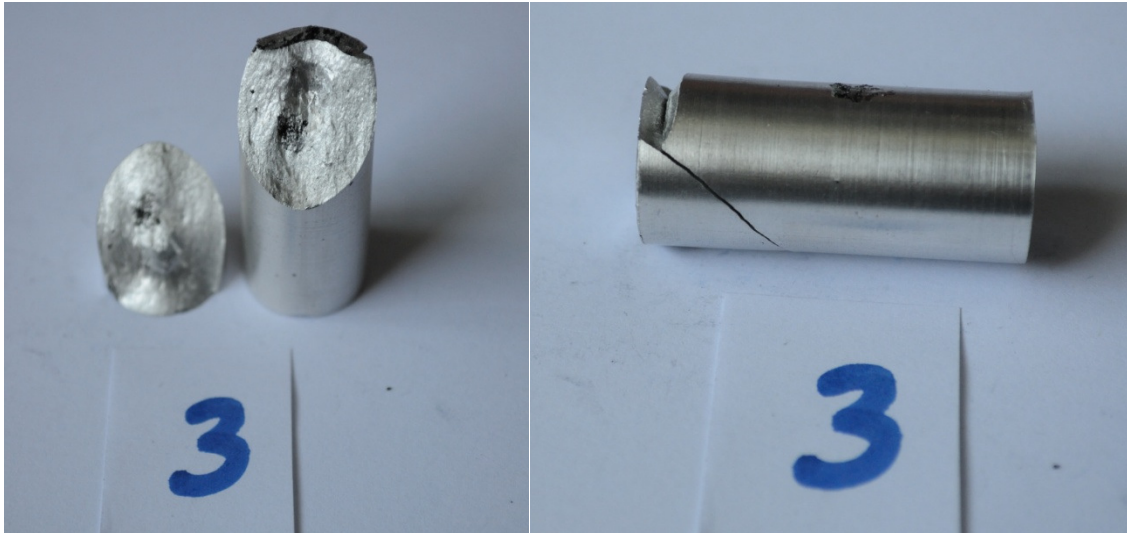


Figura 3.27: Provino 3 a prova terminata.

La rottura è avvenuta in prossimità di una estremità con un'inclinazione a  $45^\circ$ , dalla superficie di frattura è possibile notare varie inclusioni di piccole dimensioni nella parte centrale della sezione, non è stata riscontrata la riduzione delle caratteristiche meccaniche che risultano al contrario maggiori rispetto ai valori medi  $R_{sc}=162\text{[MPa]}$   $R_{mc}=466\text{[MPa]}$   $e\%7.52$  mentre i valori medi ottenuti dalle prove sono risultati  $R_{sc_{medio}}=148\text{[MPa]}$   $R_{mc_{medio}}=452\text{[MPa]}$   $e\%_{medio}=7.52\%$  le maggiori tensioni riscontrate non hanno quindi prodotto un aumento della fragilità.

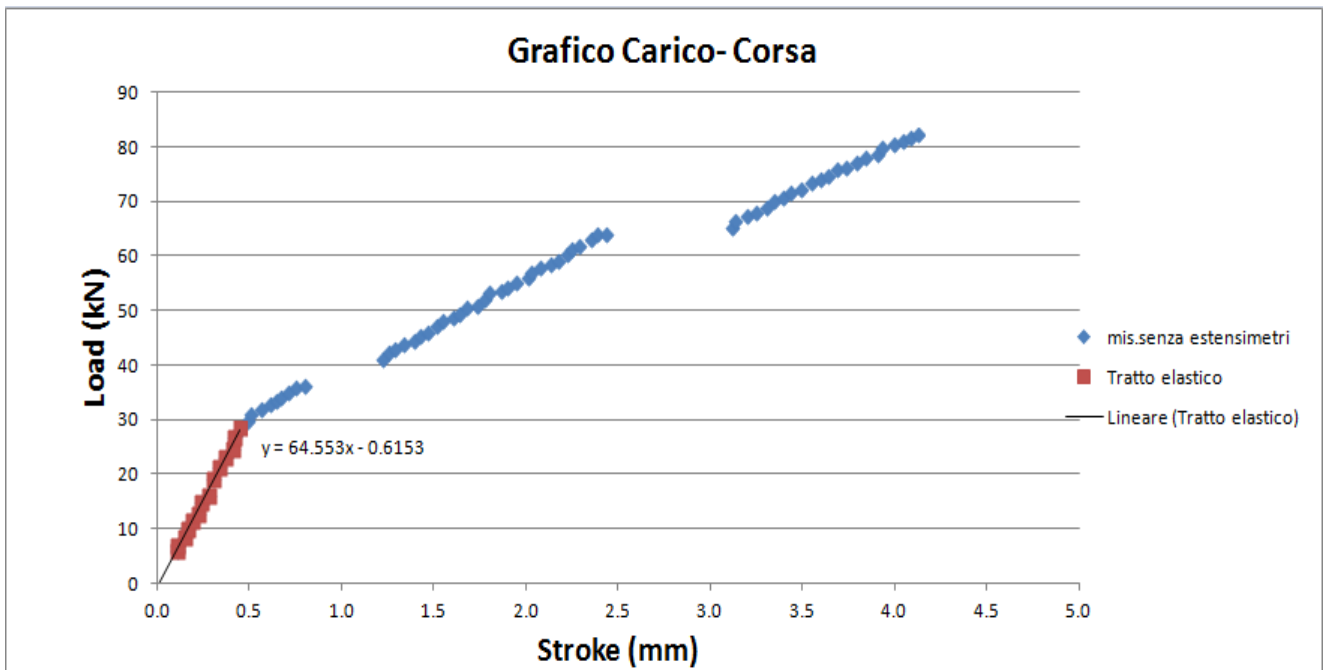


Figura 3.28: Grafico load-stroke provino 3.

Anche in questo caso le discontinuità riscontrabili nei grafici non hanno influenzato i risultati ottenuti, anche in questo caso infatti la dimensione finale letta ricomponendo il provino è risultata coincidere con la dimensione determinabile dal grafico strength-elongation fig.3.29.

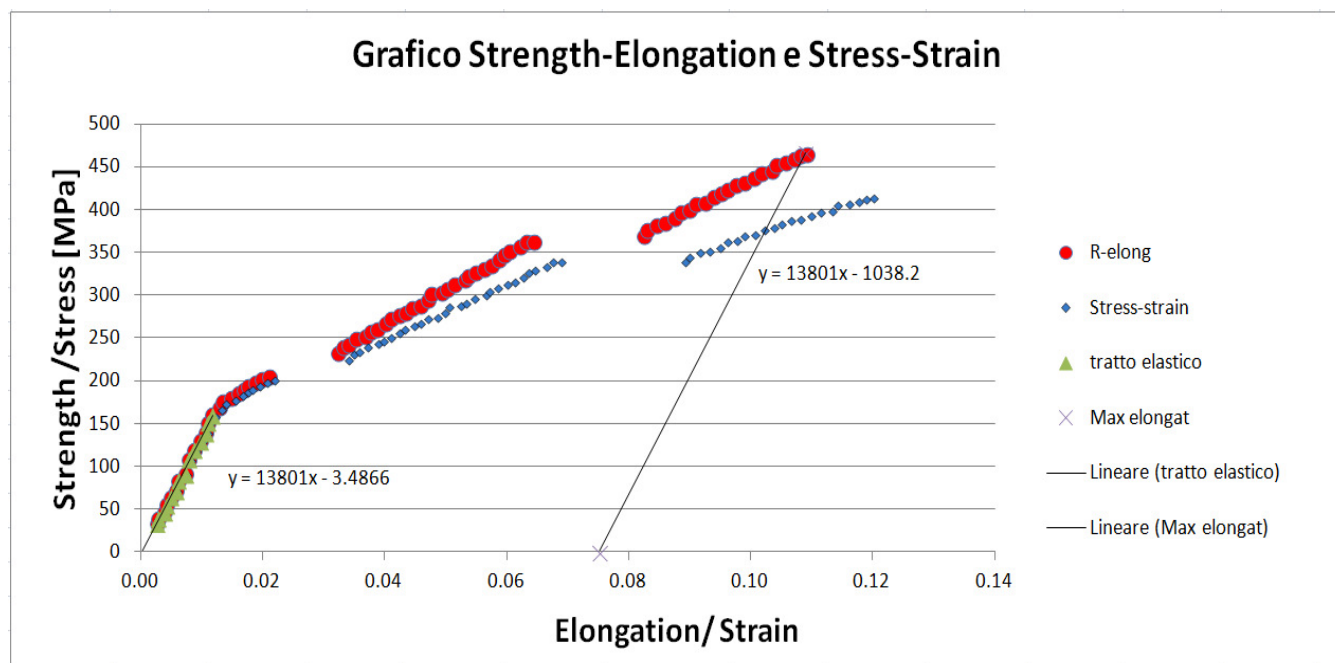


Figura 3.29: Grafico Strength-Elongation e Stress-Strain provino 3.

#### Provino 4

Specimen	Initial Diameter $D_0$ (mm)	Initial Height $L_0$ (mm)	Initial Section area $A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	Final Diameter $D_f$ (mm)	Final Height $L_f$ (mm)	Final Section area $A_f$ [mm <sup>2</sup> ]
<b>4</b>	<b>14.97</b>	<b>37.72</b>	<b>176.1</b>	<b>15.44</b>	<b>35.22</b>	<b>187.23</b>

True strain @ break diameter	True strain @ break height	Elongation Diam %	Elongation @ break %	Maximum Load @ break (kN)	Rsc (MPa)	Rmc (MPa)	Maximum Stress (MPa)
<b>0.06</b>	<b>-0.07</b>	<b>3.14</b>	<b>5.05</b>	<b>68.1</b>	<b>145</b>	<b>387</b>	<b>364</b>

La superficie di frattura risulta ampiamente influenzata dalla presenza di inclusioni superficiali ed interne. La presenza di inclusioni non ha influenzato la resistenza a snervamento, il valore ottenuto è infatti  $R_{sc}=145$ [MPa],  $R_{sc_{medio}}=148$ [MPa] la tensione massima risulta invece sensibilmente ridotta,  $R_{mc}=387$ [MPa] mentre  $R_{mc_{medio}}=452$ [MPa] la riduzione è risultata inferiore al 15% ed il valore ottenuto è stato considerato valido.

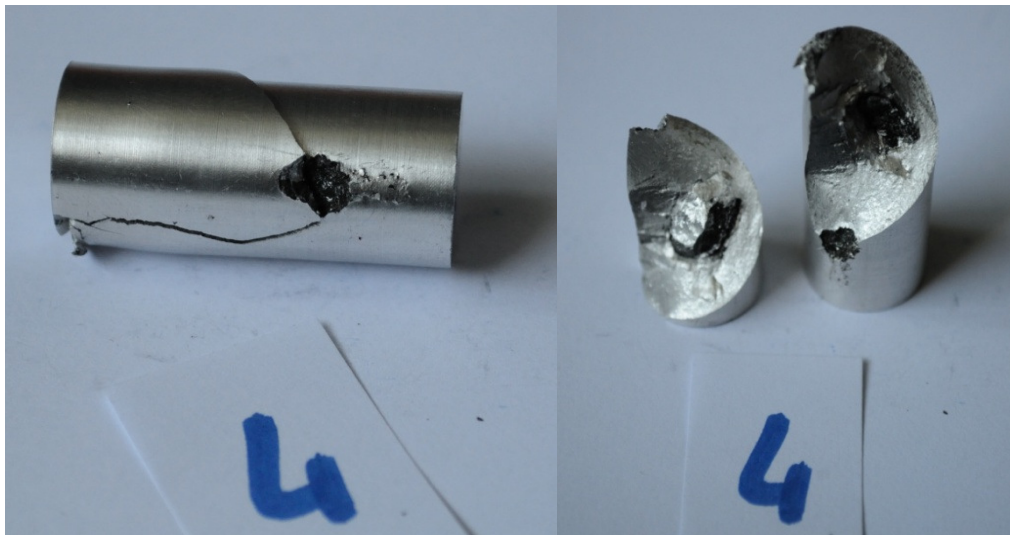


Figura 3.30: Provino 4 a prova terminata.

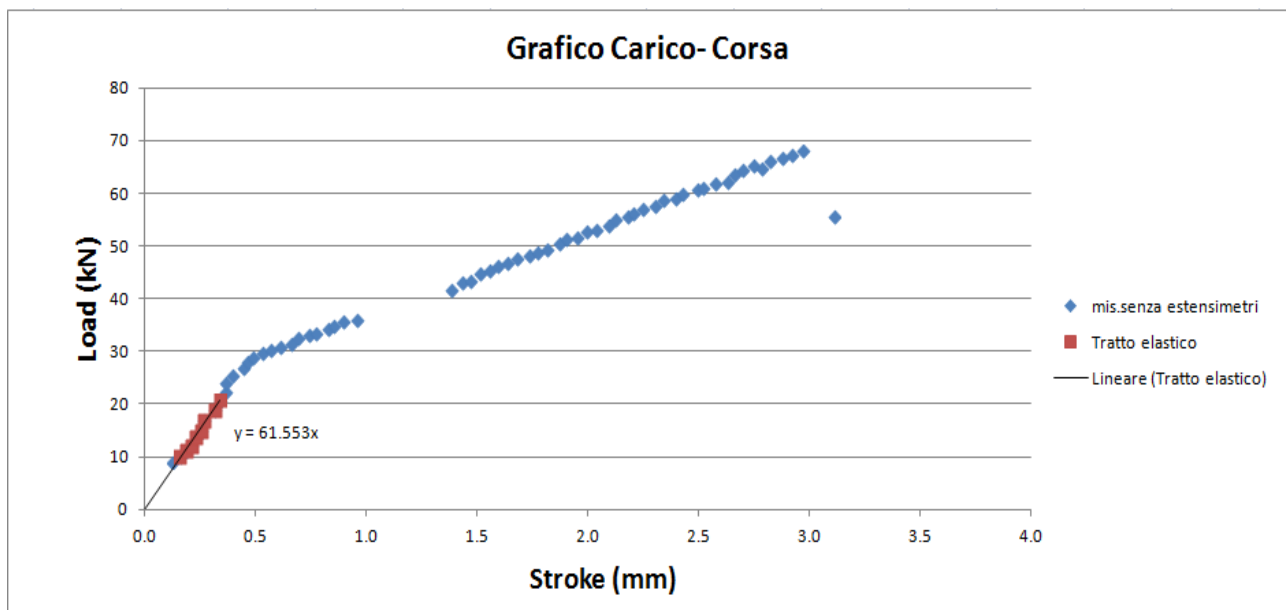


Figura 3.31: Grafico load-stroke provino 4.

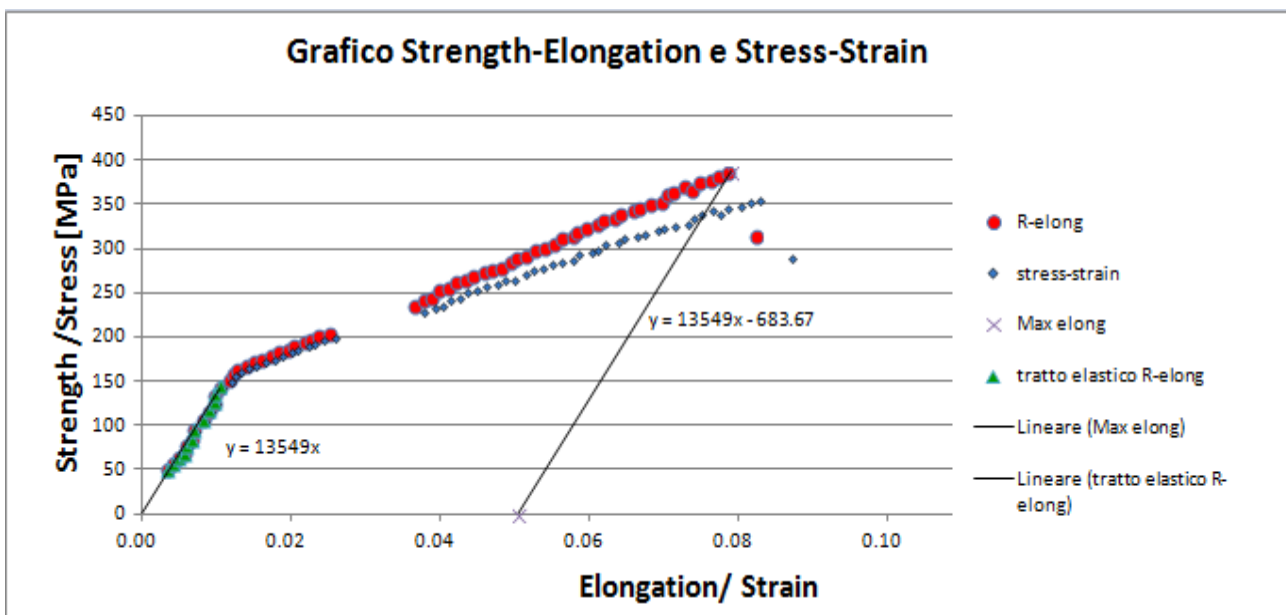


Figura 3.32: Grafico Strength-Elongation e Stress-Strain provino 4.



## Provino 5

Specimen	Initial Diameter $D_0$ (mm)	Initial Height $L_0$ (mm)	Initial Section area $A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	Final Diameter $D_f$ (mm)	Final Height $L_f$ (mm)	Final Section area $A_f$ [mm <sup>2</sup> ]
<b>5</b>	<b>14.99</b>	<b>37.74</b>	<b>176.48</b>	<b>15.65</b>	<b>34.46</b>	<b>192.36</b>

True strain @ break diameter	True strain @ break height	Elongation Diam %	Elongation @ break %	Maximum Load @ break (kN)	Rsc (MPa)	Rmc (MPa)	Maximum Stress (MPa)
<b>0.09</b>	<b>-0.09</b>	<b>4.40</b>	<b>7.21</b>	<b>85.8</b>	<b>159</b>	<b>486</b>	<b>446</b>

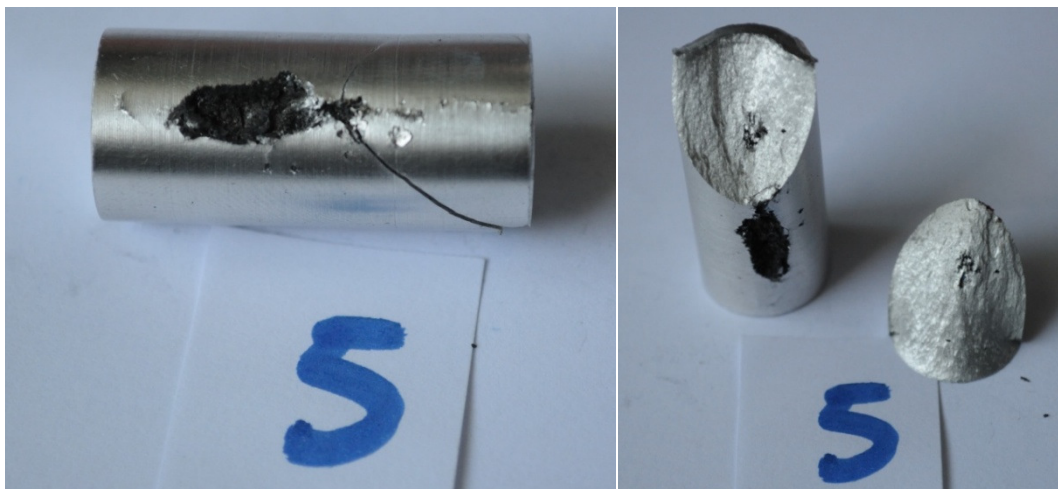


Figura 3.33: Provino 5 a prova terminata.

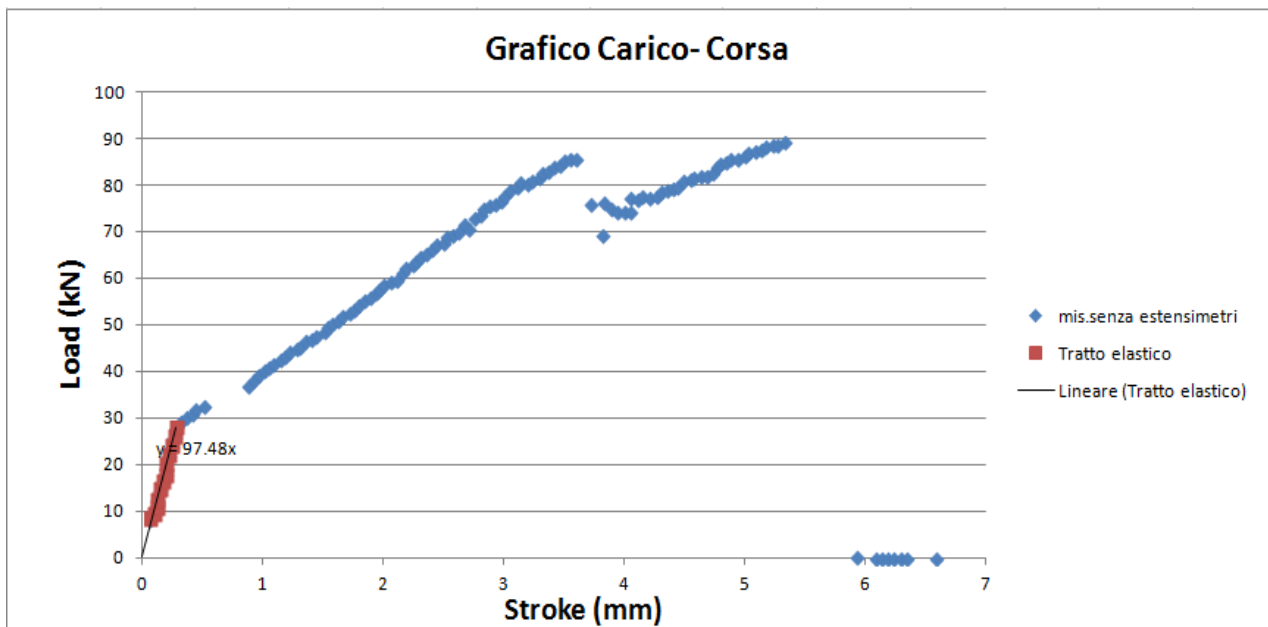


Figura 3.34: Grafico load-stroke provino 5.

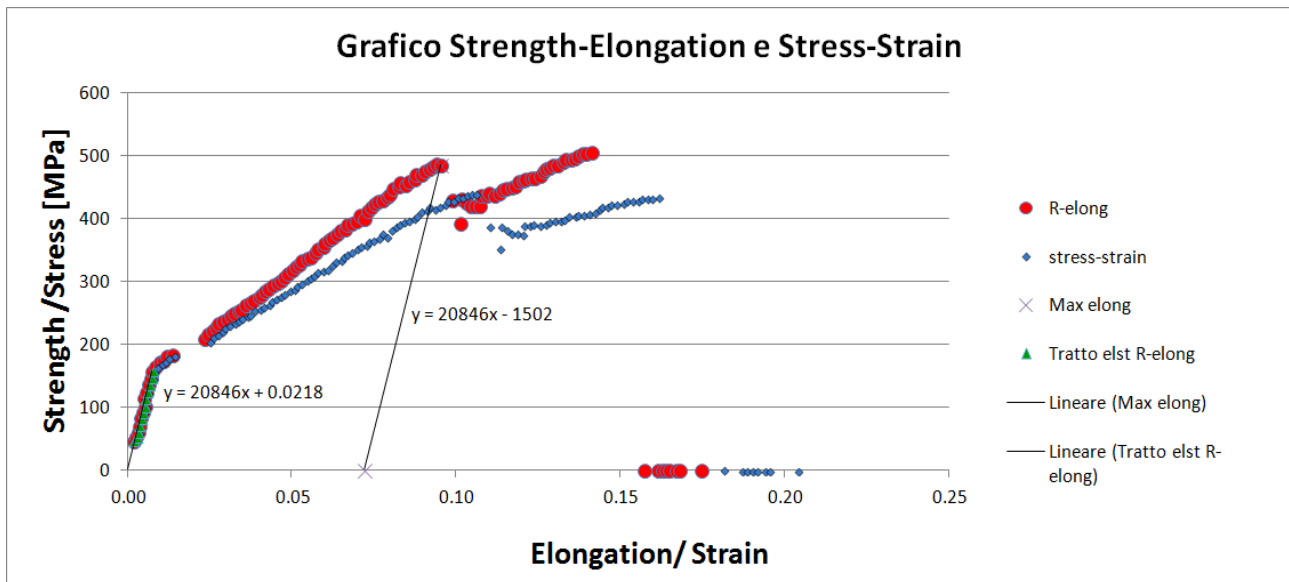


Figura 3.35: Grafico Strength-Elongation e Stress-Strain provino 5.

La superficie di rottura risulta a  $45^\circ$  a partire da una estremità, si possono riscontrare inclusioni interne di piccole dimensioni e una superficiale di dimensioni maggiori. Le resistenze meccaniche ottenute risultano superiori rispetto ai valori medi  $R_{sc}=159$  e  $R_{mc}=486$  mentre i valori medi sono:  $R_{sc_{medio}}=148$  [MPa]  $R_{mc_{medio}}=452$  [MPa], la prova è stata quindi considerata valida. Dal grafico Strength-elongation fig.3.35 è possibile notare un incremento della tensione applicata fino a  $480$  [MPa] seguito da una brusca riduzione dovuta ad una prima parziale frattura. Come è riscontrabile dai valori riportati, non è stata considerata la parte di grafico successiva alla discontinuità.

## Provino 6

Specimen	Initial Diameter $D_0$ (mm)	Initial Height $L_0$ (mm)	Initial Section area $A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	Final Diameter $D_f$ (mm)	Final Height $L_f$ (mm)	Final Section area $A_f$ [mm <sup>2</sup> ]
<b>6</b>	<b>15.00</b>	<b>37.81</b>	<b>176.71</b>	<b>15.68</b>	<b>34.32</b>	<b>193.10</b>

True strain @ break diameter	True strain @ break height	Elongation Diam %	Elongation @ break %	Maximum Load @ break (kN)	Rsc (MPa)	Rmc (MPa)	Maximum Stress (MPa)
<b>0.09</b>	<b>-0.10</b>	<b>4.53</b>	<b>7.07</b>	<b>80.4</b>	<b>131</b>	<b>455</b>	<b>416</b>

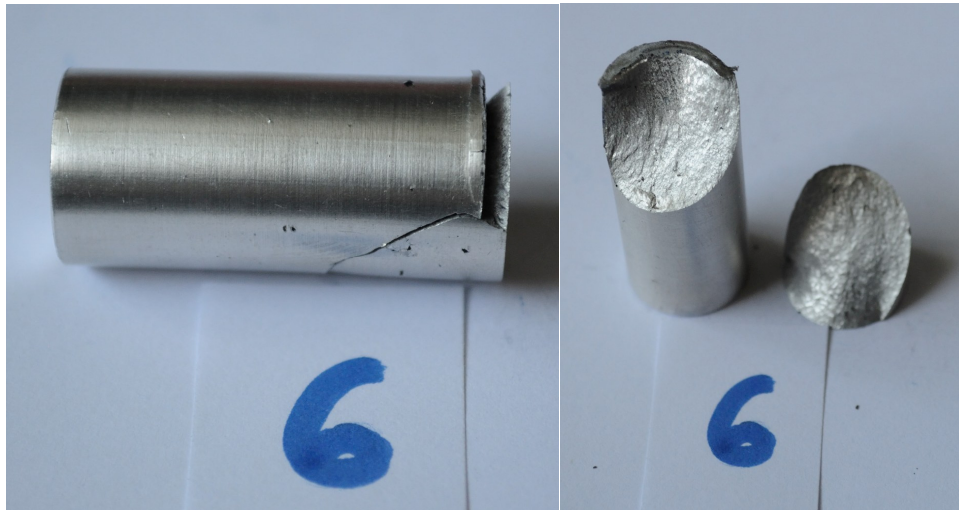


Figura 3.36: Provino 6 a prova terminata.

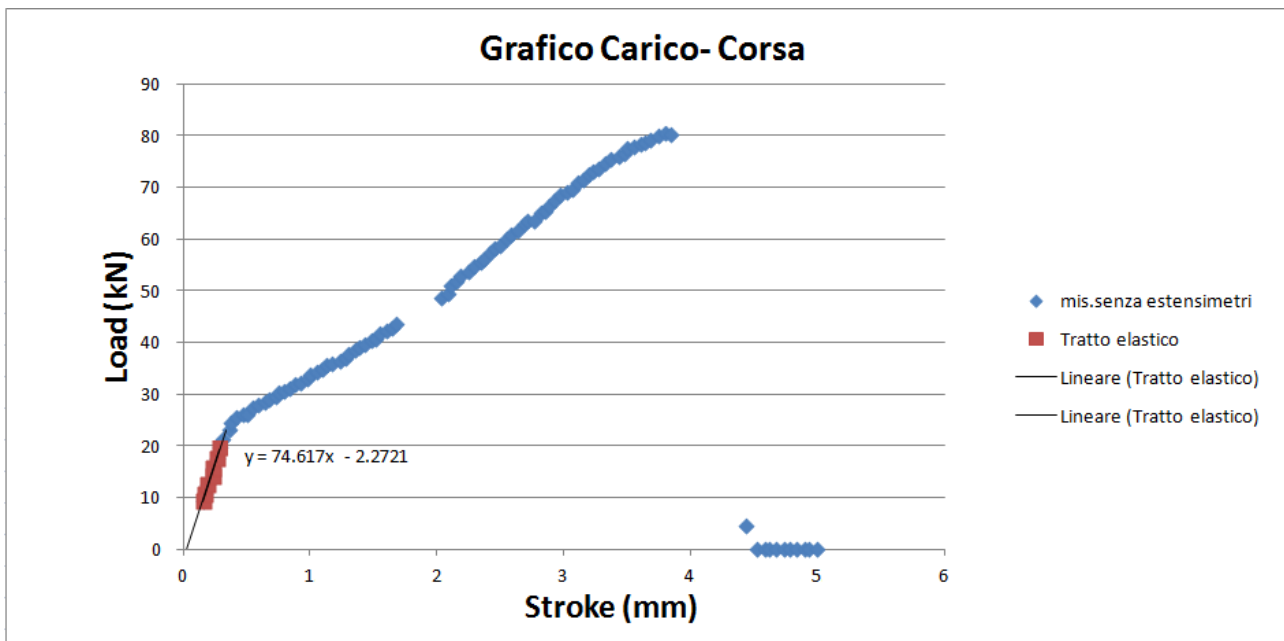


Figura 3.37: Grafico load-stroke provino 6.

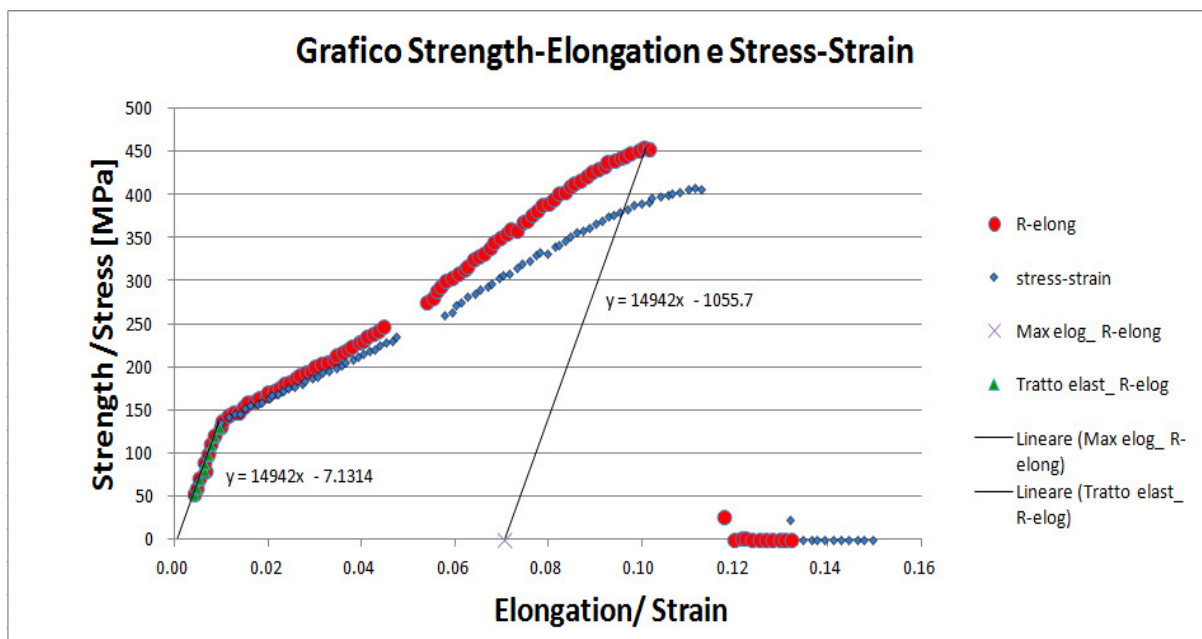


Figura 3.38: Grafico Strength-Elongation e Stress-Strain provino 6.

La rottura è avvenuta seguendo un piano a 45° a partire da una estremità, la superficie di rottura non ha evidenziato la presenza di inclusioni interne, le caratteristiche meccaniche risultano prossime ai valori medi,  $R_{sc}=131$  [MPa]  $R_{mc}=455$  [MPa] con un allungamento percentuale a rottura  $e\%=7,07\%$ , la prova è stata quindi considerata valida.

### Provino 7

Specimen	Initial Diameter $D_0$ (mm)	Initial Height $L_0$ (mm)	Initial Section area $A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	Final Diameter $D_f$ (mm)	Final Height $L_f$ (mm)	Final Section area $A_f$ [mm <sup>2</sup> ]
<b>7</b>	<b>15.00</b>	<b>37.75</b>	<b>176.71</b>	<b>15.67</b>	<b>34.28</b>	<b>192.85</b>

True strain @ break diameter	True strain @ break height	Elongation Diam %	Elongation @ break %	Maximum Load @ break (kN)	$R_{sc}$ (MPa)	$R_{mc}$ (MPa)	Maximum Stress (MPa)
<b>0.09</b>	<b>-0.10</b>	<b>4.47</b>	<b>7.75</b>	<b>83.2</b>	<b>145</b>	<b>471</b>	<b>431</b>

Il provino mostra un'inclusione superficiale di grandi dimensioni dalla quale si è generata la frattura, il cui piano a 45° non passa per l'estremità del provino. Anche in questo caso i valori di  $R_{sc}=145$  [MPa],  $R_{mc}=471$  [MPa],  $e\%=7,75\%$  risultano prossimi ai valori medi ottenuti, la prova è quindi stata considerata valida.

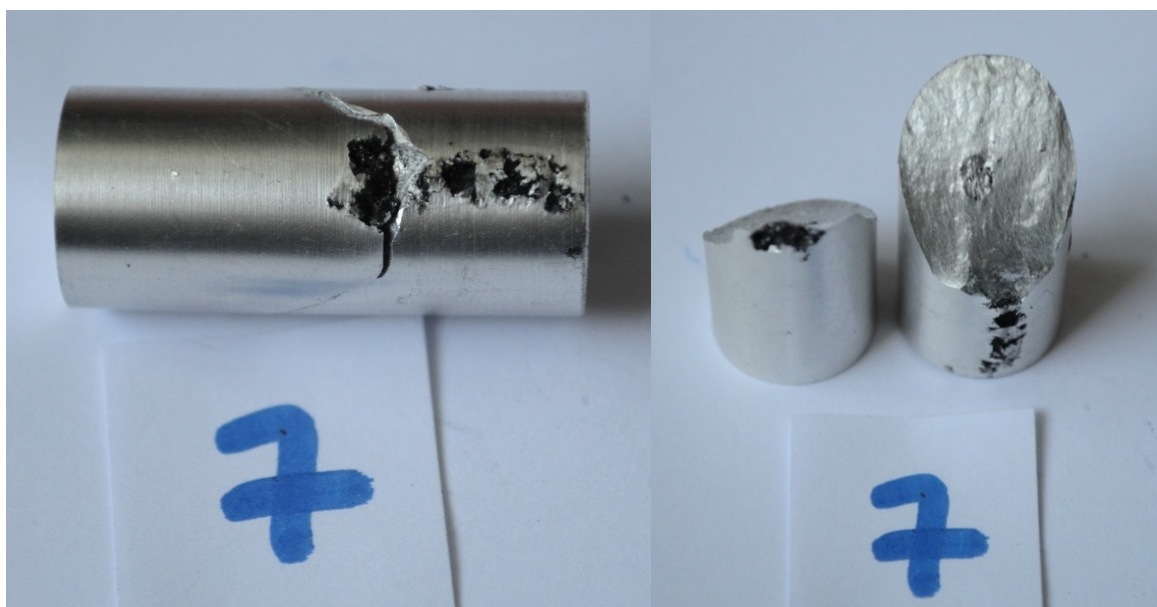


Figura 3.39: Provino 7 a prova terminata.

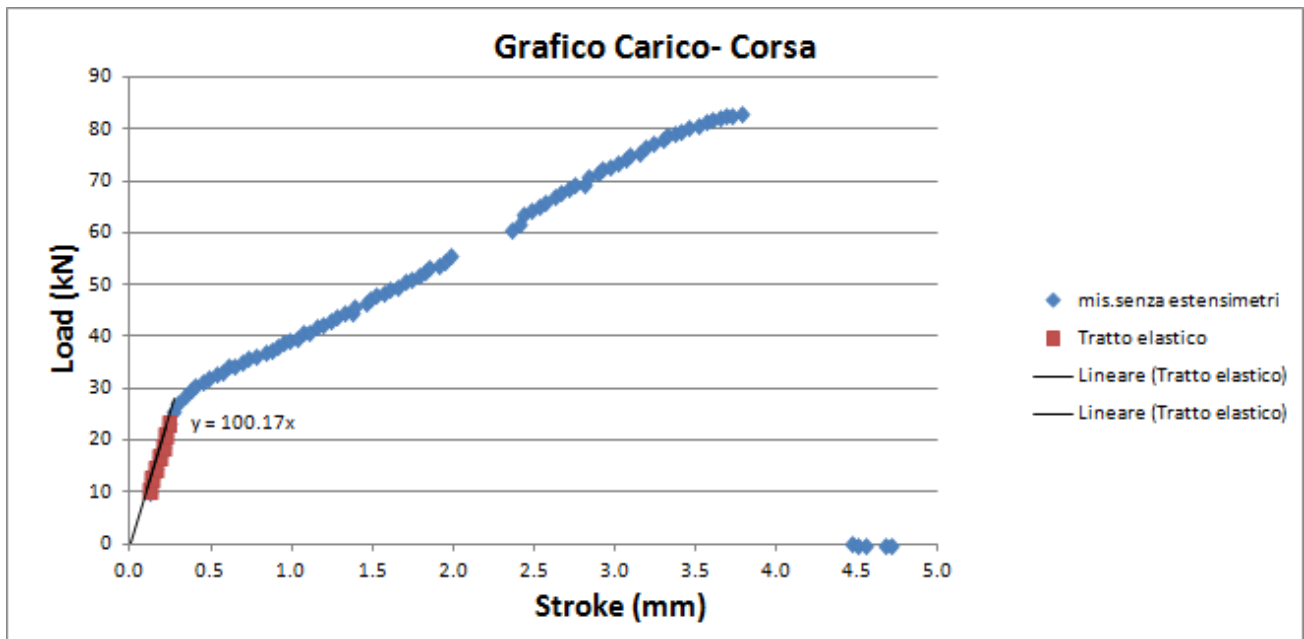


Figura 3.40: Grafico load-stroke provino 7.

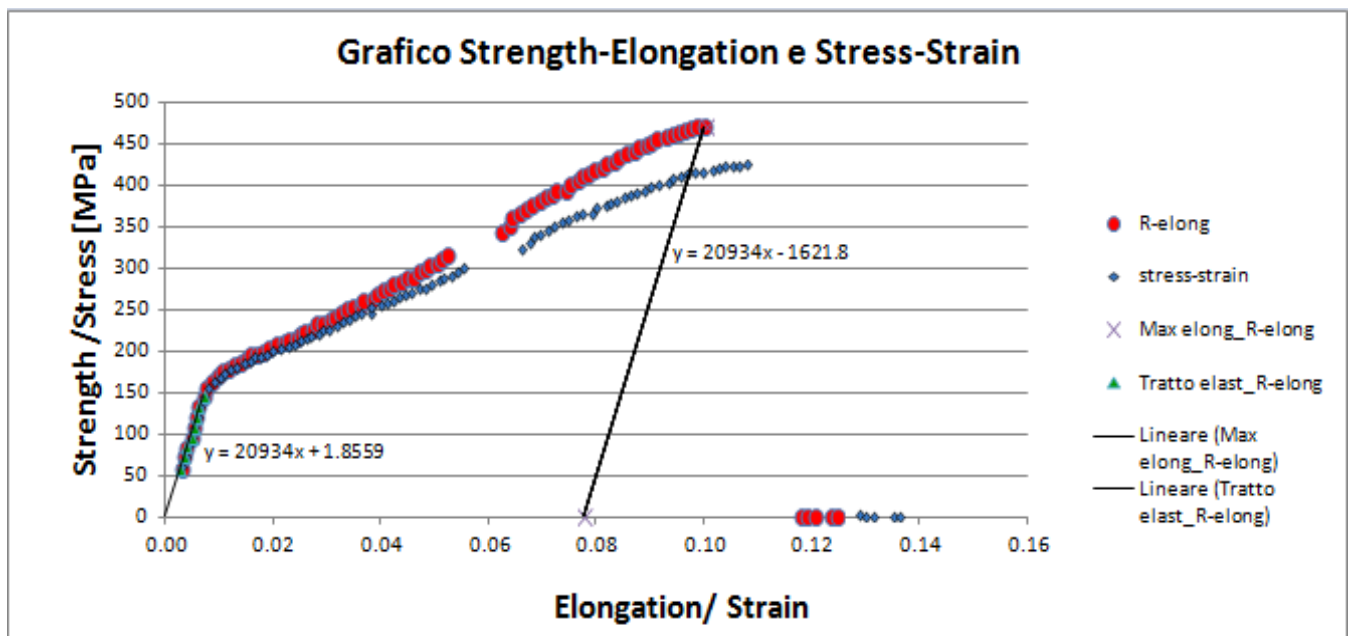


Figura 3.41: Grafico Strength-Elongation e Stress-Strain provino 7.

## Provino 8

Specimen	Initial Diameter $D_0$ (mm)	Initial Height $L_0$ (mm)	Initial Section area $A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	Final Diameter $D_f$ (mm)	Final Height $L_f$ (mm)	Final Section area $A_f$ [mm <sup>2</sup> ]
<b>8</b>	14.99	37.76	176.48	15.12	36.61	179.55

True strain @ break diameter	True strain @ break height	Elongation Diam %	Elongation break %	Maximum Load @ break (kN)	Rsc (MPa)	Rmc (MPa)	Maximum Stress (MPa)
0.02	-0.03		4.25	41.1	125	233	229



Figura 3.42: Provino 8 a prova terminata.

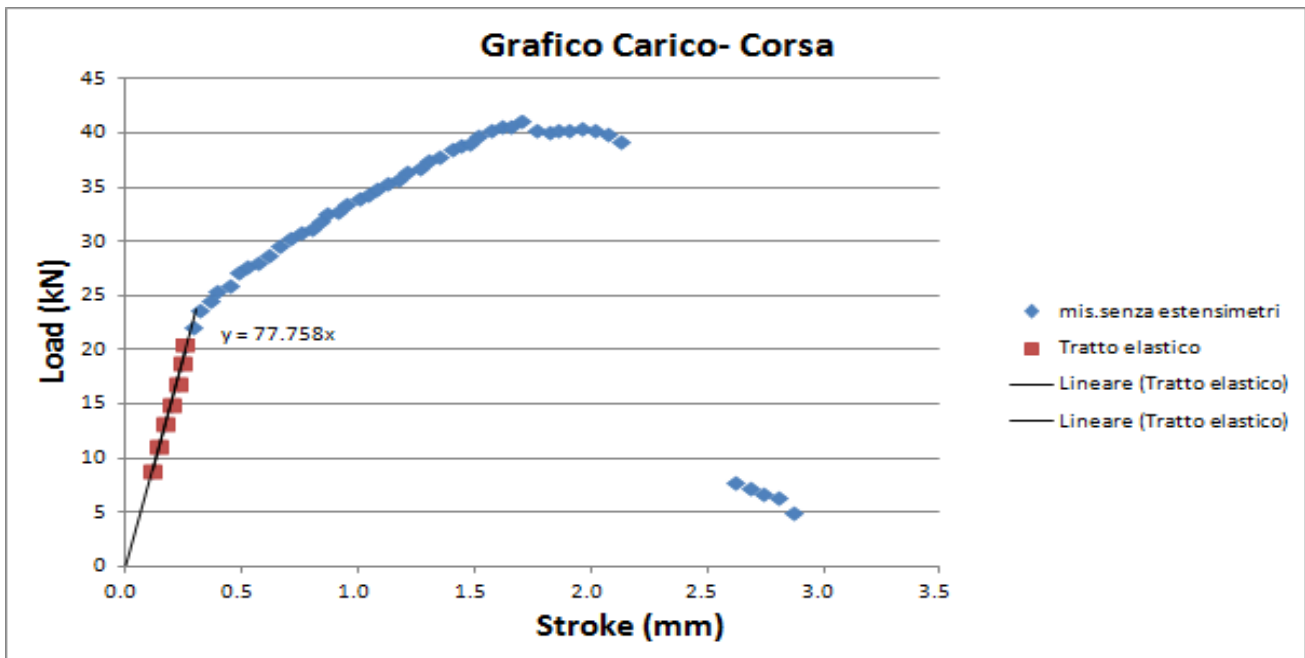


Figura 3.43: Grafico load-stroke provino 8.

Il provino 8 presentava una inclusione superficiale di grandi dimensioni, che ha compromesso le caratteristiche meccaniche, anche la superficie di rottura non è a  $45^\circ$ , si è formata tuttavia collegando i punti con minor resistenza. Le caratteristiche meccaniche riscontrate sono estremamente basse  $R_{sc}=125$  [MPa] rispetto ad un valore medio di  $R_{sc_{medio}}=148$  [MPa],  $R_{mc}=233$  [MPa] e  $R_{mc_{medio}}=452$  [MPa]. Anche l'allungamento a rottura è risultato estremamente ridotto  $e\%=4,25\%$ ,  $e\%_{medio}=7,52\%$ .

Considerati i bassi valori ottenuti, a causa delle inclusioni presenti, è stato deciso di considerare la prova nulla, non rispecchiando le effettive potenzialità della lega.

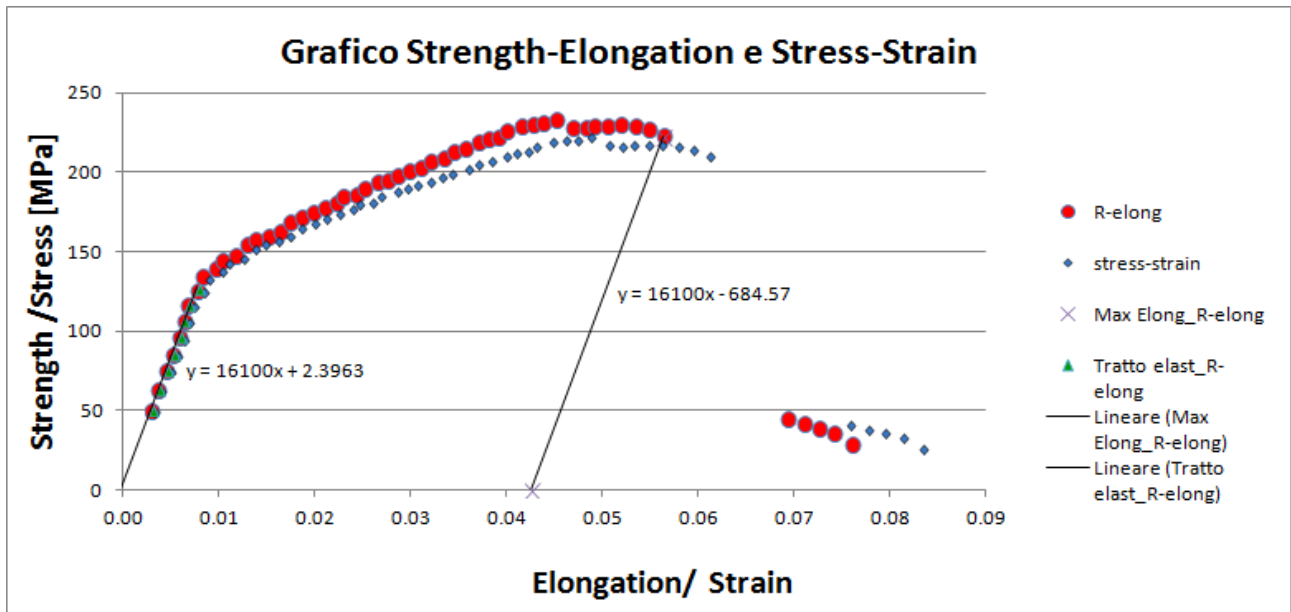


Figura 3.44: Grafico Strength-Elongation e Stress-Strain provino 8.

### Provino 9

Specimen	Initial Diameter $D_0$ (mm)	Initial Height $L_0$ (mm)	Initial Section area $A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	Final Diameter $D_f$ (mm)	Final Height $L_f$ (mm)	Final Section area $A_f$ [mm <sup>2</sup> ]
<b>9</b>	<b>14.99</b>	<b>37.76</b>	<b>176.48</b>	<b>15.19</b>	<b>35.95</b>	<b>181.22</b>

True strain @ break diameter	True strain @ break height	Elongation Diam %	Elongation @ break %	Maximum Load @ break (kN)	Rsc (MPa)	Rmc (MPa)	Maximum Stress (MPa)
<b>0.03</b>	<b>-0.05</b>	<b>1.33</b>	<b>3.76</b>	<b>48.0</b>	<b>117</b>	<b>272</b>	<b>265</b>



Figura 3.45: Provino 9 prima della prova.



Figura 3.46: Provino 9 a prova terminata.

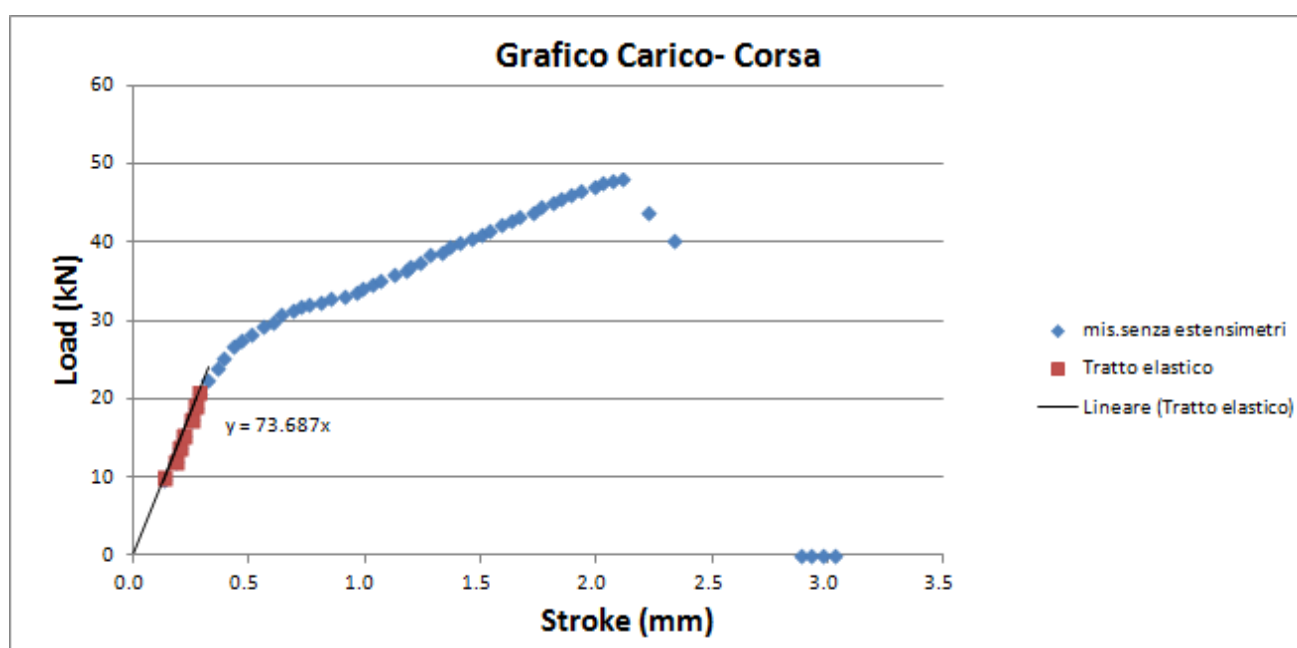


Figura 3.47: Grafico load-stroke provino 9.

Il provino 9 presentava una grande inclusione superficiale e una cavità profonda 2.6mm, l'esecuzione della prova ha provocato il distacco di una parte di materiale lungo il fianco del provino proprio in corrispondenza dell'inclusione, il piano di frattura è stato fortemente influenzato dalle inclusioni interne. Le caratteristiche meccaniche del provino sono risultate molto basse, con riduzioni del 20% della tensione di snervamento  $R_{sc}=118[\text{MPa}]$  e del 40% della tensione di rottura  $R_{mc}=272[\text{MPa}]$ , la prova è risultata fortemente compromessa dalle inclusioni e per queste ragioni non è stata considerata valida.



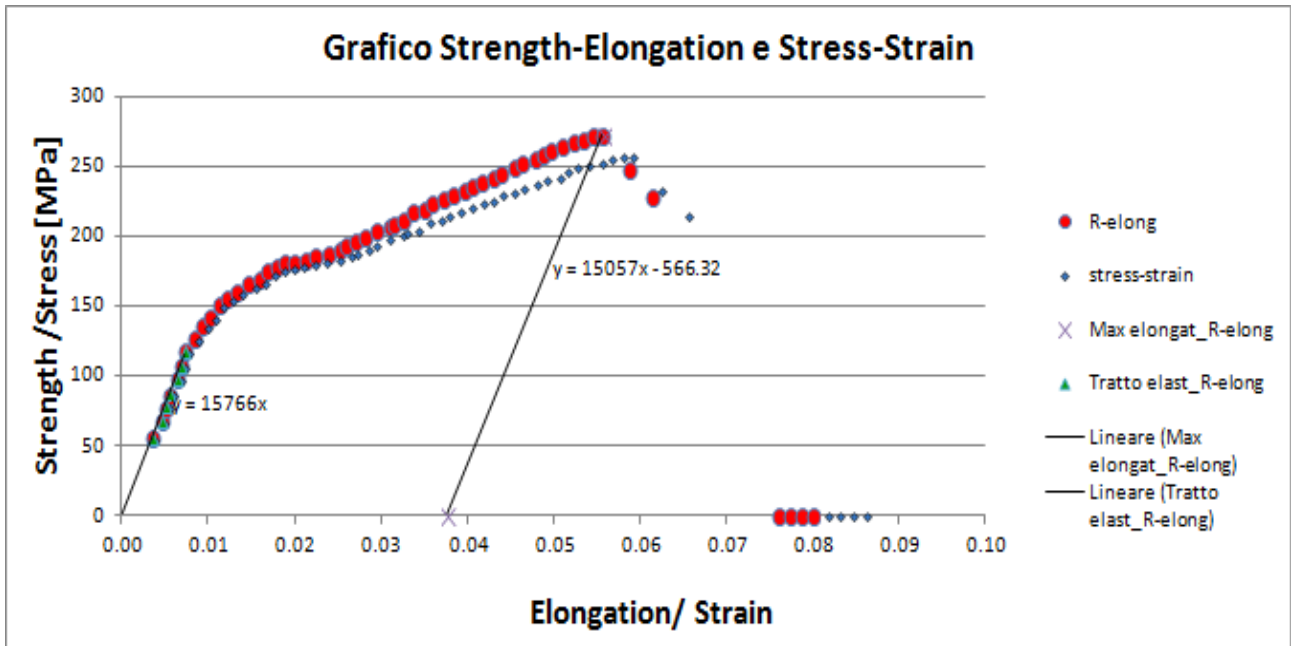


Figura 3.48: Grafico Strength-Elongation e Stress-Strain provino 9.

### 3.3.3 Trazione

Sono stati prodotti 11 provini di trazione rispettando le specifiche dimensionali determinate dalla normativa, unica differenza, alcuni provini sono stati prodotti con filettatura completa (2,9,10), altri con filettatura che termina a circa 3mm dal raggio di raccordo, come da Fig 3.2.



Figura 3.49: Provini di trazione, lato con maggiori inclusioni.

Rispetto ai provini di compressione (fig 3.14) presentano minori inclusioni superficiali.

Prima dell'inizio della prova è stata eseguita la misurazione delle dimensioni di ciascun provino, questi dati serviranno in fase di elaborazione dei risultati per calcolare tensioni e allungamenti. Le prove sono state eseguite tutte a velocità costante pari a 0.02mm/s.

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)
1	10.00	57.13	44.63
2	10.01	55.47	42.97
3	10.00	57.16	44.66
4	10.00	56.9	44.4
5	10.00	57.13	44.63
6	9.99	57.04	44.54
7	10.04	56.97	44.47
8	10.02	57.08	44.58
9	9.98	55.43	42.93
10	10.01	55.38	42.88
11	9.97	57.07	44.57

Figura 3.50: Dimensioni iniziali provini compressione.

## Provino 1

Per ciascun provino è stata prodotta una tabella con riportati tutti i dati, prima e dopo la prova e in cui sono stati inseriti anche i risultati dei calcoli.

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length $L_0$ (mm)	Estensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )
<b>1</b>	<b>10</b>	<b>57.13</b>	<b>44.63</b>	<b>25</b>	<b>9.93</b>	<b>45.12</b>	<b>78.54</b>

$A_{final}$ (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	Rst (MPa)	Rmt (MPa)	Maximum Stress @ break (MPa)	Rm break (MPa)	E [GPa]	Elongation %
<b>77.44</b>	<b>24.5</b>	<b>247</b>	<b>304</b>	<b>306</b>	<b>302</b>	<b>60</b>	<b>1.10</b>

Si è prodotta inoltre una tabella per importare ed elaborare i dati della pressa.

load [kN]	Load (N)_rel	Delta L (mm)	Delta L_rel (mm)	Strength R (Mpa)	LVDT [mm]	LVDT (mm)_rel	elongation estens	elongation LVDT	elongation estens %	elongation LVDT %
-----------	--------------	--------------	------------------	------------------	-----------	---------------	-------------------	-----------------	---------------------	-------------------

Load(i), Delta L(i), LVDT(i) sono i valori ottenuti dalla pressa, il pedice (i) indica che sono una serie di valori, di lunghezza variabile da provino a provino in funzione della durata della prova (le letture sono ogni secondo). Load rappresenta il carico applicato al

provino, valore ottenuto dalla cella di carico della pressa,  $\Delta L$  rappresenta l'allungamento del provino ottenuto dall'estensometro, LVDT indica la posizione relativa del pistone della pressa.

Il carico relativo,  $Load\_rel = load\_rel[i] - load\_rel[0]$ , serve per azzerare il carico letto a inizio prova,

$\Delta L\_relativo$  serve per azzerare la deformazione letta dall'estensometro a inizio prova,

$$\Delta L\_relativo[i] = \Delta L[i] - \Delta L[0]$$

Calcolo della tensione ingegneristica,  $Strength\ R[i] = \frac{load[i] \times 1000}{LVDT[i]}$

LVDT\_rel è utilizzato per porre a zero l'avanzamento del pistone della pressa a inizio prova,  $LVDT\ rel[i] = LVDT[i] - LVDT[0]$

L'allungamento subito dal provino e letto dall'estensometro viene determinato utilizzando la formula:  $Elongation\_estensometro = \frac{\Delta L\_relativo}{EstensometerGauge}$  dove al denominatore è riportata la lunghezza iniziale dell'estensometro.

L'allungamento subito dal provino e letto dal sensore di posizione della pressa viene determinato utilizzando la formula:  $Elongation\ LVDT = \frac{LVDTrel}{l_0} - C_v$

( $C_v$ , correzione  $elongLVDT$ , per traslare il grafico strength-elongation in modo che la linea di tendenza intersechi l'origine, considerando l'equazione della linea di tendenza nel grafico tensione-deformazione  $y=mx+q$ ,  $C_s=q/m$  vedi Fig3.47)

Per produrre grafici R-e% è necessario moltiplicare per 100 le deformazioni precedentemente ottenute, si ha quindi:

$$Elongation.Estensometro\% = elongationEstensometro \times 100$$

$$Elongation.LVDT\% = elongationLVDT \times 100$$

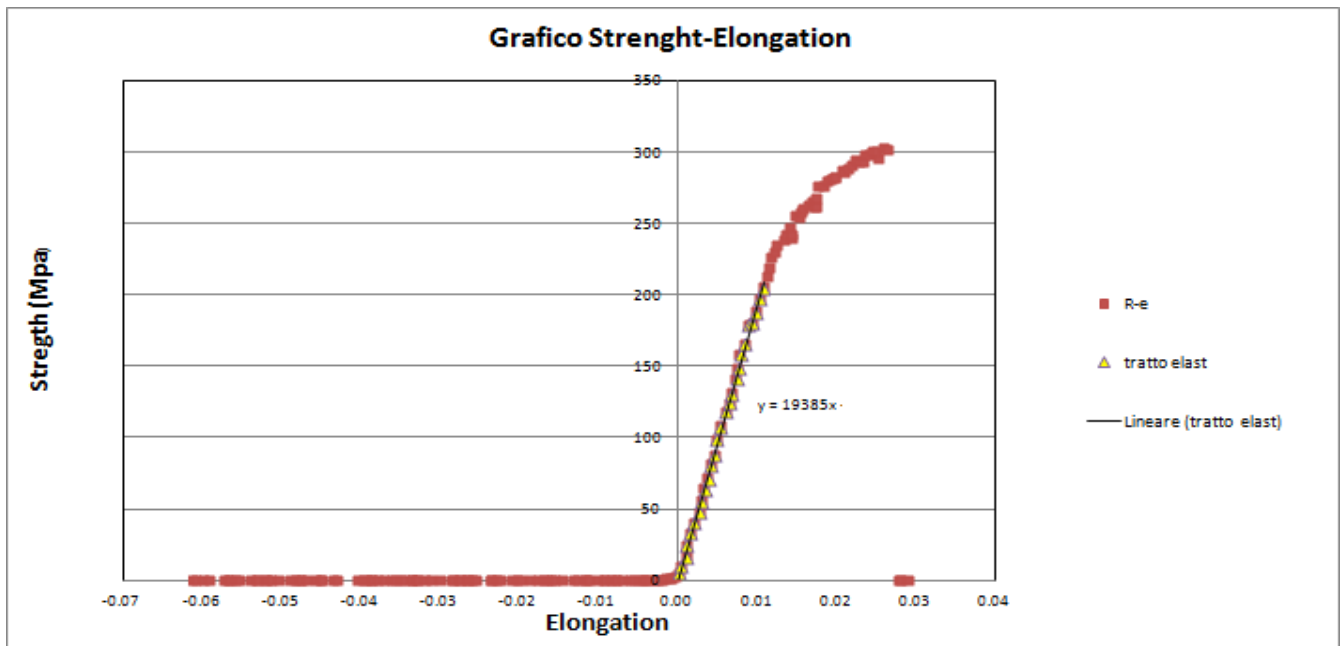


Figura 3.51: Grafico Strength-elongation LVDT, provino 1

Il grafico, come spiegato nelle formule risulta già centrato nell'origine, infatti la linea di tendenza relativa al tratto elastico (fig3.51 punti gialli) passa per l'origine degli assi, i punti precedenti, che appaiono nel secondo quadrante verranno trascurati in tutti i successivi grafici in quanto mostrano semplicemente il recupero dei giochi.

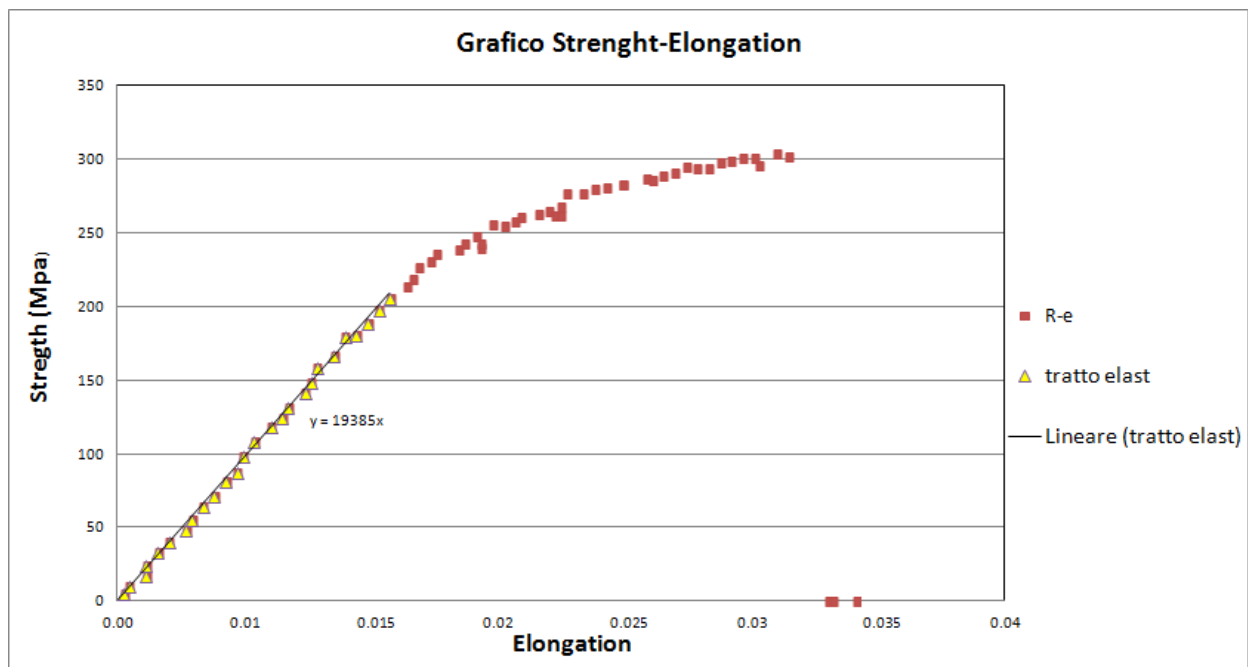


Figura 3.52: Grafico Strength-elongation LVDT, senza recupero dei giochi, provino 1

Sui provini di trazione, per avere informazioni dirette sulle deformazioni che avvengono al provino ed escludere le deformazioni subite dalla pressa si utilizza l'estensometro.

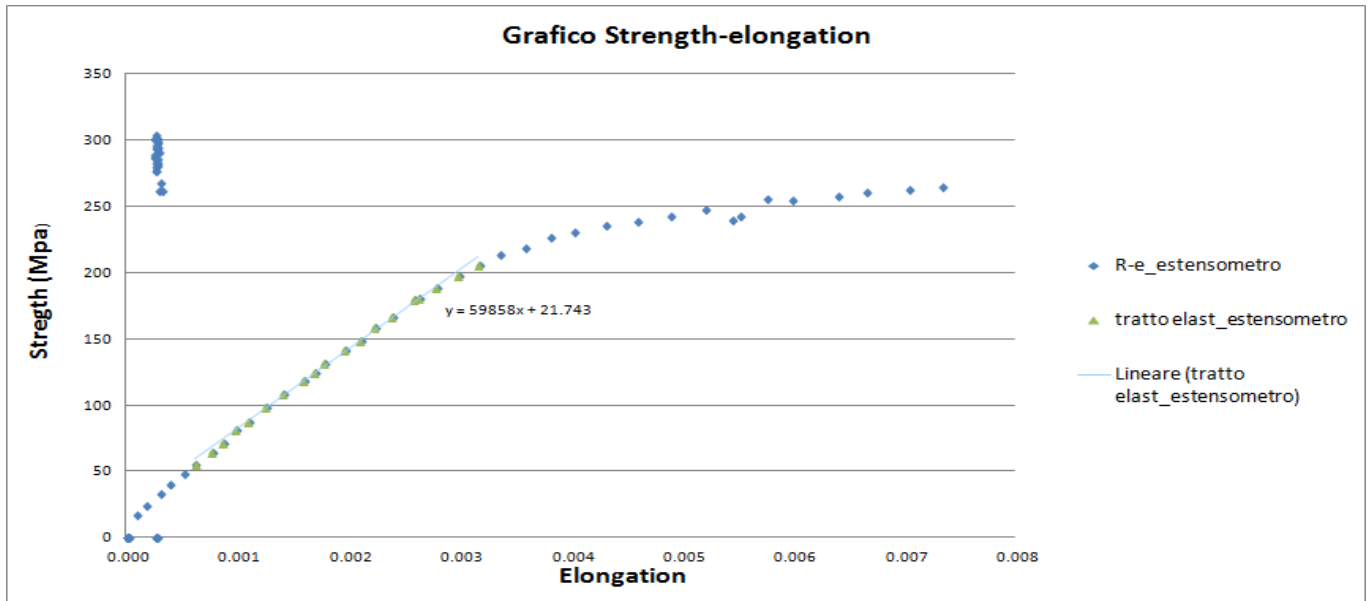


Figura 3.53: Grafico Strength-elongation estensometro provino 1.

L'estensometro non può essere tuttavia mantenuto montato sul provino fino al termine della prova in quanto la rottura del provino potrebbe causarne la rottura. Nelle prove che abbiamo eseguito, è stato rimosso quando il grafico fornito dalla pressa in tempo reale mostrava l'ingresso in campo plastico. I grafici Strength-elongation(estensometro) mostrano per questo motivo un tratto plastico molto più corto, hanno inoltre una pendenza maggiore escludendo le deformazioni non avvenute sul provino (fig3.53).

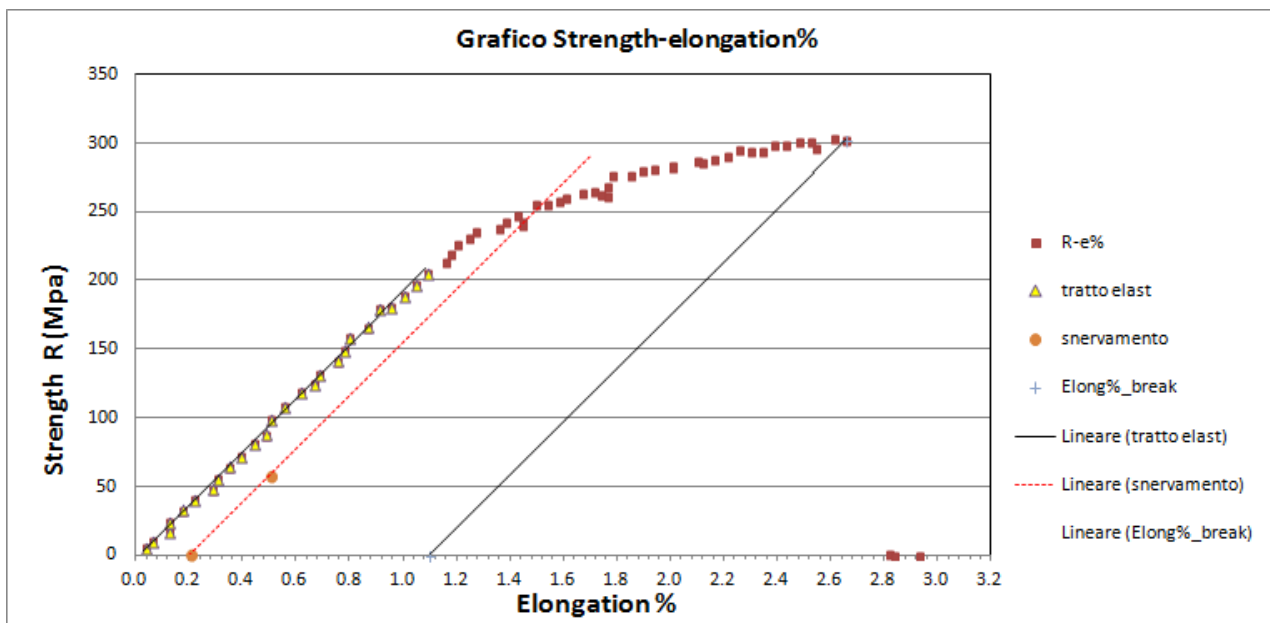


Figura 3.54:grafico Strength-elongation LVDT % provino 1.

I punti presenti sul grafico 3.53 isolati rispetto al tracciato che parte dall'origine sono causati dalla rimozione dell'estensometro e dalla prosecuzione della prova fino a rottura mantenendo come lettura della deformazione solo quella della pressa (LVDT).

Dal grafico 3.54 strength-elongation possiamo ottenere i valori di snervamento impostando una deformazione residua dello 0.2%(linea rossa tratteggiata) pari a  $R_{st}=247$  [MPa], il carico massimo a cui sopraggiunge la rottura  $R_{mt}=304$  [MPa].

Dall'analisi della superficie di rottura è possibile notare piccole inclusioni interne, le quali tuttavia non hanno influenzato le caratteristiche meccaniche del provino, le resistenze ottenute sono infatti risultate superiori rispetto alla media dei valori ottenuti. La rottura è avvenuta in prossimità del raggio di raccordo probabilmente a causa delle inclusioni superficiali.



Figura 3.55: Provino 1 a prova terminata.

## Provino 2

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)	Estensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )
2	10.01	55.47	42.97	25	9.92	43.55	78.70

$A_{final}$ (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	$R_{st}$ (MPa)	$R_{mt}$ (MPa)	Maximum Stress @ break (MPa)	$R_m$ break (MPa)	E [GPa]	Elongation %
77.29	20.5	225	260	259	254	55	1.36



Figura 3.56: Provino 2 a prova terminata.

Sulla superficie di rottura del provino si possono notare due inclusioni di piccole dimensioni, la rottura è avvenuta secondo un piano a 45°, le proprietà meccaniche risultano inferiori rispetto al provino 1 ma prossime ai valori medi.

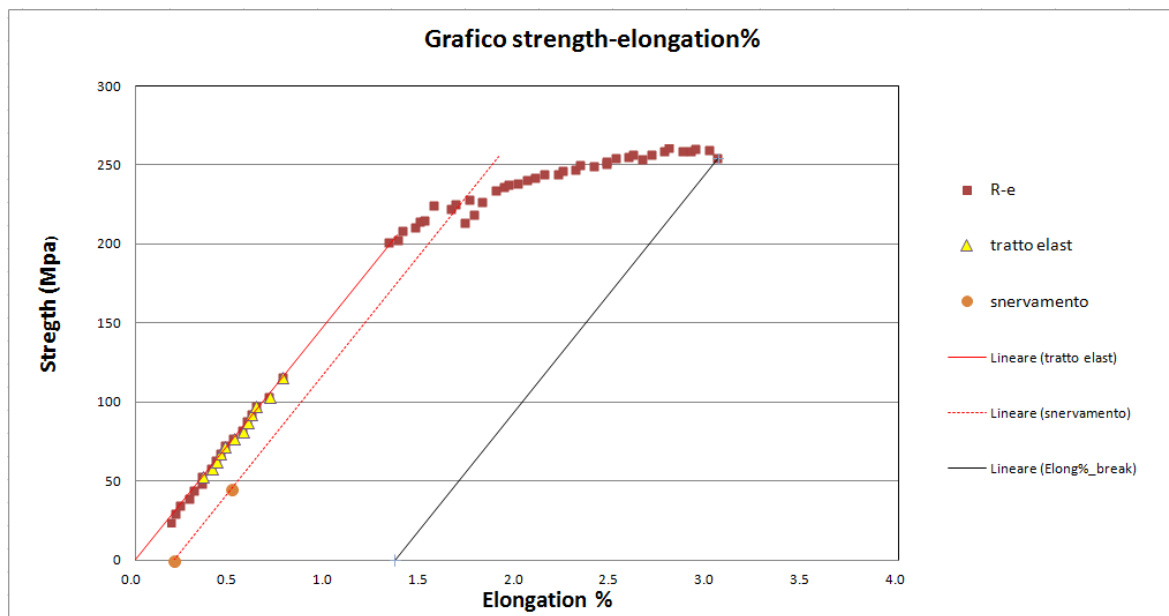


Figura 3.57: Grafico strength-elongation% LVDT provino 2.

La discontinuità nel grafico è analoga a quella riscontrata in alcuni provini di compressione, tuttavia è risultato possibile leggere comunque i valori della tensione di snervamento  $R_{st}=225\text{[MPa]}$ , di rottura  $R_{mt}=259\text{[MPa]}$  e l'allungamento a rottura  $e\%=1,36\%$  prossimi ai valori medi  $R_{st_{medio}}=225\text{[MPa]}$ ,  $R_{mt_{medio}}=280\text{[MPa]}$   $e\%=1.75\%$ . Il valore della tensione di snervamento è determinabile sia utilizzando l'LVDT sia l'estensometro.

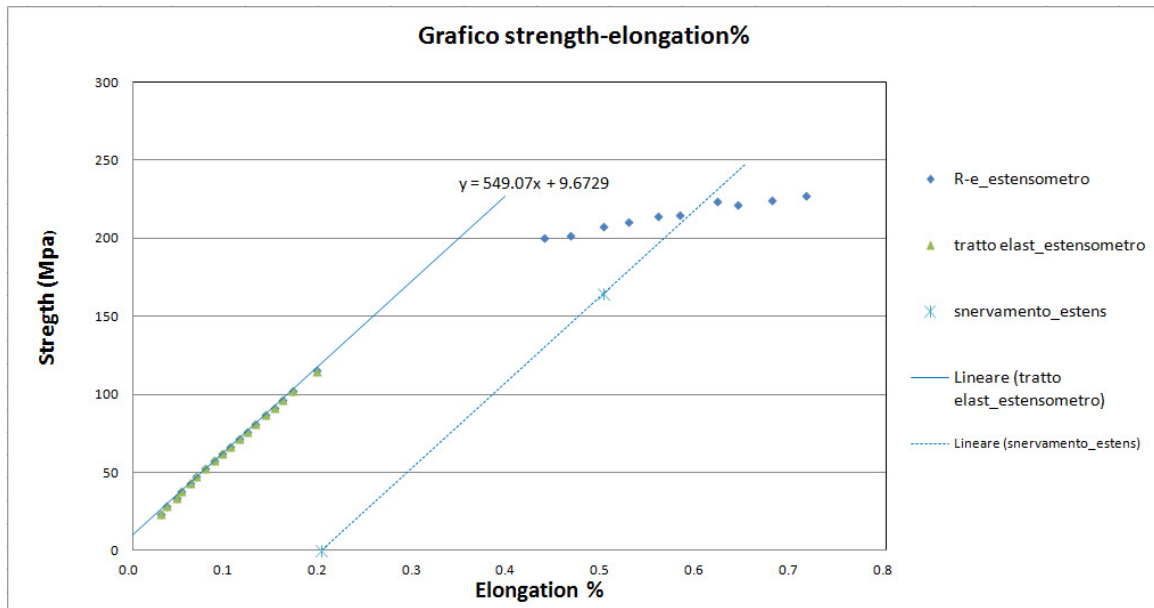


Figura 3.58: Grafico strength-elongation% estensometro provino 2.

### Provino 3

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)	Estensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )
3	10	57.16	44.66	25	9.97	44.88	78.54

A final (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	Rst (MPa)	Rmt (MPa)	Maximum Stress @ break (MPa)	Rm break (MPa)	E [GPa]	Elongation %
78.07	20.76	230	264	266	264	68	0.49



Figura 3.59: Provino 3, a prova terminata.



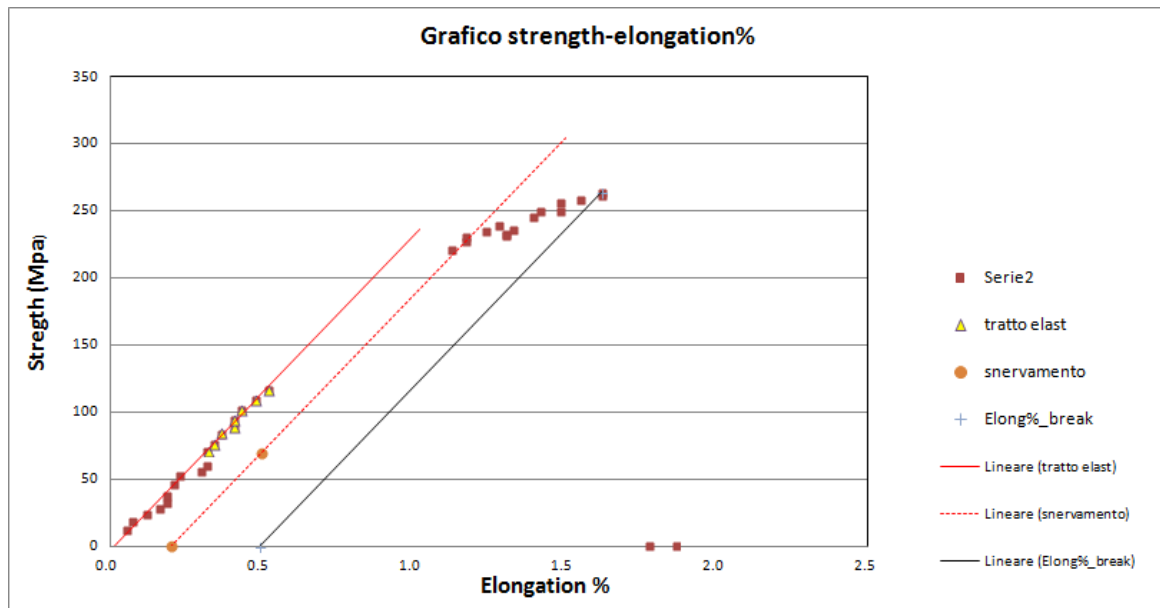


Figura 3.60: Grafico strength-elongation% LVDT provino 3.

La superficie di rottura risulta normale alla direzione di applicazione del carico, è possibile notare la presenza di un ossido di grandi dimensioni in prossimità della superficie laterale del provino il quale non ha provocato però la riduzione delle caratteristiche meccaniche infatti  $R_{st}=230\text{[MPa]}$ ,  $R_{mt}=264\text{[MPa]}$  a fronte di valori medi,  $R_{st_{medio}}=225\text{[MPa]}$ ,  $R_{mt_{medio}}=280\text{[MPa]}$ . L'inclusione ha tuttavia ridotto l'allungamento a rottura infatti  $e\%=0.5\%$  dato riscontrabile anche osservando il grafico Strength-elongation fig.3.60.

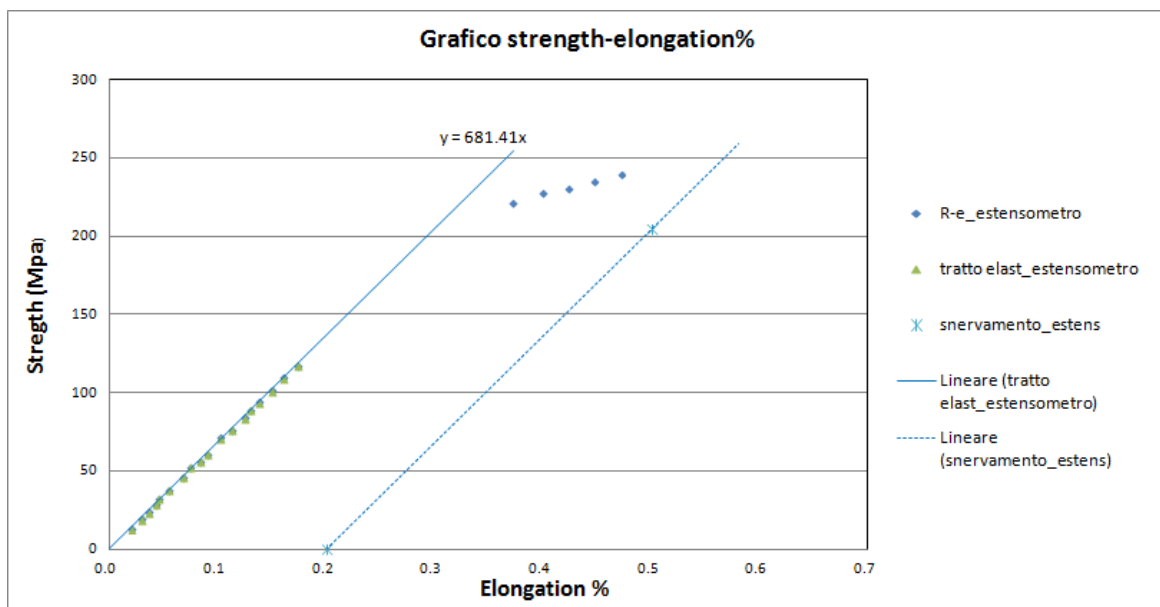


Figura 3.61: Grafico strength-elongation% estensometro provino 3.

## Provino 4

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)	Estensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )
4	10	56.9	44.4	25	9.74	46.17	78.54

A final (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	Rst (MPa)	Rmt (MPa)	Maximum Stress @ break (MPa)	Rm break (MPa)	E [GPa]	Elongation %
74.51	22.9	210	292	304	289	54	3.99



Figura3.62: Provino 4 a prova terminata.

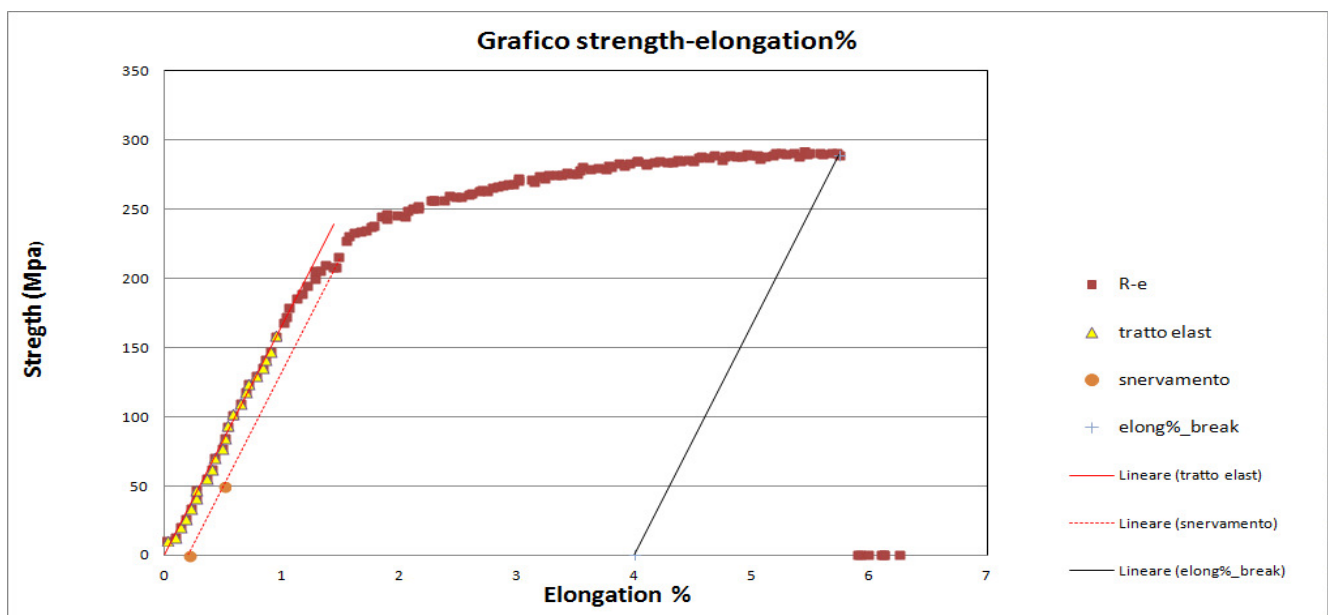


Figura 3.63: Grafico strength-elongation % LVDT provino 4.

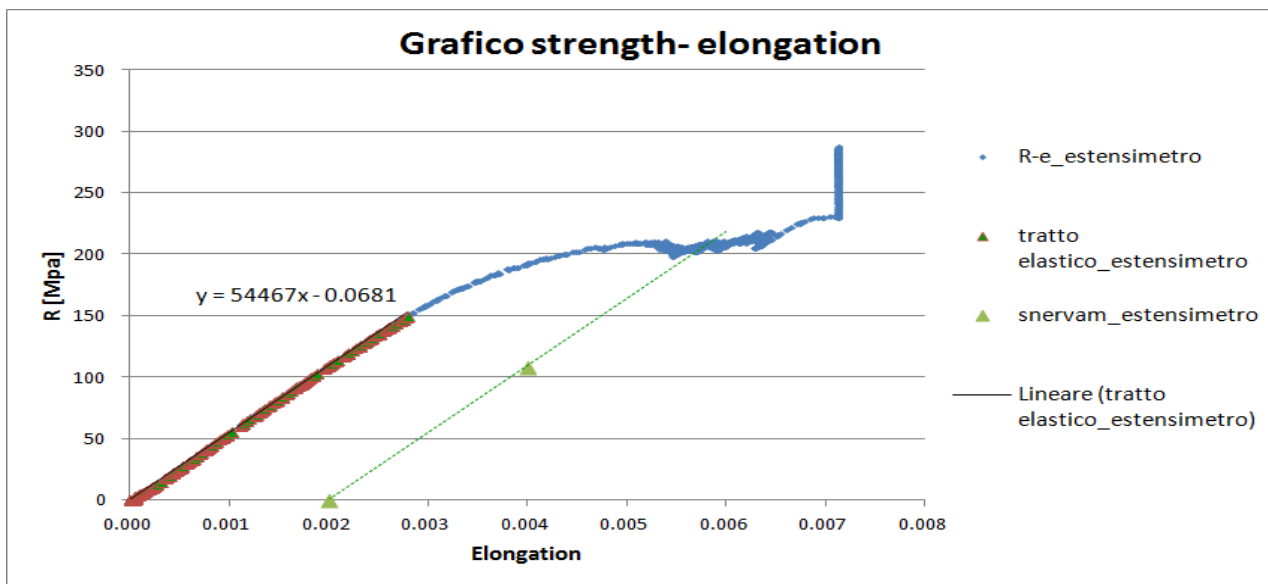


Figura 3.64: Grafico strength-elongation% estensimetro provino 4.

Al provino 4 era stato applicato un estensimetro al fine di confermare i dati ottenuti dall'estensometro. La volontà era di confrontare i valori del modulo di Young ottenuti con i due strumenti per verificarne la corrispondenza, i valori ottenuti sono 54GPa e 56GPa con una differenza inferiore al 4%, confermando quindi la validità dei risultati ottenuti con l'estensometro.

La superficie di frattura risulta inclinata a  $45^\circ$  sulla quale è possibile osservare alcune piccole inclusioni interne, le tensioni meccaniche ottenute dalla prova sono prossime ai valori medi delle prove, infatti  $R_{st}=210$ [MPa],  $R_{mt}=292$ [MPa], l'allungamento a rottura raggiunto in questa prova risulta essere uno dei più elevati tra le prove eseguite,  $e\%=3,99\%$  ottenibile da grafico strength-elongation fig3.63.

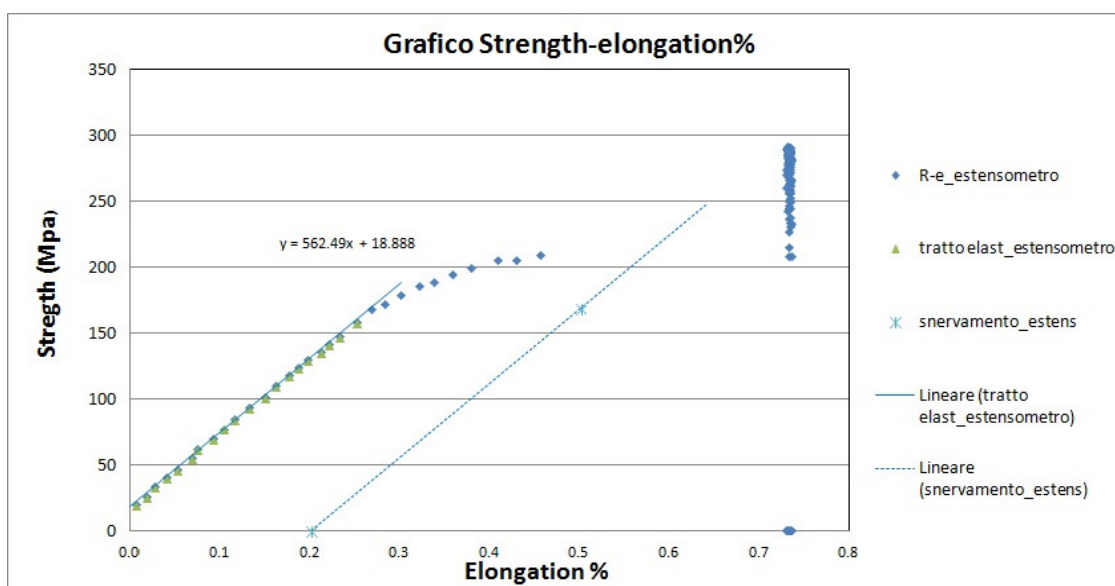


Figura 3.65: Grafico strength-elongation provino 4.

## Provino 5

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)	Estensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )
5	10	57.13	44.63	25	9.91	45.17	78.54

A final (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	Rst (MPa)	Rmt (MPa)	Maximum Stress @ break (MPa)	Rm break (MPa)	E [GPa]	Elongation %
77.13	24.3	245	309	314	309	60	1.21



Figura 3.66: Provino 5 a prova terminata.

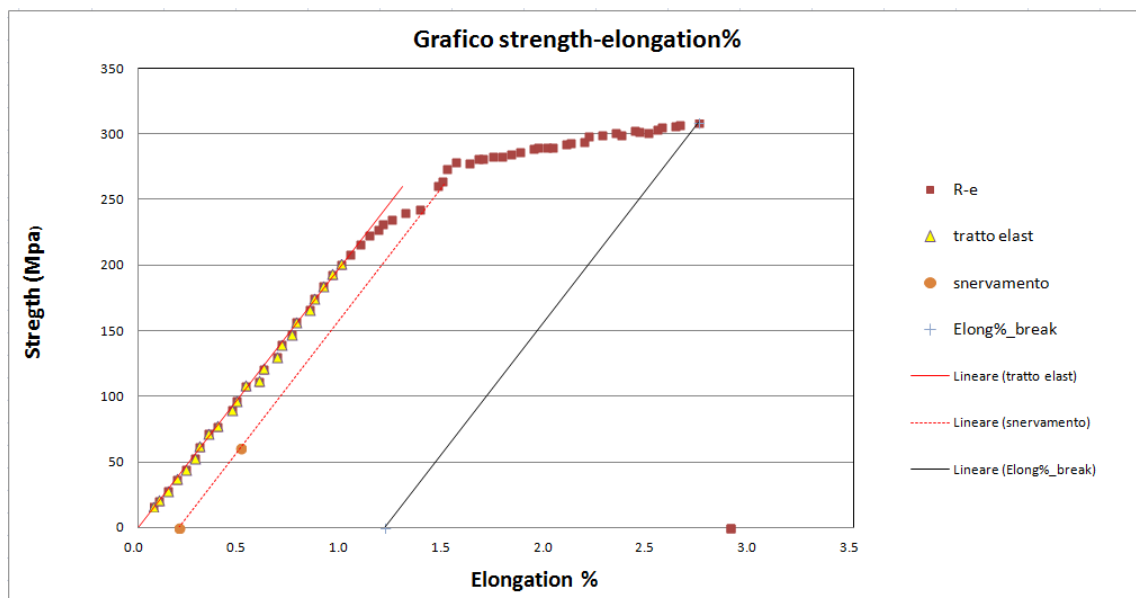


Figura 3.67: Strength-elongation% LVDT provino 5.

Il provino 5 presenta un'inclusione interna di piccole dimensioni, la rottura è avvenuta perpendicolarmente alla direzione di applicazione del carico, le tensioni rilevate sono tra le più elevate ottenute,  $R_{st}=245$  [MPa],  $R_{mt}=309$  [MPa] a fronte di valori medi,  $R_{st_{medio}}=225$  [MPa],  $R_{mt_{medio}}=280$  [MPa] l'allungamento a rottura  $e\%=1,2\%$ .

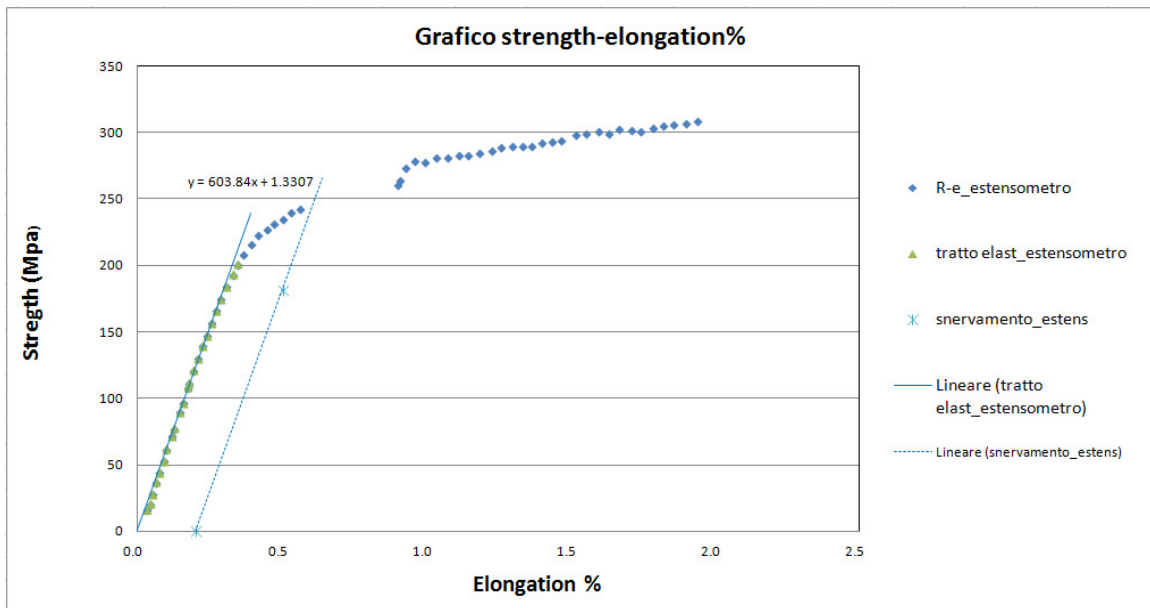


Figura 3.68: Grafico strength-elongation% estensometro provino 5.

### Provino 6

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)	Estensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )
6	9.99	57.04	44.54	25	9.9	45.06	78.38

A final (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	Rst (MPa)	Rmt (MPa)	Maximum Stress @ break (MPa)	Rm break (MPa)	E [GPa]	Elongation %
76.98	20.7	217	264	269	264	55	1.17

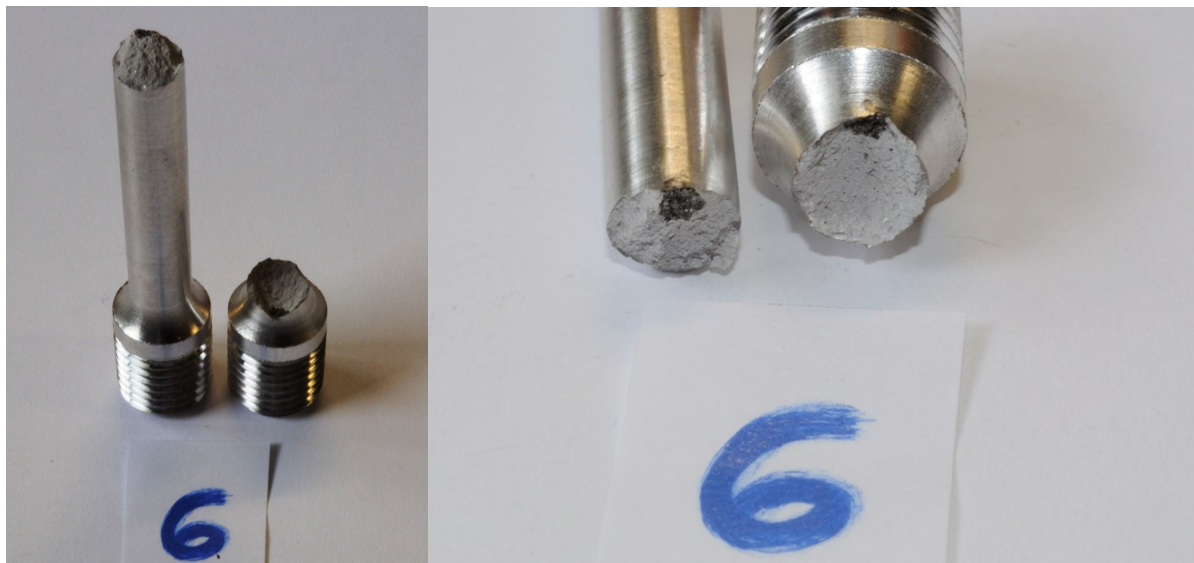


Figura 3.69: Provino 6 a prova terminata.

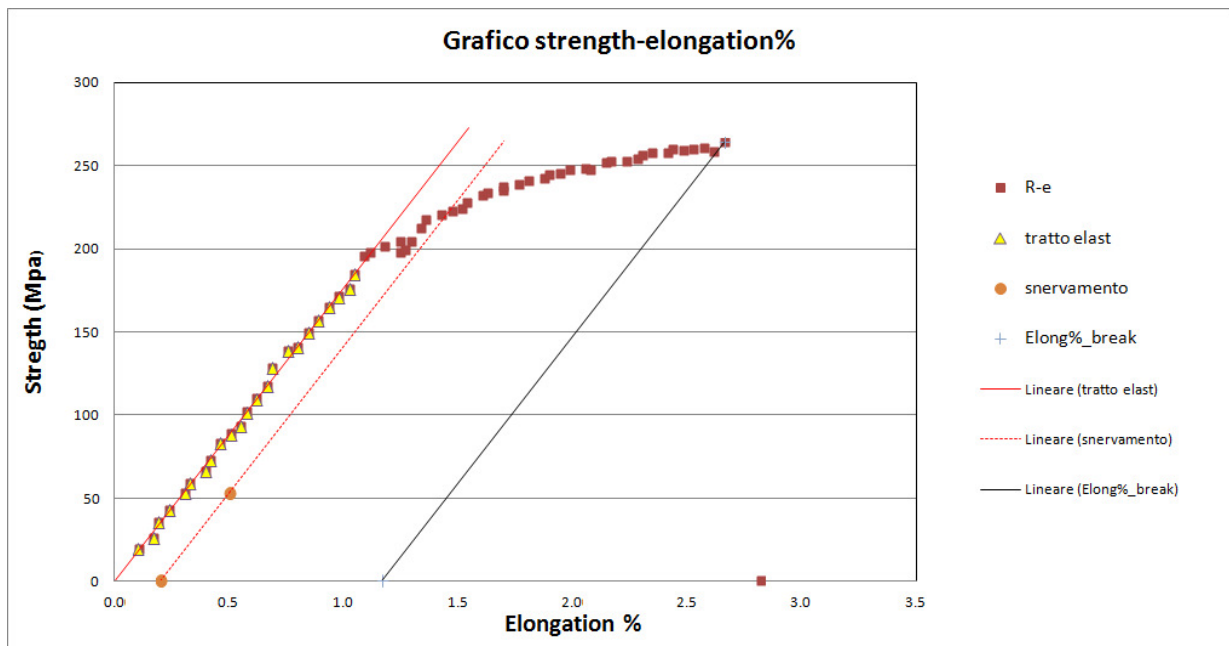


Figura 3.70: Grafico strength-elongation% LVDT provino 6.

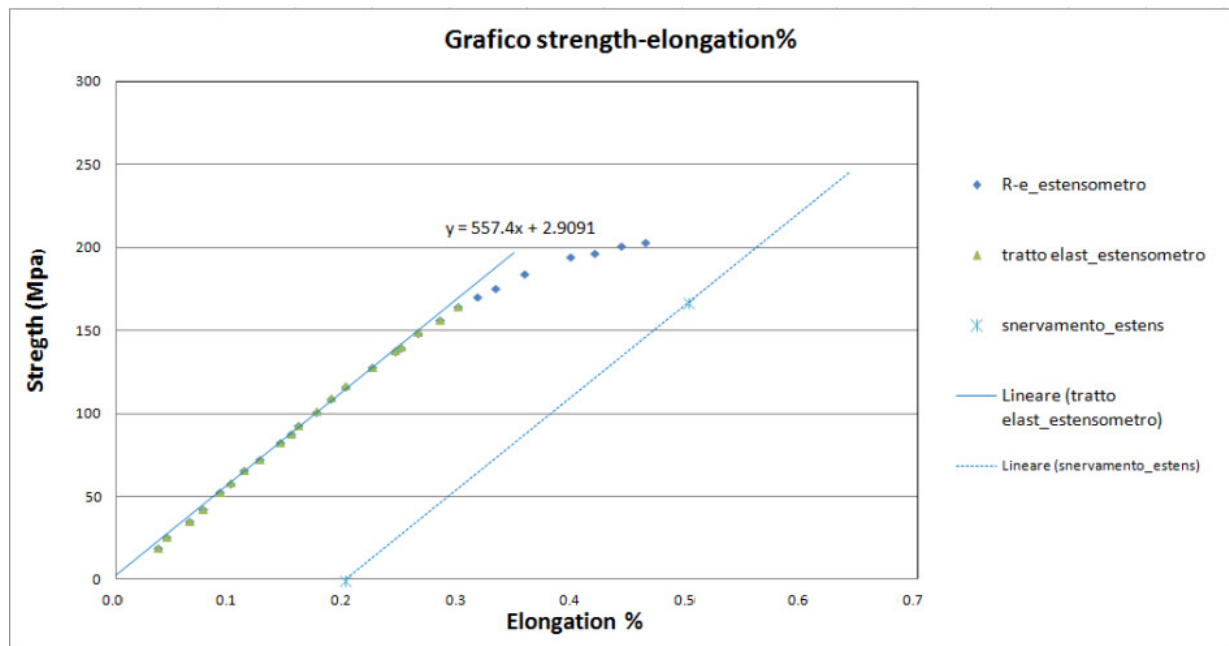


Figura 3.71: Grafico strength-elongation% estensometro provino 6.

Il provino 6 evidenzia la presenza di un'inclusione di modeste dimensioni sulla superficie di frattura la quale non ha tuttavia prodotto un decadimento delle proprietà meccaniche. Dall'analisi della superficie di frattura è possibile determinare che la rottura è avvenuta in maniera duttile innescata tuttavia dall'inclusione. Le caratteristiche meccaniche rilevate sono prossime ai valori medi infatti  $R_{st}=217$  [MPa],  $R_{mt}=264$  [MPa] a fronte di valori medi,  $R_{st_{medio}}=225$  [MPa],  $R_{mt_{medio}}=280$  [MPa]

## Provino 7

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)	Estensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )
7	10.04	56.97	44.47	25	10.04	44.51	79.17

A final (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	Rst (MPa)	Rmt (MPa)	Maximum Stress @ break (MPa)	Rm break (MPa)	E [GPa]	Elongation %
79.17	10.1	128	128	128	128	49	0.08



Figura 3.72: Provino 7 a prova terminata.

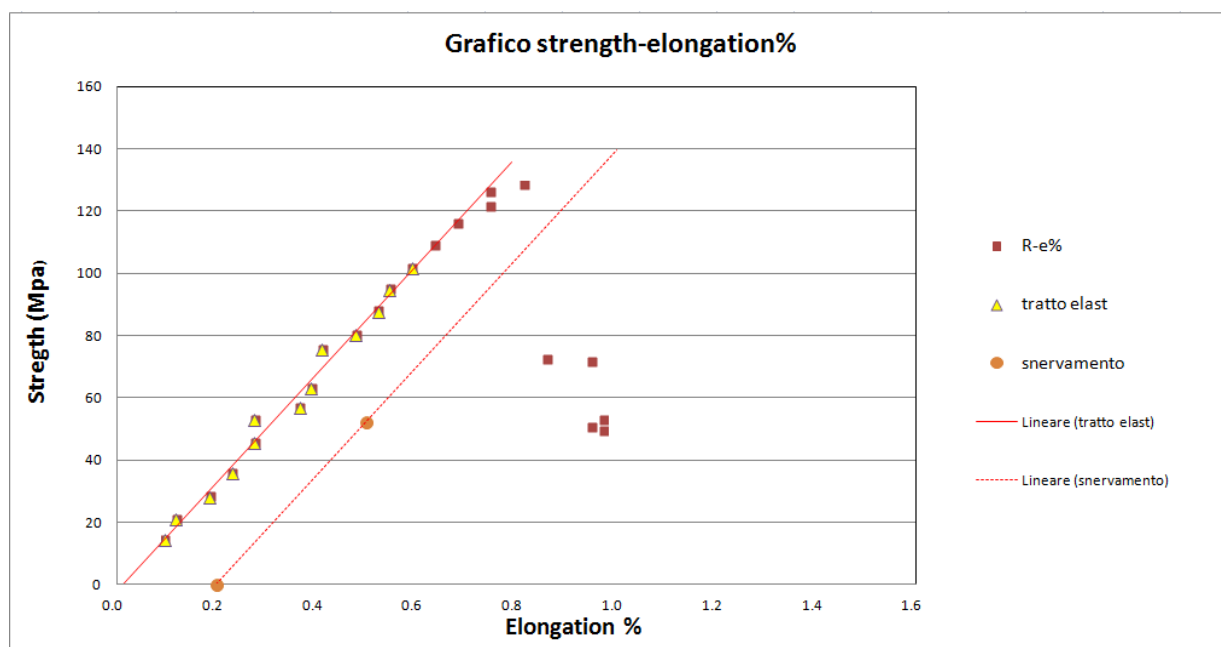


Figura 3.73: Grafico strength-elongation% LVDT provino 7.

Dall'analisi della superficie di frattura è possibile osservare la presenza di una inclusione di grandi dimensioni, la superficie di rottura risulta inoltre inclinata a 45°. La rottura è avvenuta in maniera fragile a causa proprio dell'inclusione, la quale ha prodotto inoltre una riduzione del 45% della tensione di snervamento e 55% della tensione di rottura, infatti,  $R_{st}=128$  [MPa],  $R_{mt}=128$  [MPa] a fronte di valori medi,  $R_{st_{medio}}=225$  [MPa],  $R_{mt_{medio}}=280$  [MPa] l'allungamento  $e\%=0.08\%$  dalle considerazioni appena riportate è evidente che la riduzione è stata causata dalla presenza dell'inclusione e non rispecchia le effettive caratteristiche della lega, la prova è stata quindi considerata nulla.

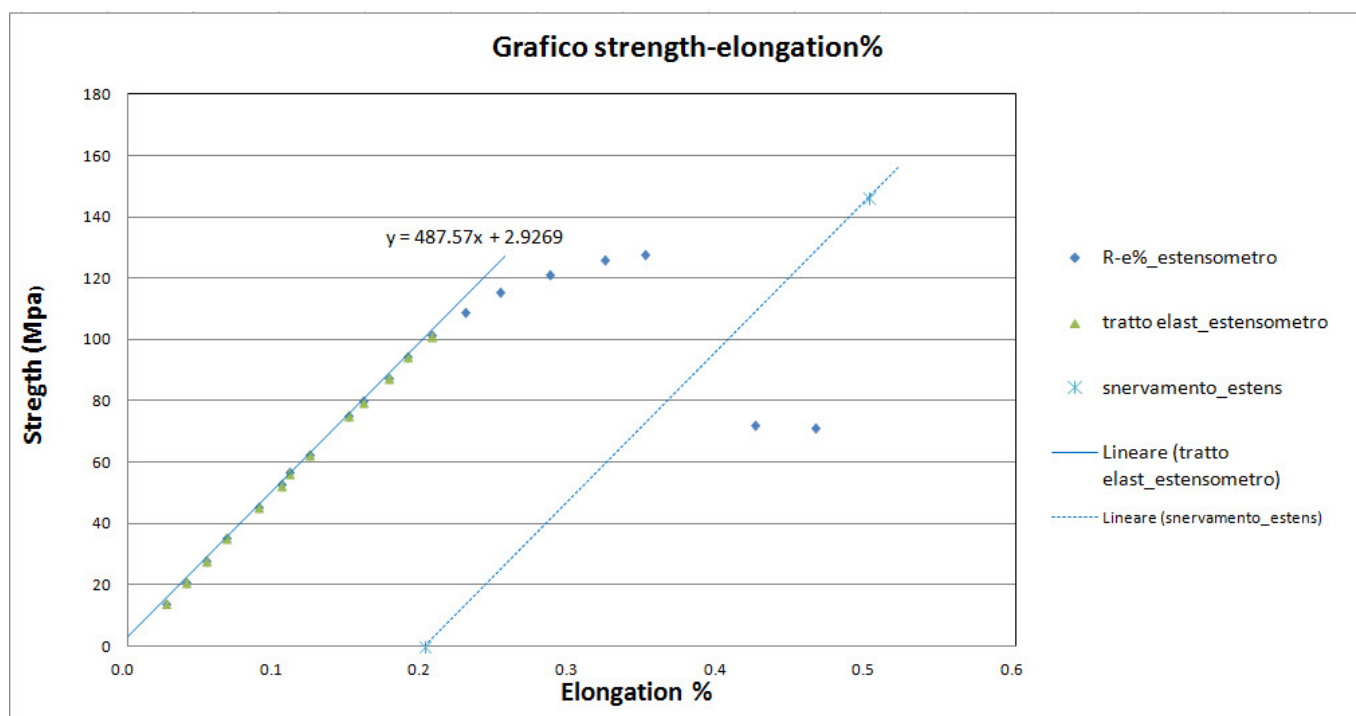


Figura 3.74: Grafico strength-elongation% estensometro provino 7.

## Provino 8

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)	Extensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )
8	10.02	57.08	44.58	25	9.94	45.19	78.85

$A$ final (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	$R_{st}$ (MPa)	$R_{mt}$ (MPa)	Maximum Stress @ break (MPa)	$R_m$ break (MPa)	$E$ [GPa]	Elongation %
77.6	20.7	215	263	262	258	56	1.38





Figura 3.75: Provino 8 a prova terminata.

La presenza di un'inclusione di modeste dimensioni non ha influenzato la resistenza meccanica del provino che risulta comunque prossima alla media delle prove precedenti infatti  $R_{st}=215$  [MPa],  $R_{mt}=263$  [MPa] a fronte di valori medi,  $R_{st_{medio}}=225$  [MPa],  $R_{mt_{medio}}=280$  [MPa], la rottura è avvenuta principalmente secondo un piano perpendicolare a quello di applicazione del carico innescato tuttavia in prossimità dell'inclusione superficiale.

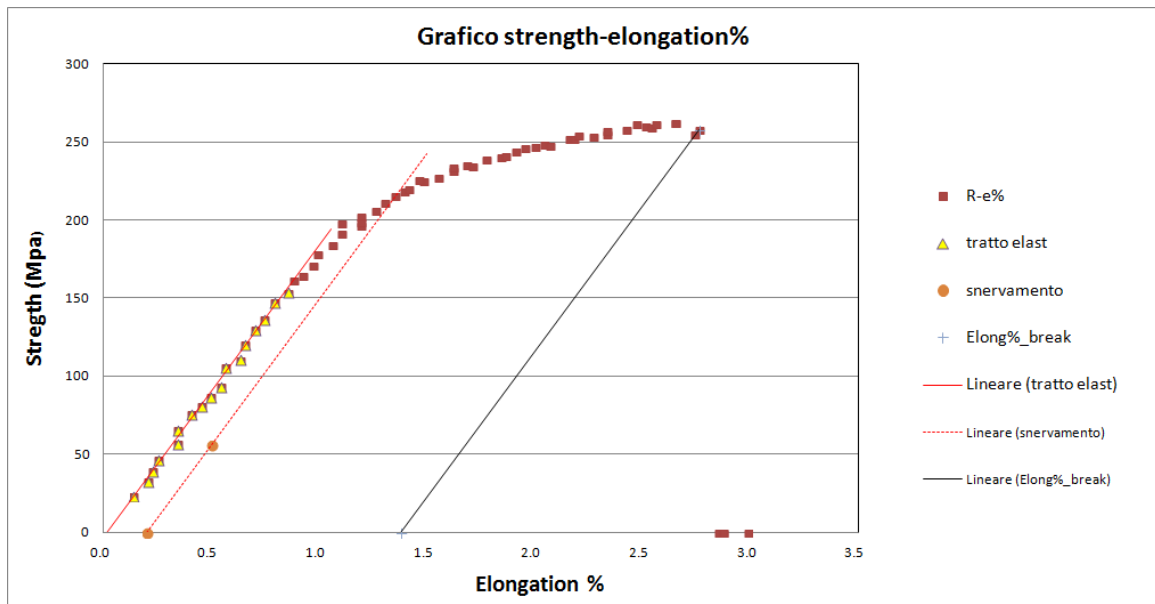


Figura 3.76: Grafico strength-elongation% LVDT provino 8.

Il grafico strength-elongation% evidenzia una deformazione plastica a rottura  $e\%=1.38\%$  inferiore solo a quella ottenuta dai provini 4 e 9.

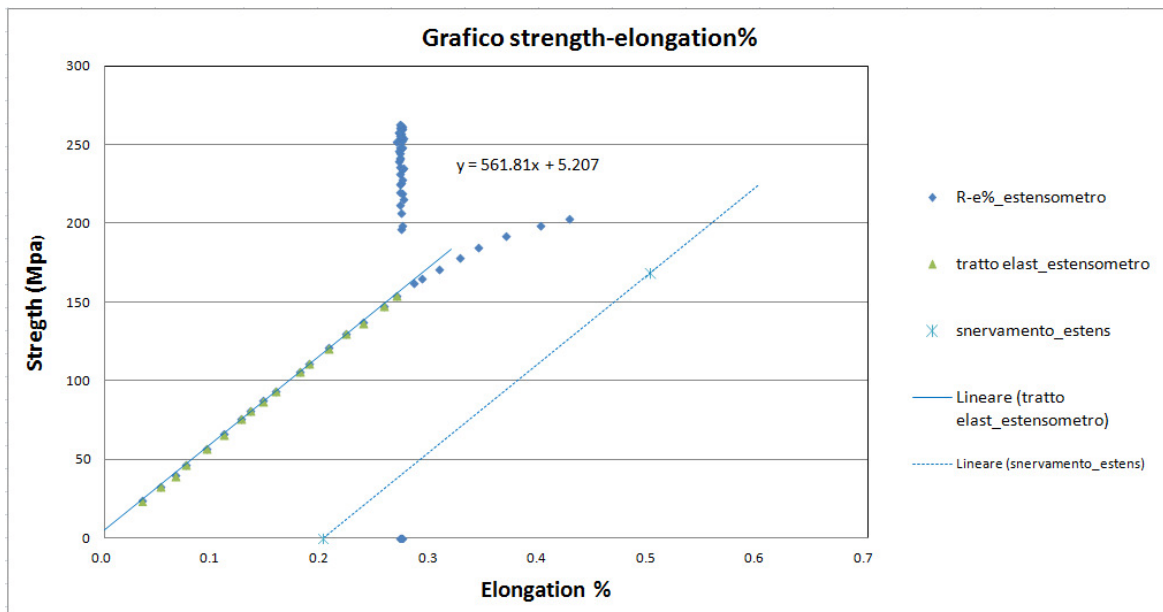


Figura 3.77: Grafico strength-elongation% estensometro provino 8.

### Provino 9

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)	Estensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	A <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )
9	9.98	55.43	42.93	25	9.8	44.38	78.23

A final (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	R <sub>st</sub> (MPa)	R <sub>mt</sub> (MPa)	Maximum Stress @ break (MPa)	R <sub>m</sub> break (MPa)	E [GPa]	Elongation %
75.43	22.2	215	284	292	282	57	3.38



Figura3.78: Provino 9 a prova terminata.

La rottura è avvenuta secondo la direzione normale a quella di applicazione del carico, l'assenza di inclusioni ha quindi permesso di ottenere una rottura maggiormente duttile con un allungamento percentuale  $e\%=3,4\%$ . Le tensioni di snervamento e rottura

risultano prossime ai valori medi infatti  $R_{st}=215\text{[MPa]}$ ,  $R_{mt}=284\text{[MPa]}$  a fronte di valori medi,  $R_{st_{medio}}=225\text{[MPa]}$ ,  $R_{mt_{medio}}=280\text{[MPa]}$ .

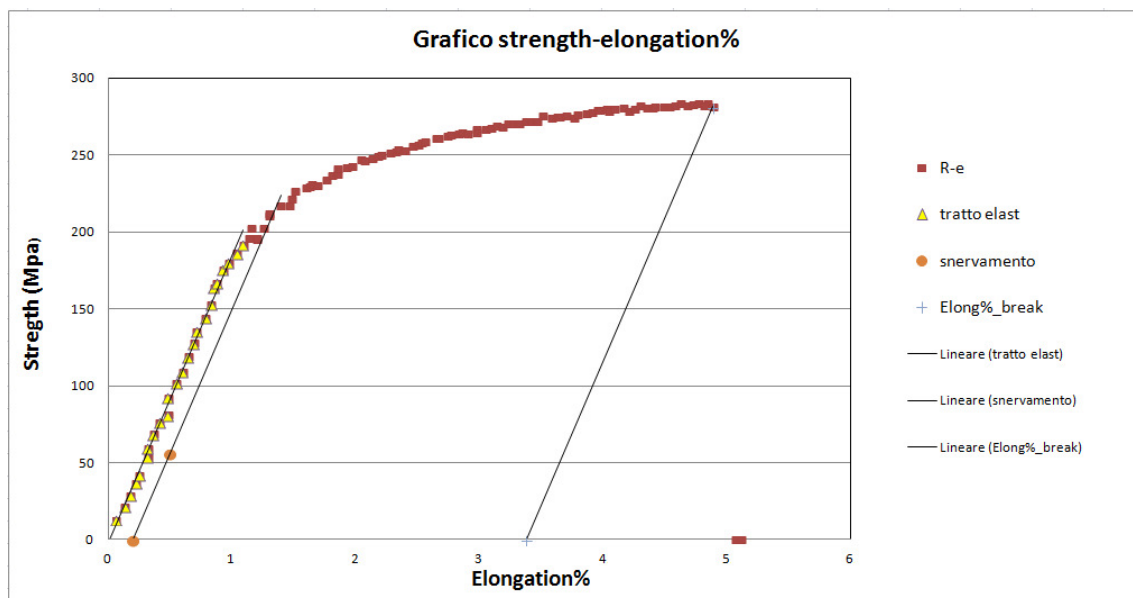


Figura 3.79: Grafico strength-elongation% LVDT provino 9.

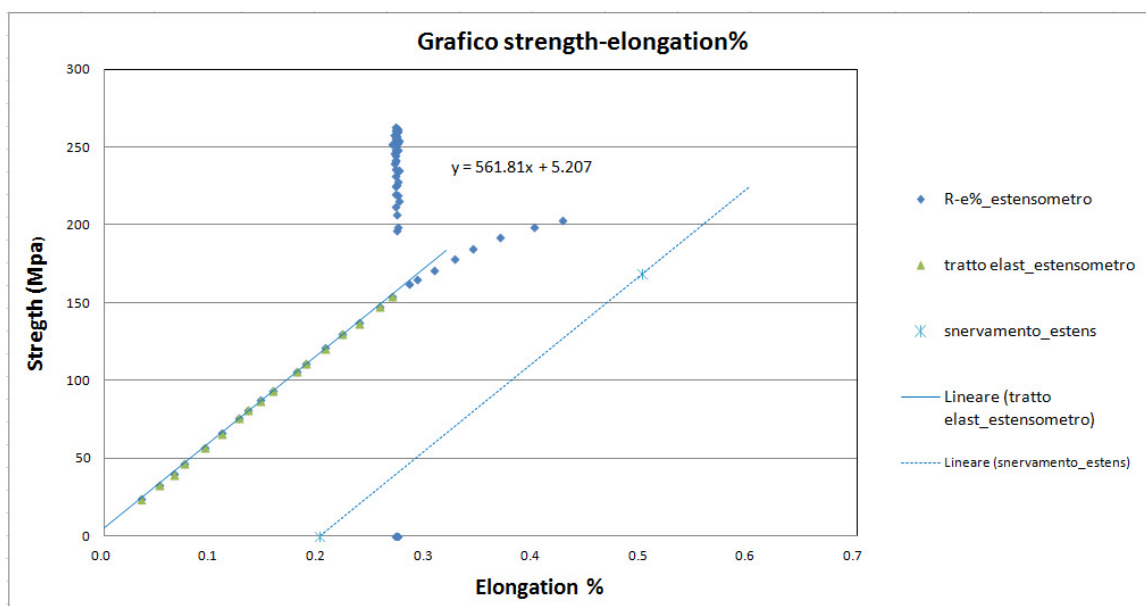


Figura 3.80: Grafico strength-elongation% estensometro provino 9.

L'estensometro è stato rimosso dal provino, quando ancora non era stata raggiunta la deformazione permanente dello 0.2%, per questo motivo dal relativo grafico (fig 3.80 strength-elongation) non è possibile leggere il carico di snervamento, ottenibile comunque dal grafico 3.79, ottenuto con LVDT.

## Provino 10

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)	Estensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )
10	10.01	55.38	42.88	25	10.01	43.03	78.70

A final (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	Rs [Mpa]	Rst (MPa)	Rmt (MPa)	Rm break (MPa)	E [GPa]	Elongation %
78.70	9.2	117	115.	107	107	52	0.36



Figura 3.81: Provino 10 a prova terminata.

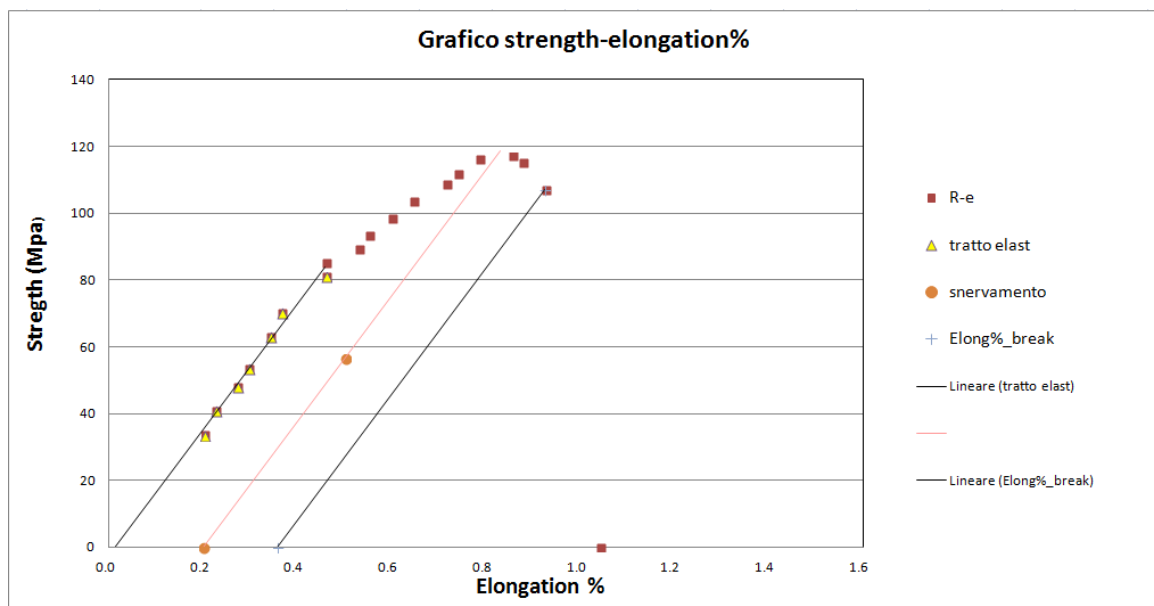


Figura 3.82: Grafico Strength-elongation% LVDT provino 10.

La superficie di rottura risulta normale alla direzione di applicazione del carico ed evidenzia un'inclusione di grandi dimensioni, la rottura è avvenuta in maniera fragile con un allungamento residuo  $e\%=0.35\%$ , anche le tensioni riscontrate sono risultate estremamente basse infatti  $R_{st}=115\text{[MPa]}$ ,  $R_{mt}=107\text{[MPa]}$  a fronte di valori medi,  $R_{st_{medio}}=225\text{[MPa]}$ ,  $R_{mt_{medio}}=280\text{[MPa]}$ . A causa delle considerazioni fatte, le tensioni riscontrate dal provino 10 non rispecchiano le effettive potenzialità della lega e sono state compromesse dall'inclusione, per questo motivo la prova è stata considerata nulla.

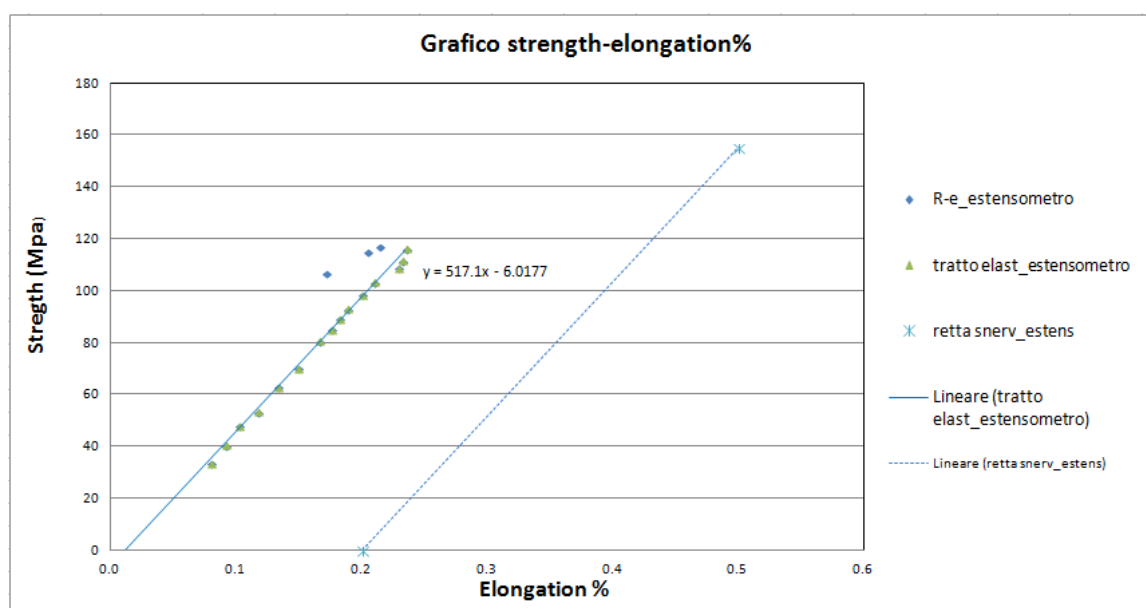


Figura 3.83: Grafico strength-elongation% estensometro provino 10.

## Provino 11

Specimen	Initial Diameter (mm)	Initial gauge+radii length (mm)	Initial gauge length (mm)	Estensometer gauge (mm)	Final Diameter (mm)	Final gauge length (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )
11	9.97	57.07	44.57	25	9.97	44.61	78.07

A final (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	$R_{st}$ (MPa)	$R_{mt}$ (MPa)	Maximum Stress @ break (MPa)	$R_m$ break (MPa)	E [GPa]	Elongation %
78.07	11	140	140	140	140	43	0.09

Dall'analisi della superficie di rottura, che anche in questo caso risulta normale alla direzione di applicazione del carico, è evidente la presenza di una inclusione di grandi dimensioni che ha compromesso le caratteristiche meccaniche del provino infatti  $R_{st}=140\text{[MPa]}$ ,  $R_{mt}=140\text{[MPa]}$  a fronte di valori medi,  $R_{st_{medio}}=225\text{[MPa]}$ ,

$R_{mt\_medio} = 280 [MPa]$ . I risultati ottenuti, estremamente compromessi dai difetti interni hanno reso la prova nulla.

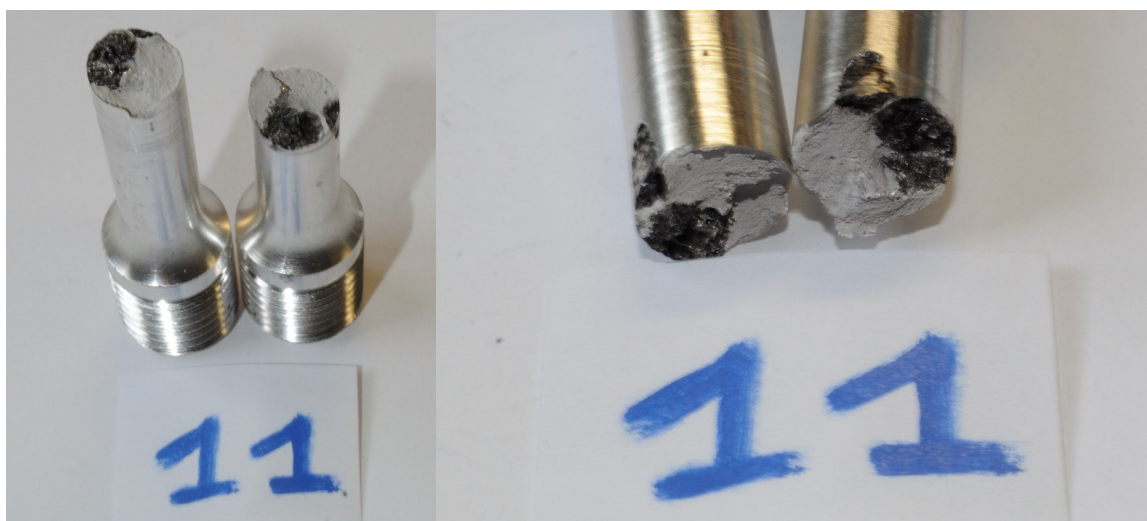


Figura 3.84: Provino 11 a prova terminata.

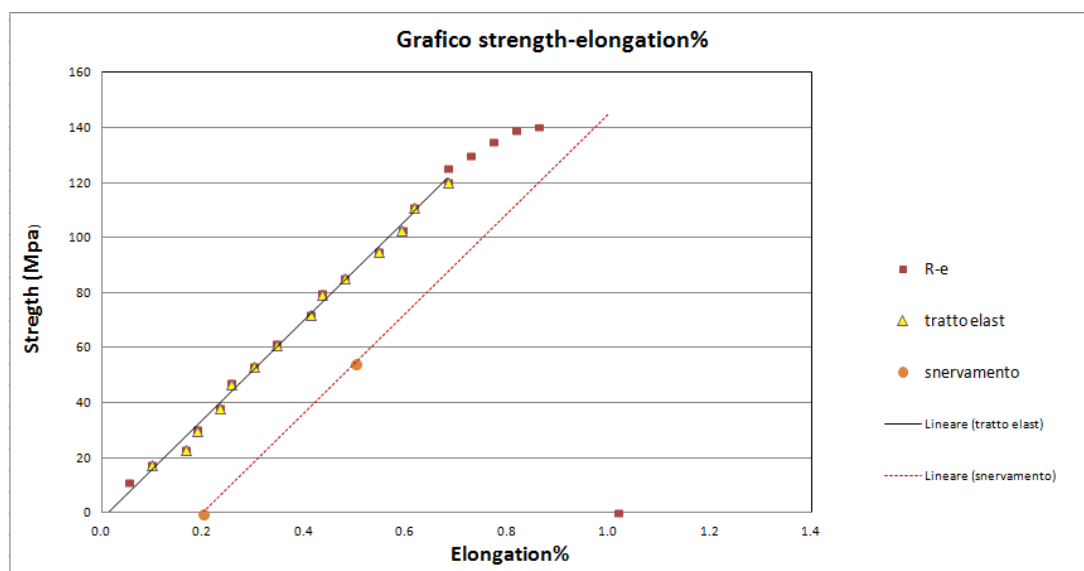


Figura 3.85: Grafico strength-elongation% LVDT provino 11.

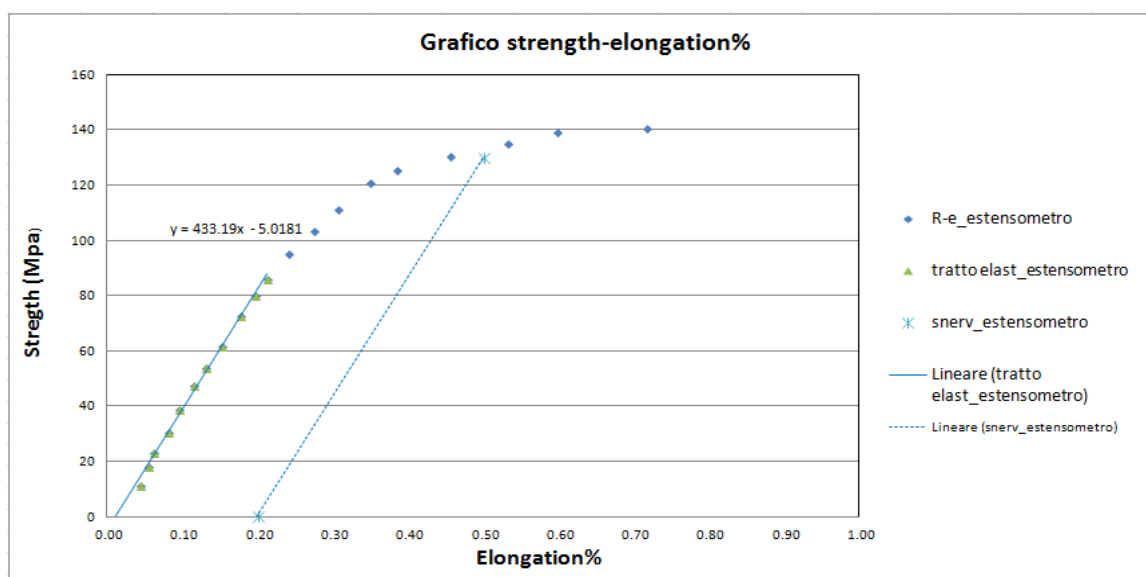


Figura 3.86: Grafico strength-elongation% estensometro provino 11.

### 3.5 CONFRONTO DEI RISULTATI

Specimen	Elongation %	Maximum Load @ break (kN)	Rsc (MPa)	Rmc (MPa)	Elastic Modulus [Gpa]	Maximum Stress @ break (MPa)
1	9.71	81.2		458	82.980	430
2	6.00	78.1	145	440		407
3	7.52	82.3	162	466		431
4	5.05	68.1	145	387		364
5	7.21	85.8	159	486		446
6	7.07	80.4	131	455		416
7	7.75	83.2	145	471		431
8	4.25	41.1	125	233		229
9	3.76	48.0	118	272		265

Tabella 3.1: Tabella riassuntiva prove di compressione, evidenziate le prove scartate.

Specimen	Elongation %	Maximum Load @ break (kN)	Rst (MPa)	Rmt (MPa)	Elastic Modulus [Gpa]
1	1.09	24.5	247	304	60
2	1.36	20.5	225	260	55
3	0.49	20.8	230	264	68
4	3.99	22.9	210	292	56
5	1.20	24.3	245	309	60
6	1.17	20.7	217	264	55
7	0.08	10.2	128	128	49
8	1.38	20.7	215	263	56
9	3.38	22.2	215	284	57
10	0.36	9.2	117	117	52
11	0.09	11.0	140	140	43

Tabella 3.2: Tabella riassuntiva prove di trazione, evidenziate le prove scartate

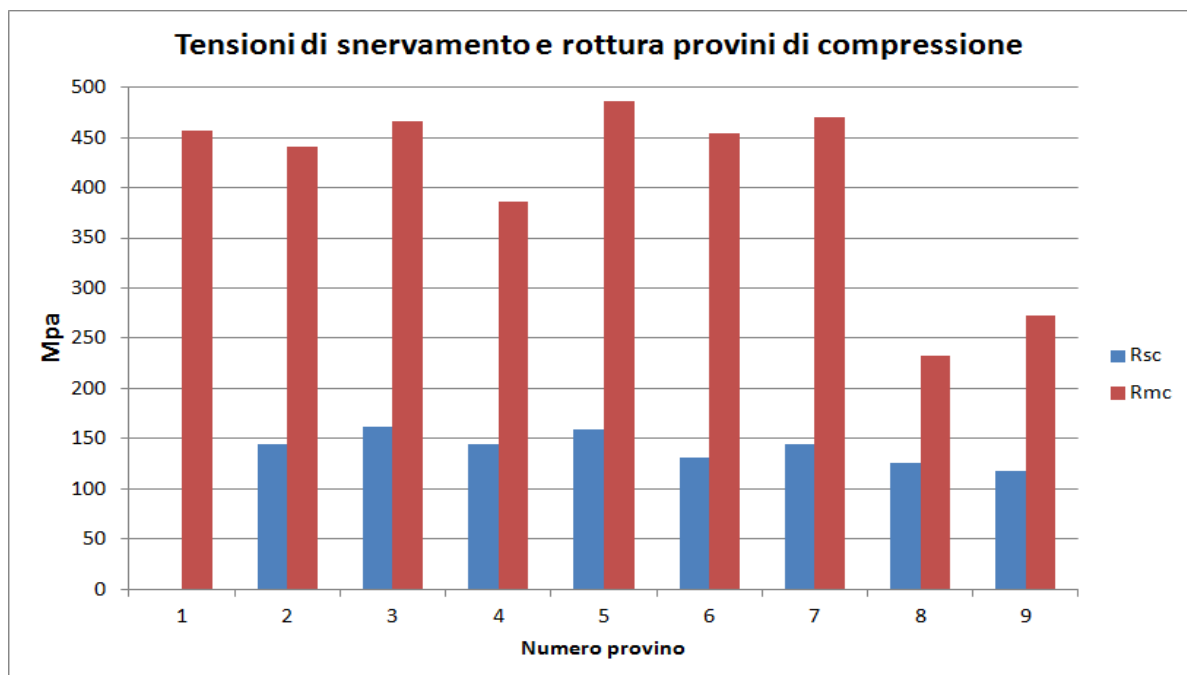


Figura 3.87: grafico Rsc, Rmc per ciascun provino di compressione.

Dalle tabelle 3.1, 3.2 si possono paragonare velocemente i risultati ottenuti nelle diverse prove e confrontare i provini scartati (evidenziati) con i provini utili, le caratteristiche meccaniche dei provini scartati sono state compromesse da difetti interni di grandi dimensioni per questo motivo i valori ottenuti non rispecchiano le reali proprietà della lega. Dal grafico di figura 3.87 è possibile osservare l'andamento delle tensioni di snervamento e rottura per ciascuna delle prove eseguite. La tensione di snervamento relativa al provino 1 non è presente per le problematiche riscontrate durante la prova. Le tensioni ottenute per i provini 8 e 9 risultano evidentemente inferiori e giustificano la scelta di escludere tali prove dal report finale.

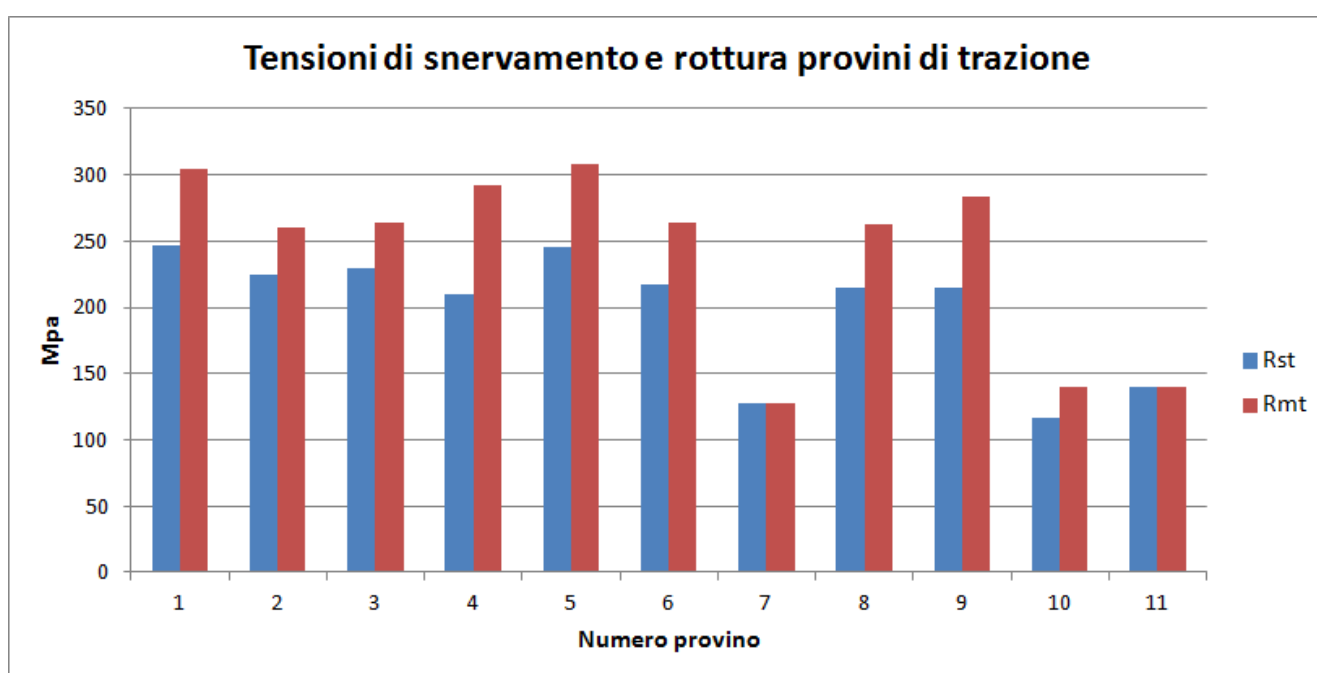


Figura 3.88: grafico Rst, Rmt per ciascun provino di trazione.

Dal grafico 3.88 che riporta per ciascuna prova eseguita le tensioni determinate, risultano evidenti le motivazioni che hanno portato a scartare i provini 7,8 e 9.

Il modulo di Young per la compressione è stato rappresentato solo da un valore, relativo al provino 1 ottenuto con la lettura dell'allungamento ottenuta dall'estensimetro. Il modulo di Young dipende dal carico e dalla deformazione, utilizzando per il calcolo la deformazione letta dall'estensimetro si è ottenuto un modulo di Young più elevato rispetto a quanto ottenuto con la lettura dell'LVDT. Dalla considerazione appena fatta risulta evidente che nonostante la calibrazione effettuata, non sia stato possibile eliminare efficacemente la deformazione della pressa dalle deformazioni lette dall'LVDT.



L'affidabilità maggiore è da attribuire all'estensimetro, il quale essendo applicato direttamente alla superficie del provino, non risente delle deformazioni avvenute sulla pressa o sulla fixture, per questo motivo è stato considerato valido solo il valore ottenuto dall'estensimetro.

A trazione è stato possibile utilizzare l'estensimetro, un provino è stato comunque munito di estensimetro, il provino 4. Anche in questo caso si è potuto constatare la distanza dei risultati ottenuti considerando le deformazioni derivanti dalla pressa (LVDT) nei confronti di quelle relative all'estensimetro. Anche in questo caso i valori di deformazione letti direttamente sul provino sono risultati inferiori, per cui il modulo di Young ottenuto risulta più elevato, nella tabella 3.2 il modulo elastico riportato è quello relativo alle letture ottenute dall'estensimetro. La lettura ottenuta dall'estensimetro applicato al provino 4 ha confermato l'esattezza della scelta fatta, il modulo di resistenza ottenuto con l'estensimetro differisce solamente del 4% da quello ottenuto con l'estensimetro, errore compatibile con la precisione delle attrezzature e con le approssimazioni applicate.

Per una più facile comprensione dei valori medi delle prove effettuate e della dispersione dei dati ottenuti sono state prodotte tabelle e grafici che riportano media e deviazione standard<sup>1</sup> dei valori di allungamento, carico a rottura, tensione di snervamento, tensione di rottura e modulo elastico.

	<b>Elongation %</b>	<b>Maximum Load @ break (kN)</b>	<b>Rsc (MPa)</b>	<b>Rmc (MPa)</b>	<b>Elastic Modulus [Gpa]</b>
<b>Average Value</b>	<b>7.19</b>	<b>79.6</b>	<b>148</b>	<b>452</b>	<b>83</b>
<b>Standard Deviation</b>	<b>1.46</b>	<b>5.7</b>	<b>11</b>	<b>32</b>	<b>--</b>

Tabella 3.3: Valori medi e deviazione standard, prove compressione.

	<b>Elongation %</b>	<b>Maximum Load @ break (kN)</b>	<b>Rst (MPa)</b>	<b>Rmt (MPa)</b>	<b>Elastic Modulus [Gpa]</b>
<b>Average Value</b>	<b>1.76</b>	<b>22.0</b>	<b>226</b>	<b>280</b>	<b>58</b>
<b>Standard Deviation</b>	<b>1.23</b>	<b>1.7</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>4.6</b>

Tabella 3.4: Valori medi e deviazione standard, prove trazione.

Nonostante le inclusioni interne presenti in quasi ogni provino, sia di trazione sia di compressione (anche se talvolta di dimensioni medio-piccole) i dati ottenuti sono risultati coerenti e a parte l'allungamento a rottura, la dispersione dei valori rispetto al valore medio è risultata inferiore all'8%, questo risultato mostra l'attendibilità della prova.

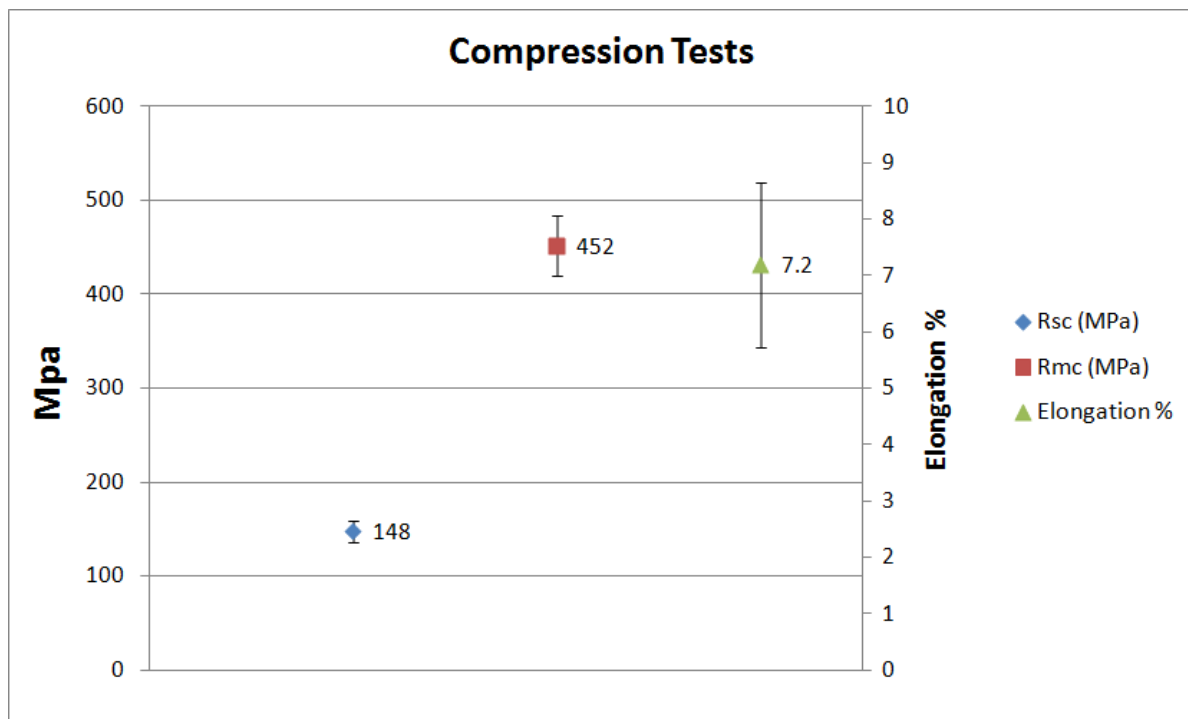


Figura 3.89: Report prove di compressione, riportante valore medio e deviazione standard.

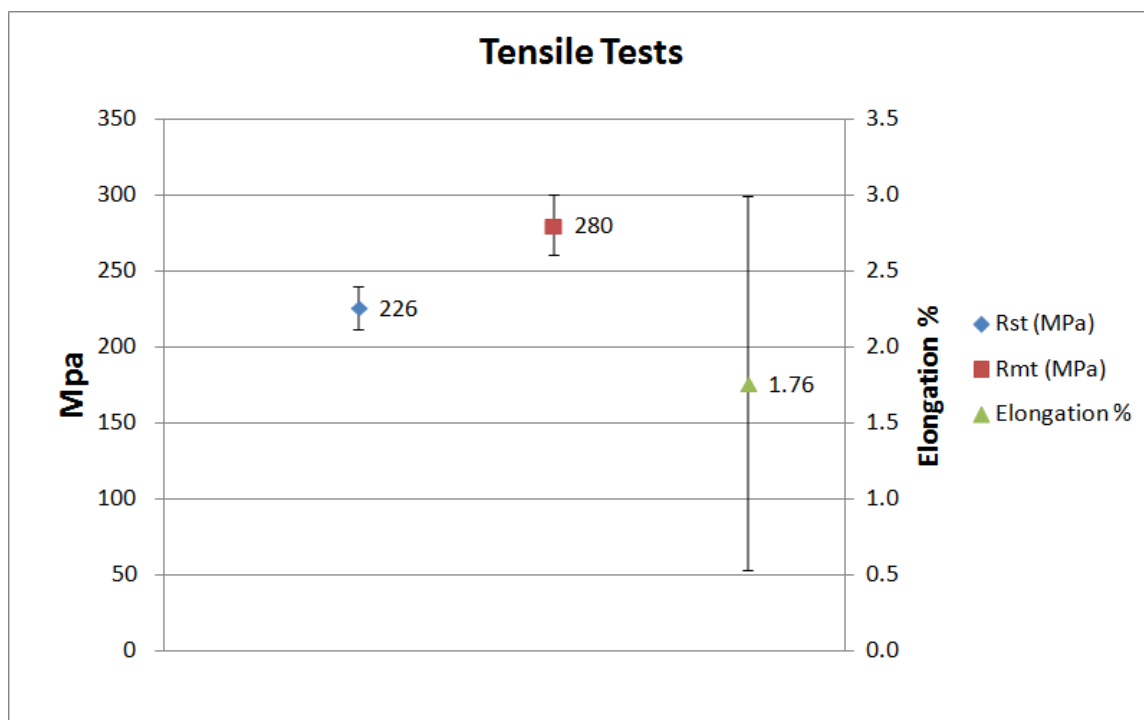


Figura 3.90: Report prove di trazione, riportante valore medio e deviazione standard.

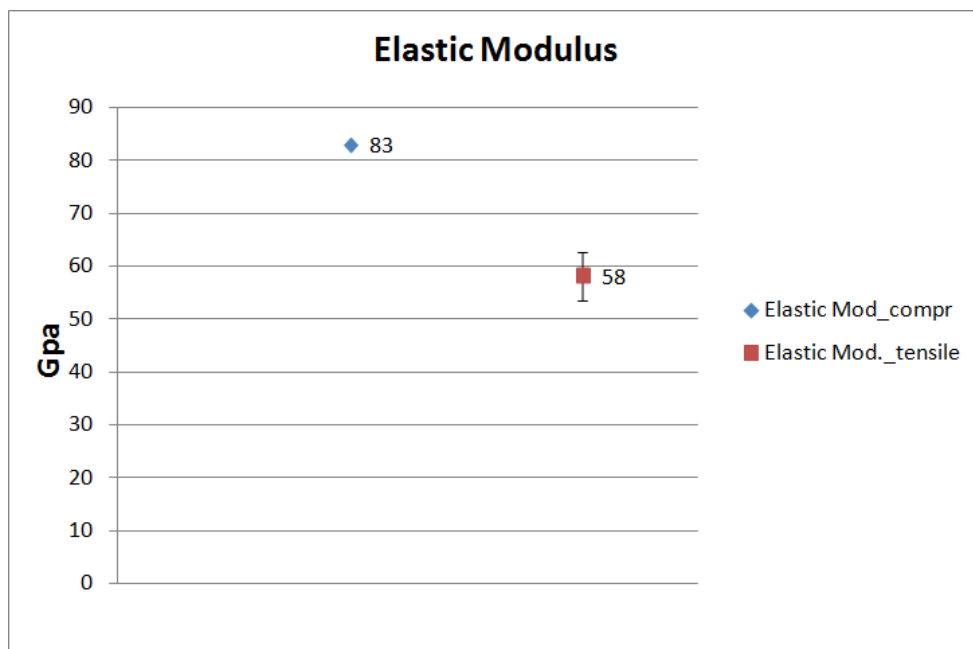


Figura 3.91: Report modulo elastico prove trazione e compressione, riportante valore medio e deviazione standard.

L'allungamento a rottura è il risultato più variabile tra quelli ottenuti, estremamente sensibile ai difetti interni soprattutto a trazione, in quanto difetti interni come cavità o ossidi generano intagli che, per effetto della configurazione di carico provocano la propagazione delle frattura portando a rottura anche per deformazioni plastiche di piccole entità. Questo fenomeno è meno evidente nella compressione, in quanto la configurazione di carico tende a richiudere eventuali cavità interne, mentre gli ossidi, più duri della lega, sottoposti a compressione creano concentrazioni di tensione che deformano plasticamente la porzione di materiale circostante senza generare immediatamente una frattura. Queste affermazioni sono confermate, o confermano i dati ottenuti sperimentalmente dalle prove, la variabilità dei valori ottenuti a compressione è inferiore rispetto a quella ottenuta a trazione.

La caratteristica maggiormente influenzata da difetti interni del materiale è l'allungamento a rottura, i provini che presentavano inclusioni di piccolissime dimensioni come i provini 4 e 9 di trazione hanno raggiunto la rottura con un allungamento percentuale attorno al 3,5%, il provino 8 ad esempio, che mostra un'inclusione di circa un millimetro, ha evidenziato un allungamento percentuale a rottura inferiore all'1,5%. Se si considerano i provini scartati, con inclusioni interne per quasi il 50% della superficie resistente come ad esempio il provino 7, l'allungamento a rottura è stato pari allo 0,08% arrivando a rottura senza presentare deformazione plastica.

	ZM21	ZM21+SiC	Variazione % rispetto alla lega non caricata
Tensile Yield Strength [MPa]	170 <sup>[7]</sup>	225	+24%
Tensile strength [MPa]	245 <sup>[7]</sup>	280	+12,5%
Compressive Yield Strength [MPa]	93 <sup>[7]</sup>	147	+36%
Modulus of Elasticity [GPa]	46 <sup>[7]</sup>	58	+20%

Tabella 3.5: specifiche della lega ZM21 a confronto con i valori ottenuti dalle prove sperimentali e relative variazioni.

Nella tabella 3.5 sono riportate le tensioni di resistenza, di rottura ed il modulo di elasticità della lega ZM21 (ottenute dalla bibliografia) e della lega ZM21 caricata con carburo di silicio ottenute dalle prove eseguite.

Il confronto tra le due leghe, mostra notevoli incrementi delle caratteristiche meccaniche della lega caricata, ad essere più marcato inoltre è l'incremento della tensione di snervamento a compressione.

Il maggior incremento della tensione di snervamento a compressione rispetto a quanto accaduto per la trazione ha l'effetto di ridurre il divario tra il comportamento a trazione e a compressione della lega.

Riassumendo, le prove eseguite hanno permesso di verificare che dalla lega caricata è possibile ottenere resistenze specifiche più elevate ed il materiale risulta meno sensibile alla configurazione di carico applicata.

# CONCLUSIONI

Le prove sperimentali eseguite hanno dato risultati soddisfacenti.

In primo luogo le caratteristiche meccaniche della lega caricata, quali tensione di snervamento tensione di rottura e modulo di elasticità sono risultate incrementate rispetto alla lega non caricata tra il 12% ed il 36%.

In secondo luogo l'incremento più marcato è stato ottenuto dalla tensione di snervamento a compressione, comportamento auspicato e che permette una minor variazione delle proprietà meccaniche in funzione della configurazione di carico.

Dai dati raccolti è stato possibile quindi confermare i miglioramenti ottenuti grazie all'inserimento in lega delle particelle ceramiche.

I provini sia di compressione sia di trazione hanno presentato inclusioni interne di dimensioni variabili, nonostante i dati relativi ai provini con le inclusioni maggiori siano stati scartati, è immaginabile che anche i dati ottenuti dai provini considerati utili siano stati influenzati da queste inclusioni e che riducendone la presenza sia possibile ottenere una lega ancora più performante.


Nonostante la precisazione appena fatta, i dati ottenuti dalle prove hanno evidenziato una variabilità inferiore all'8%, escludendo tuttavia i dati relativi all'allungamento a rottura che sono risultati maggiormente influenzati dalla presenza di difetti interni.

Le prove effettuate sulla lega caricata ZM21+SiC hanno prodotto quindi risultati soddisfacenti e talvolta superiori alle aspettative iniziali, risulta però evidente la possibilità di ottenere risultati ancora superiori partendo da un materiale che presenti minori difetti interni apportando miglioramenti al processo fusorio.



# APPENDICE A

## SCHEDA TECNICA ESTENSIMETRI



**HBM**  
ELEKTNISCHES  
MESSEN

**RAI IND** Gruppo Industriale s.p.a.  
Rappresentanze  
Industriali s.p.a.  
Via Vignola, 4 - Tel. (0541) 948428  
SOGLIANO AL RUBICONE (FORLÌ)

### Dehnungsmeßstreifen Strain Gauges Jauges d'extensométrie

Typ **1.5/120XY114**

Widerstand Resistance Résistance	120 $\pm 0.35\%$	Temperaturkompensation: Angepaßt für Temperature Compensation: Compensated for Compensation de température: Compensation pour
k-Faktor Gauge factor Facteur k	1.34 $\pm 1\%$	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Stuhl Steel Acier $\alpha = 11 \text{ ppm/K}$
Temperaturkoeffizient des k-Faktors		<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: black; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Aluminium
Temperaturkoeffizient of gauge factor	35 ppm/K	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; border-style: dashed; margin-right: 5px;"></span> Sonstige other autres
Coefficient de température du facteur k		
Stückzahl Quantity Quantité	5 $\pm 0.0k$	Folien Nr. Fol Lot No. No. de Feuille <b>A253/10</b>
Artikel Nr. Part No. No. de Part.	213.10-2201	Los Nr. Lot No. No. de Lot <b>EV 6049200/1</b>

**HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH**  
Postfach 4235 · Im Talweg 548-45 · D-6100 Darmstadt 1  
Tel. (06151) 903-1 Telex 4 19341

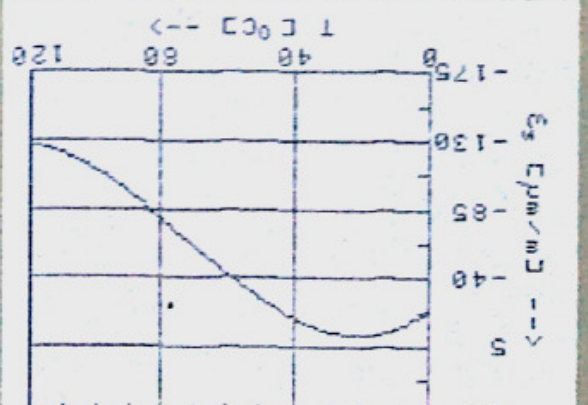
Temperatur-Verraten der Dehnungsmeßstreifen (DMS) appliziert auf einen Werkstoff mit dem umringel angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha$ . Temperature characteristic of strain gauges applied to material having a temperature coefficient of linear expansion of  $\alpha$  (see overview).

Compensiert en température d'une jauge appliquée sur un matériau avec  $\alpha$  (voir de détail thermique  $\alpha$  voir au verso).

Alle technischen Daten nach VDE/VDI 2635  
Bei Rückfragen bitte DMS-Typ und Los-Nr. angeben.  
Ausführliche Informationen über die Handhabung von DMS entnehmen Sie bitte den HBM-Broschüren und den Gebrauchsanweisungen der Klebstoffe.

**HBM**  
ELEKTNISCHES  
MESSEN  
MECHANISCHER  
GRÖSSEN



$\epsilon_g$  [µm/m] --->

$T$  [°C] --->

Comprehensive information for the handling of strain gauges is given in various HBM brochures and in the instructions for use of the individual adhesive types.

Toutes caractéristiques selon Standards VDE/VDI 2635. Pour toutes demandes complémentaires indiquer le type de la jauge et le numéro de lot.

La brochure HBM et les notices d'utilisation des colles contiennent les informations nécessaires à la manipulation des jauges.





# BIBLIOGRAFIA

- [1] Materials Science and Engineering A298 (2001) 193-199
- [2] Materials Science and Engineering A528 (2011) 5278-5282
- [3] Manuale dei materiali per l'ingegneria – McGraw-Hill AIMAT
- [4] Materials Science and Engineering A302 (2001) 37-45
- [5] [www.ing.unitn.it/~colombo/MAGNESIOIGOR/sviluppo delle leghe di magnesio.htm](http://www.ing.unitn.it/~colombo/MAGNESIOIGOR/sviluppo_delle_leghe_di_magnesio.htm)
- [6] [www.ing.unitn.it/~colombo/Mg-pressocolata/default.htm](http://www.ing.unitn.it/~colombo/Mg-pressocolata/default.htm)
- [7] [www.alubin.com/eng/HTMLs/articleproduct.aspx?c2019=12247&bsp=12119&bs4=12247](http://www.alubin.com/eng/HTMLs/articleproduct.aspx?c2019=12247&bsp=12119&bs4=12247)
- [8] [www.ing.unitn.it/~colombo/annamariamagnesio/annamariamagnesio.htm](http://www.ing.unitn.it/~colombo/annamariamagnesio/annamariamagnesio.htm)
- [9] [www.alufiero.it](http://www.alufiero.it)
- [10] [www.ing.unitn.it/~colombo/2002gruppo1\\_AZ91/micrografie.htm](http://www.ing.unitn.it/~colombo/2002gruppo1_AZ91/micrografie.htm)
- [11] [www.ing.unitn.it/~colombo/MAGNESIOIGOR/perchè usare le leghe di magnesio](http://www.ing.unitn.it/~colombo/MAGNESIOIGOR/perchè_usare_le_leghe_di_magnesio)
- [12] normativa iso 6892-1 first edition 2009-08-15



# **RINGRAZIAMENTI**

Come conclusione di questo elaborato, che coincide con la conclusione di un capitolo importante della mia vita mi sento in dovere di compiere dei ringraziamenti a tante persone che hanno contribuito ciascuna a suo modo in questo mio percorso.

Vorrei ringraziare innanzitutto il Prof. Lorenzo Donati per avermi proposto questo interessante ma anche impegnativo argomento di tesi che ha tuttavia generato in me curiosità fin da subito. Lo ringrazio anche per avermi motivato a più riprese a cercare di affrontare le problematiche da solo senza aspettare che qualcuno lo facesse per me, aiutandomi a crescere in questo senso.

Ringrazio inoltre l'Ing. Claudia Bandini che si è resa sempre disponibile e presente dall'inizio, in occasione dell'esecuzione delle prove e in fase di elaborazione dei dati, mi ha sempre motivato a trovare da solo le soluzioni per i problemi riscontrati salvo poi confrontarle assieme per determinare la direzione migliore da intraprendere.

Grazie anche l'Ing. Paolo Proli che è stato sempre disponibile prima durante e dopo l'esecuzione delle prove, che ci ha dedicato intere giornate per organizzare la strumentazione, preparare ed eseguire le prove ma anche per aiutarci a comprendere i dati senza mai trascurare anche le più piccole curiosità.

Grazie anche ai miei genitori Renzo e Annalisa che mi hanno permesso di intraprendere e portare a termine questo percorso anche se talvolta non è stato semplice non mi hanno fatto mancare il sostegno.

Grazie ai miei nonni Edera, Gino e Vittorina che mi hanno sempre spronato a mettercela tutta e a non arrendermi mai.

Grazie a tutti gli amici che mi sono stati vicino nei momenti di studio e nei momenti di svago, perché ciascuno ha avuto la sua parte nel farmi gioire e studiare con maggior gusto.

Grazie infine a Marsha che in questi anni mi ha sempre spronato a credere di più nelle mie forze e a non perdere mai la fiducia.