



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA MECCANICA

Corso di Laurea triennale Ingegneria Meccanica

Analisi sperimentale del comportamento del Policarbonato

Experimental analysis of polycarbonate behavior

Relatore: Chiar.mo/a
Prof. Sasso Marco

Tesi di Laurea di:
Marco Gattanella

A.A. 2023/ 2024

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il Prof. Marco Sasso, relatore di questa tesi, sia per l'aiuto fornito per la composizione della stessa, sia per la grandissima conoscenza che mi ha conferito, nonché per la sua disponibilità. Ringrazio inoltre il Prof. Gianluca Chiappini e tutto il Dipartimento Di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche per il supporto, per la professionalità che hanno consentito di portare a compimento questo mio percorso.

Un grandissimo ringraziamento va anche a tutta la mia Famiglia che mi ha sostenuto, sia economicamente, sia moralmente, per tutto il mio intero percorso accademico e approfitto per ringraziare anche quei pochissimi che in questi anni mi sono stati davvero vicino.

Per ultimo, ma non meno importante, vorrei ringraziare il Me stesso di qualche anno fa per avermi reso quello che sono oggi, oltre che per non essersi mai accontentato, per non essersi mai dato per sconfitto, per non aver mai piegato la testa, per non aver mai smesso di crederci, per non aver mai ascoltato i tantissimi detrattori che ti vedevano sconfitto o incapace di raggiungere il tuo obiettivo. Ad oggi posso dirti e posso dirmi: "Ce l'ho fatta, ho vinto la mia guerra. Sono Ingegnere Meccanico."

Ripalta, 23/11/2024

Gattanella Marco

Sommario

Ringraziamenti	2
Introduzione	4
1. CARATTERIZZAZIONE DI UN MATERIALE.....	5
1.1 CARATTERIZZAZIONE DI UN MATERIALE- PERCHE'	5
1.1.1 Caratterizzazione di un materiale per la progettazione	5
1.1.2 Caratterizzazione di un materiale per l'innovazione	8
1.1.3 Caratterizzazione di un materiale per Ricerca e Benchmark	9
1.2 CARATTERIZZAZIONE DI UN MATERIALE-CONCETTO	10
2. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI UN MATERIALE	11
2.1 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA-OBIETTIVI	11
2.2 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA-COME	11
2.2.1 Caratterizzazione meccanica-PREPARAZIONE DEI PROVINI	11
2.2.2 Caratterizzazione meccanica-ALLESTIMENTO HARDWARE PER I TEST.....	12
2.2.3 Caratterizzazione meccanica-ESECUZIONE DEI TEST	12
2.2.4 Caratterizzazione meccanica-ATTIVITA' DI POST PROCESSING	24
3. CARTA D'IDENTITA' POLICARBONATO CONVENZIONALE-PC DIN 7728.....	25
3.1 CARATTERISTICHE E APPLICAZIONI TIPICHE DEL PC DIN 7728.....	25
3.2 ANALISI QUALITATIVA DELLA RISPOSTA STATICA A TRAZIONE DEL PC DIN 7728	27
3.3 ANALISI QUALITATIVA DELLA RIPOSTA DINAMICA PC DIN 7728	28
4. CARATTERIZZAZIONE PC SPERIMENTALE	28
4.1 PREPARAZIONE DEI PROVINI DI PC SPERIMENTALE.....	28
4.2 ALLESTIMENTO HARDWARE PER TEST PC SPERIMENTALE	29
4.2.1 Allestimento hardware-TEST STATICI	29
4.2.2 Allestimento hardware-TEST DINAMICI	30
4.3 ESECUZIONE TEST PC SPERIMENTALE	31
4.3.1 esecuzione test-TEST STATICI	31
4.3.2 esecuzione test-TEST DINAMICI.....	32
4.4 ATTIVITA' DI POST PROCESSING PC SPERIMENTALE	33
4.4.1 Attività di post processing-TEST STATICI	34
4.4.2 Attività di post processing-TEST DINAMICI	38
4.5 ANALISI DEI GRAFICI CARATTERISTICI	39
4.5.1 Analisi dei grafici caratteristici-TEST STATICI	39
4.5.2 Analisi dei grafici caratteristici-TEST DINAMICI	44
4.6 CONCLUSIONI.....	50

Introduzione

L'obiettivo principale dell'elaborato è fornire una **caratterizzazione del policarbonato sperimentale**; perciò, ripercorreremo tutti i passi fatti per raggiungere tale scopo. Dopo aver introdotto il perché caratterizzare un materiale, prima ancora di aver parlato del concetto di caratterizzazione, quindi spiegandone successivamente il come, ci agganceremo al nostro casus studi. Per farlo partiremo con il voler rilasciare la carta d'identità del Policarbonato comune; quindi, con l'impostazione di una sorta di datasheet, spiegheremo i vari punti di forza e le varie peculiarità del materiale stesso riassumendone le principali caratteristiche di rilievo ingegneristico, assumendo perciò un punto di vista poliedrico. Si procederà poi con un rapido excursus sulle fondamenta dei test necessari al suddetto scopo, senza tralasciare quelle che sono le tipicità, includendo anche le difficoltà implicite per la conclusione di ogni prova.

Analizzeremo nello specifico tutti i test effettuati; procederemo in primis con i test quasi statici o propriamente detti, test statici, quindi prova di trazione quasi statica, prova di compressione quasi statica. In secundis avanzaeremo con la trattazione dell'unico test dinamico che verrà condotto sul materiale stesso, quindi la prova di compressione dinamica alla Barra di Hopkinson. Gettate le basi del nostro itinerario, seguiranno tutte le fasi necessarie allo scopo di rendere possibile la caratterizzazione del materiale: partiremo dalla preparazione dei provini, analizzando metodologie e tecniche impiegate, includendo anche la strumentazione adoperata. Seguiremo poi con l'allestimento dell'hardware dedicato ad ogni test, intendendo per hardware i vari macchinari coinvolti, con annesso svolgimento.

Culmineremo infine con le varie attività di post-processing, necessarie alla rielaborazione dei dati estratti dalle prove, avvalendoci di software dedicati, giungendo così alle conclusioni.

1. CARATTERIZZAZIONE DI UN MATERIALE

1.1 CARATTERIZZAZIONE DI UN MATERIALE- PERCHE'

1.1.1 Caratterizzazione di un materiale per la progettazione

Prima di entrare nel merito di come, è opportuno fare un passo indietro e partire dal perché ci sia la necessità di caratterizzare un materiale. Partendo dall'ottica che la risposta è articolata, inizieremo con l'analisi degli scopi prettamente progettistici. Uno tra i pilastri fondamentali della progettazione è proprio la scelta del materiale, o meglio, genericamente la progettazione è basata sul margine che separa un dato materiale dal suo limite, in altre parole sul confronto tra "quanto viene richiesto al materiale" in relazione a "quanto questo può dare". Va da sé che questo confronto varia in funzione del materiale. Brevemente diremo che le suddette caratteristiche sono di tipo stocastico, quindi soggette a variabili con andamenti aleatori, per altri versi probabilistici, tanto che possono essere associate rispettivamente a una distribuzione di tensione e a una distribuzione di resistenza. Perciò, il concetto di affidabilità di un materiale è subordinato alle soprascritte due distribuzioni. A tale scopo si è soliti parlare di coefficiente di sicurezza= X_s , il quale, essendo un margine di sicurezza, definisce la condizione ammissibile, ovvero la sollecitazione massima di lavoro che un componente, di un dato materiale, può sopportare rispettando la specifica:

$$\text{Coefficiente di sicurezza} = \frac{\text{Sollecitazione limite del materiale}}{\text{Sollecitazione massima di lavoro}}$$

$$\text{Margine di sicurezza} = \text{Coefficiente di sicurezza} - 1$$

$$X_s = \frac{\text{Sollecitazione limite del materiale}}{\text{Sollecitazione massima di lavoro}}$$

Di più, chiamando σ_0 =sollecitazione ammissibile, potremmo riscrivere la relazione del coefficiente di sicurezza nel seguente modo:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_L}{X_s} \quad , \quad \sigma_L = \text{sollecitazione (o tensione) limite}$$

Inizia già ad essere chiaro perché caratterizzare un materiale sia una prerogativa di primaria importanza dato che siamo interessati a capire il valore di σ_L per un dato materiale. Volendo andare ulteriormente a fondo della questione è opportuno soffermarsi sui seguenti aspetti:

1. Caratteristiche del materiale;
2. Sollecitazioni impresse al materiale.

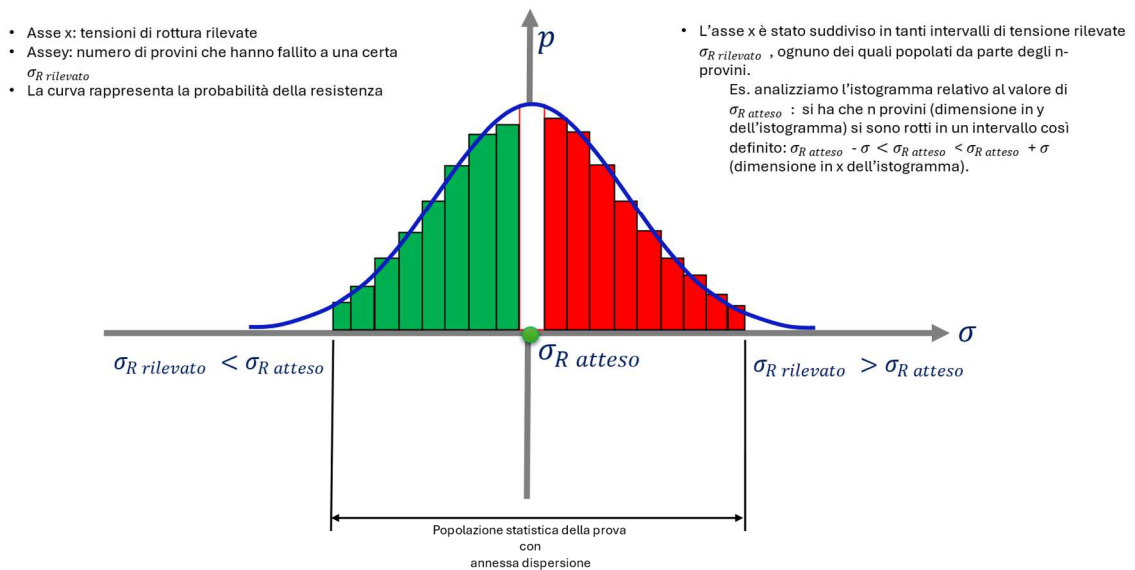
Questi sono dei concetti di natura statistica; infatti, non è poi così strano associare a una caratteristica meccanica il concetto di valor medio della stessa, così come per le sollecitazioni che gravano sul materiale del componente. Poter parlare di valore medio associato a una determinata caratteristica ci semplifica molto la vita, in quanto il valore medio è un'importante indicazione, ovviamente di tipo preliminare, che ci consente di prestabilire se un dato materiale potrebbe essere idoneo o no per un certo impiego. Tradotto in parole semplici, non andremo mai a scegliere un materiale che, come caratteristica media a trazione, presenti un valore di $n \text{ MPa}$ per un impiego dove ne sono richiesti almeno $2n \text{ MPa}$.

Volendo essere completi, a riguardo delle prestazioni meccaniche, oltre a dire che sono di natura statistica, attribuiremo loro un'accezione stocastica; quindi, delle variabili legate ad andamenti aleatori.

Per dare un senso analitico a quanto scritto finora immaginiamo di voler misurare la tensione di rottura statica di un materiale noto servendoci perciò dell'evidenza sperimentale data da un'ipotetica prova di trazione statica. Tuttavia, per dare un significato statistico alla prova, sottoporremo al suddetto test un numero di provini sufficientemente alto da poter disporre di una popolazione statistica adeguata, nel nostro caso coinvolgeremo n-provini. Conoscendo il materiale, conosceremo il valore atteso della tensione di rottura ossia: $\sigma_R \text{ atteso}$. Svolgendo via via le prove anoteremo i risultati ottenuti riguardo al valore di tensione di rottura rilevato ossia: $\sigma_R \text{ rilevato}$. Come era chiaro, osserveremo una certa dispersione dei risultati sperimentali ottenuti, in quanto i provini andranno a rottura con diversi, seppur comparabili, valori di $\sigma_R \text{ rilevato}$, infatti:

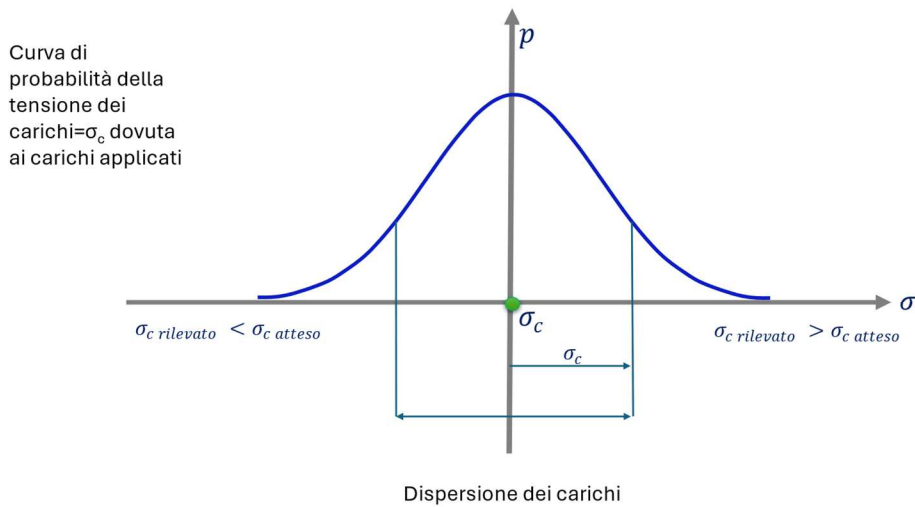
- alcuni provini andranno incontro a rottura proprio nel valore di tensione di rottura atteso per quel materiale, $\sigma_R \text{ atteso} \equiv \sigma_R \text{ rilevato}$;
- altri provini si romperanno ad un valore di tensione inferiore al valore di tensione di rottura atteso, $\sigma_R \text{ atteso} > \sigma_R \text{ rilevato}$;
- altri ad un valore superiore, $\sigma_R \text{ atteso} < \sigma_R \text{ rilevato}$;

Grafichiamo i risultati della prova utilizzando una distribuzione gaussiana normale, la quale raccoglie le evidenze sperimentali ricavate:

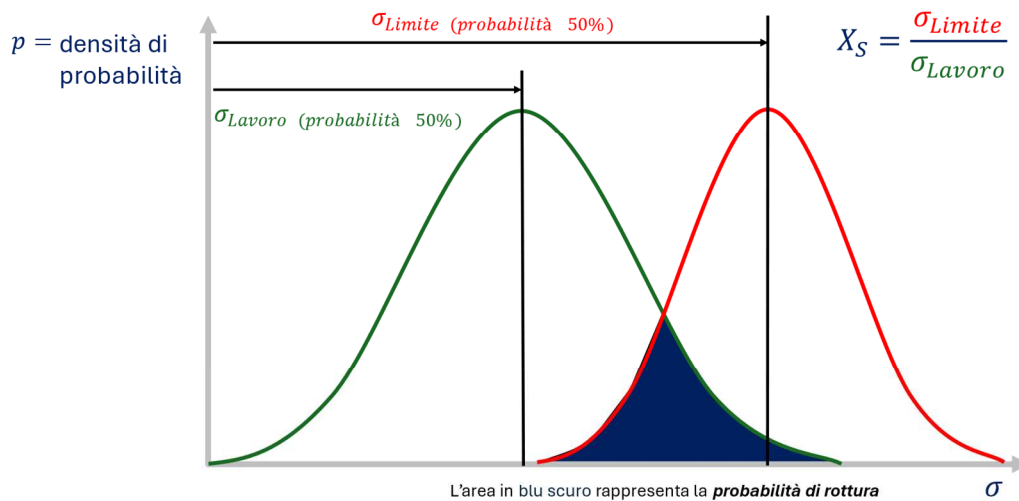


Volendo insistere sul concetto di dispersione, diremo che se il materiale avesse avuto una minor variabilità di risultati, quindi una minore dispersione, la distribuzione gaussiana sarebbe risultata visivamente più stretta. A livello pratico di materiale, la dispersione è indice di quanto gli standard di processo per la sua realizzazione siano alti o meno, poca dispersione è sinonimo di un materiale realizzato con alti standard di processo, quindi controlli serrati. In più diremo che, l'area sottesa dalla curva rappresenta la probabilità di sopravvivenza del materiale, la quale ovviamente è funzione di quanto si sta chiedendo al materiale stesso.

Riprendendo il ragionamento introdotto poco fa, associamo una distribuzione gaussiana normale anche per le sollecitazioni impresse al materiale, perciò immaginando che la curva questa volta rappresenti la natura statistica e/o stocastica dei carichi= σ_c si ha:



Nella quale l'area sottesa dalla curva rappresenta la probabilità dei carichi. Correlando perciò le due curve riusciremo a capire indirettamente qual è l'affidabilità del materiale, visto che è facilmente individuabile l'area nella quale è rappresentata la probabilità di rottura:



Vengono riportati il valore di probabilità del 50% perché ci si vuole riferire al valore medio di ognuna delle due tensioni

L'area in blu scuro è caratterizzata dal fatto che la σ_{Limite} , quindi quella tensione legata a quanto può dare il materiale, **sia inferiore** alla σ_{Lavoro} , ossia quella tensione legata a quanto viene richiesto al materiale.

Tutto questo per dire che il valore di σ_{limite} è di primaria importanza ai fini della scelta di un materiale destinato a un certo componente. Di più, σ_{limite} viene reso noto solo ed esclusivamente con un processo di caratterizzazione del materiale stesso. Per concludere, volendo utilizzare altre parole, la caratterizzazione del materiale rappresenta un momento precedente alla progettazione stessa poiché lo scopo principale di questa fase è proprio quello di conoscere, attraverso alcune prove ripetibili, le caratteristiche, o per meglio dire, le curve caratteristiche, che differenziano un materiale dall'altro permettendo all'ingegnere di stabilirne l'idoneità per un certo scopo.

1.1.2 Caratterizzazione di un materiale per l'innovazione

Genericamente parlando, indipendentemente dal campo di applicazione, è facile che o con l'avanzare della tecnica, o proprio per garantire il suddetto progresso tecnologico, siano necessari dei componenti che riescano a rispettare delle specifiche via via sempre più severe e ridefinire quelli che sono gli standard precedenti, migliorandoli. Per comodità espositiva e per non esulare dall'obiettivo dell'elaborato, si tralascerà volontariamente la tematica del come concretamente sia possibile raggiungere il componente innovativo in questione partendo dalla materia prima, quindi tutti i processi industriali implicati. Contrariamente ci si concentrerà nel capire il nesso di come il processo di caratterizzazione di un materiale sia strettamente legato all'innovazione, indipendentemente dal campo di applicazione. Perciò, alla luce di quanto scritto, per perseguire il progresso tecnico, o per soddisfare un'applicazione sempre più spinta, è naturale che si debba poter contare su una gamma fornita di materiali fortemente performanti. Per fissare le idee e cercare di capire quanto scritto precedentemente, facciamo un semplice esempio: pensiamo all'ambito automotive. In questo settore, una delle prerogative più importanti seguite dagli ingegneri è contenere il peso dell'auto, sia per motivazioni legate alla performance, sia per ragioni di costi di gestione riservati all'utente finale. Questo perché, un'auto più pesante, oltre a performare meno, consumerà banalmente più carburante. Celeberrima la massima di Colin Chapman: "Less is More". Chapman, ingegnere progettista per Lotus, si è trovato a dover rispondere all'esigenza dell'avere un corpo vettura sempre più leggero affinché le sue auto potessero essere le più veloci. Come ci riuscì? Ci riuscì con una progressiva sostituzione dell'acciaio, materiale convenzionale per la costruzione delle monoscocche autoportanti, con l'utilizzo estensivo di leghe leggere, tra cui leghe di alluminio. Anche in questo caso l'ingegnere progettista ha potuto rispondere all'esigenza sopracitata, poiché la ricerca volta a studiare nuovi materiali, in questo caso più leggeri e più performanti, ha deliberato che l'alluminio, o meglio le leghe dello stesso materiale, potessero essere delle valide sostitute a quelle dell'acciaio. Con questo esempio, è chiaro come caratterizzazione e innovazione vadano di pari passo.



1. Osserviamo un esempio di monoscocca in carbonio di un'Alfa Romeo 4c.

1.1.3 Caratterizzazione di un materiale per Ricerca e Benchmark

Volendo allontanarci, ma non troppo, dall'ambito progettistico, è possibile voler caratterizzare un materiale per altri scopi, per certi versi vicini anche a settori di ricerca. Ad esempio, quando viene scoperto un nuovo materiale, che definiremo sperimentale per ovvie ragioni, c'è la necessità di comprendere quanto ampie possano essere le sue potenzialità. In questa particolare situazione, il perché c'è il bisogno di analizzarne il comportamento meccanico nella sua interezza, è mosso da una duplice ragione. Da una parte troviamo scopi prettamente legati alla ricerca scientifica, dall'altra troviamo obiettivi di benchmark. Analizzando entrambe le opzioni diremo che, si perseguono scopi di ricerca scientifica quando si vuole dare una misura, quasi fine a sé stessa, di una data caratteristica meccanica. Questo accade quando si scopre un materiale senza però sapere, in quel momento, dove possa essere applicato; questo può succedere per molteplici ragioni, prima fra tutte lo stato embrionale del processo di ricerca in quel dato momento oppure perché lo stato, di quel momento, della tecnica non consente un buon sfruttamento dello stesso o ancora non ci sono i mezzi, quindi procedimenti, per utilizzarlo al meglio. Parlando invece di benchmark, implicitamente torniamo nell'ambito progettistico, poiché come già scritto, la stessa progettazione di un componente è anche funzione della scelta del materiale. Quando si sceglie un materiale si confrontano tra loro i set di caratteristiche meccaniche di entrambi, ponendo particolare attenzione a quelle, che in quella data applicazione, sono le più rilevanti. Per chiarire le idee facciamo un esempio per ognuna delle casistiche:

- Partiamo con la ricerca:
 - Il grafene, un allotropo del carbonio, è stato isolato, per la prima volta nei primissimi anni del 2000, per essere precisi nel 2004. Tuttavia, in quegli anni è lecito pensare che lo stato della tecnica non consentisse un suo utilizzo realmente rilevante. Infatti, solo dopo il 2010 il grafene ha trovato impiego nell'industria dei semiconduttori, quando un gruppo della IBM ha realizzato un transistor al grafene con una frequenza di funzionamento massima di 100GHz¹.
- Proseguiamo con il benchmark:
 - Immaginiamo di dover progettare un componente destinato all'aeronautica, un serbatoio di carburante. Nell'ambito dell'aeronautica perseguire la leggerezza è di primaria importanza. Immaginiamo di poter scegliere tra una vasta gamma di materiali, tra cui l'alluminio 6061 t6, l'Ergal², un acciaio inox AISI 304 e l'Avional³. Dovendo scegliere un materiale che rappresenti un compromesso tra leggerezza, resistenza meccanica, che non abbia particolari altre richieste, la scelta è chiaramente l'Avional. Cosa ci ha portato a questa scelta? È stato scelto l'Avional in particolare perché abbiamo concluso un lavoro di benchmark; più semplicemente abbiamo confrontato quelle che sono le caratteristiche di rilievo per l'ambito aeronautico.

Con questo paio di semplici esempi è chiaro come il nesso tra caratterizzazione, ricerca e benchmark sia tanto rilevante. Concludendo, la necessità di disporre di una caratterizzazione di un ipotetico materiale è importante perché tange numerosissimi aspetti.

¹: fonte Wikipedia- <https://it.wikipedia.org/wiki/Grafene> - Utilizzi e potenziali applicazioni;
Ergal²: nome commerciale per indicare le leghe di alluminio appartenenti alla serie 7XXX, precisamente alla 7075 (t6);
Avional³: nome commerciale per indicare le leghe di alluminio appartenenti alla serie 2XXXX, precisamente alla 2024.

1.2 CARATTERIZZAZIONE DI UN MATERIALE-CONCETTO

Avendo chiarito in primis l'importanza della caratterizzazione di un materiale in tutti i suoi aspetti, è ora possibile affrontarne il concetto. Allo scopo è utile partire da un punto iniziale piuttosto generico, quasi vago; serviamoci della seguente metafora: immaginiamo il materiale come una sorta di scatola nera. Le informazioni contenute al suo interno riguardano la totalità delle caratteristiche e le loro stesse combinazioni, le quali, oltre a definirlo univocamente, allo stesso tempo, lo differenziano irrimediabilmente. Proseguendo in quest'ottica, la caratterizzazione si pone come una lente che ci consente in primis di capire cosa ci sia dentro la scatola, in termini di proprietà, e in secundis di scoprire in che modo queste coesistano. Volendo ora contestualizzare quanto scritto, diremo che: a seconda di ciò che si vuole studiare c'è una particolare caratterizzazione atta allo scopo prescelto. Volendo avvicinarci a quello che è il nostro casus studi, seppur parzialmente e a titolo del tutto introduttivo, il significato al quale vogliamo maggiormente legarci, visto anche l'obiettivo principale dell'elaborato, si è già palesato nel momento in cui è stata mostrata l'importanza dell'analisi del comportamento meccanico in ambito progettistico; si riportano infatti testuali parole: "La caratterizzazione del materiale rappresenta un momento precedente alla progettazione stessa poiché lo scopo principale di questa fase è proprio quello di conoscere, attraverso alcune prove ripetibili, le caratteristiche, o per meglio dire, le curve caratteristiche, che differenziano un materiale dall'altro permettendo all'ingegnere di stabilirne l'idoneità per un certo scopo". Da qui è possibile comprendere come l'obiettivo primario della caratterizzazione meccanica di un materiale sia fornire l'analisi delle sopradette performances, le quali, in alcuni casi, funzione delle proprietà, possono essere espresse oltre che con valori numerici, anche con grafici. Sono questi ultimi che, corredati da punti caratteristici (vedi il punto di rottura, il punto di snervamento ecc.), ci consentono di capire il comportamento meccanico di un dato materiale unendo alcune informazioni quantitative a delle caratterizzazioni qualitative fornite dall'analisi delle curve caratteristiche. Concludendo diremo semplicemente che, a livello di concetto, la caratterizzazione è un processo basato su un'analisi sperimentale, che tramite alcuni test rilevanti, in funzione al campo d'interesse, ha come scopo di capire le proprietà, nonché le peculiarità, del materiale oggetto di studio.

Ad esempio:

- Se si è interessati ad una caratterizzazione meccanica di un materiale è ovvio che l'analisi sarà prettamente riguardante la risposta del materiale rispetto a una sollecitazione meccanica tipo statico e/o dinamico; perciò, i test implicati saranno finalizzati a determinare l'andamento della curva di trazione e compressione statiche e il comportamento dinamico, quindi le omonime curve, ma in situazione dinamica;
- Se invece si è interessati ad una caratterizzazione chimica di un materiale è ovvio che l'analisi sarà prettamente riguardante la natura atomica del materiale, quindi i test implicati saranno finalizzati a determinarne il comportamento chimico in diverse situazioni.

Non volendo esulare dall'obiettivo dell'elaborato, da qui in avanti ci concentreremo solo ed esclusivamente sulla caratterizzazione di tipo **meccanico**; quindi, confonderemo il termine "**caratterizzazione meccanica del materiale**" con "**caratterizzazione del materiale**".

2. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI UN MATERIALE

In questa sezione dell'elaborato approcceremo al processo di caratterizzazione meccanica di un materiale in modo metodico dichiarandone gli obiettivi, spiegandone poi le modalità, entrando nel merito delle fasi necessarie.

2.1 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA-OBIETTIVI

Volendo trattare con sistematicità la tematica della caratterizzazione di un materiale, andiamo a conoscerne gli obiettivi. Indipendentemente dall'ambito, la determinazione del comportamento meccanico di un materiale rappresenta un momento dove tutta l'attenzione è rivolta alla comprensione delle potenzialità del materiale in studio, ponendo particolare interesse alle risposte alle eventuali sollecitazioni simulate. Perciò l'analisi sperimentale sarà finalizzata a fornire la risposta completa del materiale a sollecitazioni di tipo statico e/o dinamico. Concretamente, i test, statici e dinamici, riproducendo sperimentalmente gli stress, avranno il compito di avviare il processo di caratterizzazione, che solo dopo una serie di attività post processing, culminerà con la costruzione di tutte quelle curve caratteristiche che ci conferiscono una conoscenza più profonda del materiale.

2.2 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA-COME

La caratterizzazione meccanica di un materiale è il risultato di un procedimento iterativo nel quale si susseguono delle fasi che ci consentiranno di fruire, alla fine, dei risultati rivelati dall'analisi sperimentale del materiale in studio. Non esistono fasi più o meno importanti in quanto ognuna è essenziale in egual modo per raggiungere l'obiettivo. Vediamone l'elenco:

1. Preparazione dei provini o campioni;
2. Allestimento hardware per i test;
3. Esecuzione delle prove;
4. Attività di post processing.

Analizziamo nel dettaglio ogni fase.

2.2.1 Caratterizzazione meccanica-PREPARAZIONE DEI PROVINI

La preparazione dei campioni rappresenta il principio del procedimento di caratterizzazione meccanica di un materiale. Contrariamente a quanto si potrebbe pensare, questa fase è di vitale importanza, poiché oltre a sancire il primissimo contatto con il materiale, rende possibile l'esecuzione dei futuri test, visto che tramite la scelta del processo di formatura più idoneo, consente il passaggio dal semilavorato tipico del materiale oggetto di studio, al provino avente la geometria desiderata. Partendo dal presupposto che non esiste una tecnica giusta a priori, è opportuno anticipare che la scelta dev'essere condotta perseguendo la seguente prerogativa: il materiale, per quanto possibile, non deve subire nessuno stress o sollecitazione di alcun tipo, poiché altrimenti i test che verranno svolti in fase successiva risulterebbero falsati. Ovviamente poi, la scelta della tecnica di formatura sarà condotta anche in funzione delle tipologie di materiale, della strumentazione disponibile e della geometria da raggiungere, la quale, a seconda del test, può anche essere oggetto di normative. Oltre al procedimento di formatura nello specifico è facile che sia richiesta una preparazione ulteriore, come ad esempio una verniciatura particolare, che permetterà poi al software, dedicato all'applicazione specifica, di svolgere i suoi calcoli.

2.2.2 Caratterizzazione meccanica-ALLESTIMENTO HARDWARE PER I TEST

Arrivati a questo punto, disponendo dei provini, è richiesto l'allestimento dell'hardware per lo svolgimento dei test. In particolare, verranno preparati, attraverso una serie di operazioni, funzionali al test da svolgere, i vari macchinari dedicati.

Come precedentemente scritto, volendo conferire a questa sezione specifica dell'elaborato un'accezione per certi versi didattica, come se l'obiettivo fosse delineare una guida per la caratterizzazione meccanica di un materiale, in questo momento ci limiteremo a far sì che vengano comprese le fasi nonché la loro reciproca interazione, per poi approfondirle nel momento giusto. Alla luce di quanto scritto si rimanda la trattazione di tali operazioni al momento di affrontare la caratterizzazione del policarbonato sperimentale.

2.2.3 Caratterizzazione meccanica-ESECUZIONE DEI TEST

I test rappresentano la pietra miliare sulla quale verrà innestata tutta l'analisi sperimentale successiva. Lo scopo principale delle prove è quello di riprodurre, sperimentalmente, degli stress, in termini di tensioni, che ci consentano di mettere alla prova il materiale stesso. Essendo interessati ad una caratterizzazione meccanica, è opportuno che i test permettano l'avvio al processo di analisi sperimentale che avrà come risultato finale la caratterizzazione stessa del materiale. In altre parole, verranno condotti dei test di tipo statico e dinamico. I test statici imprimeranno al provino designato delle sollecitazioni di tipo statico; analogamente le prove dinamiche imprimeranno al campione destinato degli stress dinamici. Perciò il procedimento di caratterizzazione meccanica è articolato sulla caratterizzazione meccanica di tipo statico e dinamico.

2.2.3.1 CARATTERIZZAZIONE STATICA-TEST DI TRAZIONE E COMPRESSIONE

Per caratterizzazione statica intendiamo la parte del processo di analisi sperimentale volta a scoprire il comportamento statico del materiale. In questo particolare momento verranno condotte le prove quasi statiche, o per meglio dire statiche, che naturalmente riprodurranno sperimentalmente delle sollecitazioni statiche. Le più rappresentative sono le prove di trazione e compressione statiche. Ripercorriamone qui di seguito i principali aspetti.

Prova di trazione statica

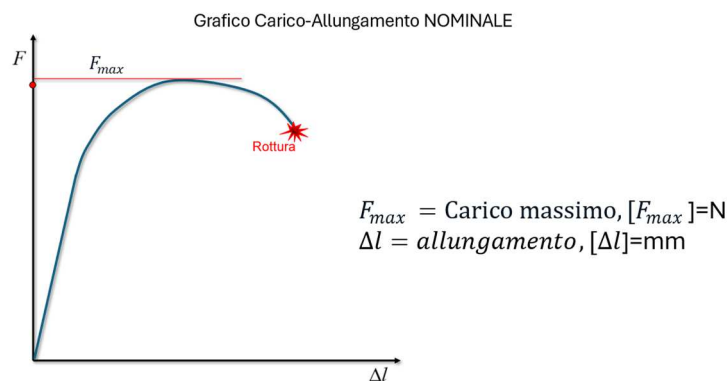
Partendo dal presupposto che il test nella sua interezza è oggetto di norme⁴, sorvoliamo la descrizione del macchinario preposto, in quanto irrilevante ai nostri scopi. Per entrare nel vivo è opportuno partire dalla geometria, quindi dalla forma del provino, comunemente detto a clessidra.

⁴: le normative citate sono le ISO 527-1 & ISO 527-2 Prove di trazione sulle materie plastiche. Inoltre si cita lo standard [ASTM D638](#), equivalente alle normative precedenti. Fonte: <https://www.zwickroell.com/it/settori-industriali/plastiche/materiali-termoplastici-e-termoindurenti-da-stampaggio/prove-di-trazione-iso-527-1-2/>

A seconda dei casi possiamo trovare un campione assialsimmetrico, oppure prismatico, ricavato quindi da una lastra; il tratto comune a entrambe le specifiche è il fatto che la predisposizione degli afferraggi è garantita dalla presenza, alle estremità, di una parte avente una larghezza maggiore rispetto l'elemento centrale che rappresenta la superficie di misura, comunemente detta sezione trasversale A_0 . Durante la prova verranno visualizzati:

- La forza espressa in Newton, misurata tramite una o più celle di carico;
- Lo spostamento, quantificato tramite un trasduttore di spostamento o un estensimetro;

A titolo del tutto introduttivo, diremo che la prova è svolta in regime di deformazione, quindi la variabile indipendente è proprio la deformazione stessa che inizialmente verrà assimilata a un concetto di spostamento o per meglio dire l'allungamento Δl . Verrà inoltre definito con F_{max} il carico massimo al quale il provino potrà resistere. Il macchinario ci restituirà un grafico che relaziona lo spostamento, quindi l'allungamento Δl , al carico F :



Avendo parlato di F_{max} e Δl , quindi di carico massimo e di allungamento, è chiaro che questo modo operandi non ci consente di caratterizzare staticamente il materiale in quanto F_{max} è correlato sia al materiale sia alla geometria del provino testato. Volendo determinare il comportamento statico del materiale, è necessario divincolare la performance, quindi F_{max} , dalla sezione resistente A_0 . Per farlo si utilizzerà un altro parametro di confronto ossia la tensione σ , la quale dimensionalmente rappresenta la normalizzazione della forza rispetto alla sezione trasversale:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad ; \quad [\sigma] = \frac{N}{mm^2} = MPa$$

Parlare di tensione e non di carico ci garantisce una maggior facilità per il procedimento di caratterizzazione, in quanto rende inutile la ripetizione della stessa prova per ogni valore di sezione resistente. Perciò tramutiamo F_{max} in tensione di rottura σ_R :

$$\sigma_R = \frac{F_{max}}{A_0} \equiv \sigma_L$$

σ_L , tensione limite, è un parametro che risponde all'esigenza di caratterizzazione del materiale. Ripetendo un ragionamento analogo per l'allungamento Δl , lo normalizzeremo rispetto la lunghezza iniziale l_0 . Così facendo è possibile introdurre il valore di allungamento specifico o deformazione ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{l_f}{l_0} - 1$$

ε , così espressa, è comunemente detta deformazione ingegneristica o nominale.

Volendo quantificare la deformazione reale, si è obbligati al passaggio a termini infinitesimi, dl :

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = [\log l]_{l_0}^{l_f} \quad , \quad \varepsilon = \log \frac{l_f}{l_0}$$

La deformazione ε intesa come logaritmo del rapporto tra la lunghezza finale e quella iniziale è definita deformazione reale o "true strain". È possibile ragionare indistintamente con la deformazione ingegneristica o reale nell'ipotesi di piccole deformazioni. Tuttavia, per grandi valori di ε , $\varepsilon \approx 1$, è necessario passare al modello della deformazione reale. Volendo analizzare gli effetti della prova di trazione sul campione testato occorre specificare come, per effetto del carico, oltre all'allungamento sempre inteso come deformazione, il provino subisce una variazione trasversale di dimensione sempre opposta a quella vista nella direzione del carico. In particolare, tale deformazione trasversale si lega a quella longitudinale mediante un coefficiente di proporzionalità detto coefficiente di Poisson ν il quale risulta essere espresso nel seguente modo:

$$\nu = \text{coeff. Poisson} \quad \varepsilon_{\text{trasversale}} = -\nu \varepsilon_{\text{longitudinale}}$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{trasversale}}}{\varepsilon_{\text{longitudinale}}}$$

Ad ogni tipologia di materiale corrisponde un coefficiente di Poisson specifico. Ai fini della caratterizzazione è importante introdurre il sopradetto coefficiente, in quanto quest'ultimo ci consente anche di quantificare la variazione specifica di volume tipica di una deformazione elastica. Indicando con ΔV_s la variazione specifica di volume ed assumendo che ε_1 è la deformazione nella direzione di applicazione del carico si ha:

$$\Delta V_s = (1 - 2\nu)\varepsilon_1$$

Sempre per i nostri scopi di caratterizzazione, è importante riconoscere che entro un certo limite esiste un rapporto di proporzionalità tra la forza F e l'allungamento Δl infatti spesso è possibile trovare la seguente relazione:

$$F = K \Delta l \quad \text{con} \quad [F] = N$$

$$[K] = N/mm$$

$$[\Delta l] = mm$$

Il soprascritto modello matematico rappresenta la relazione di proporzionalità tra carico F e allungamento Δl nel campo elastico lineare. K è la costante di proporzionalità, la quale tiene conto sia della geometria del provino sia delle caratteristiche tipiche del materiale, infatti:

$$K = \frac{EA_0}{l_0} \quad \text{dove } E = \text{Modulo di Young}, \quad [E] = \frac{N}{mm^2} = MPa$$

$$F = \frac{EA_0}{l_0} \Delta l$$

Normalizzando ambo i membri per la superficie A_0 e ricordandoci della definizione della deformazione ingegneristica data precedentemente, troveremo la legge di Hooke per il campo elastico.

Quest'ultima rappresenta il legame costitutivo, quindi un modello matematico che lega la tensione con la deformazione, per una sollecitazione mono-assiale:

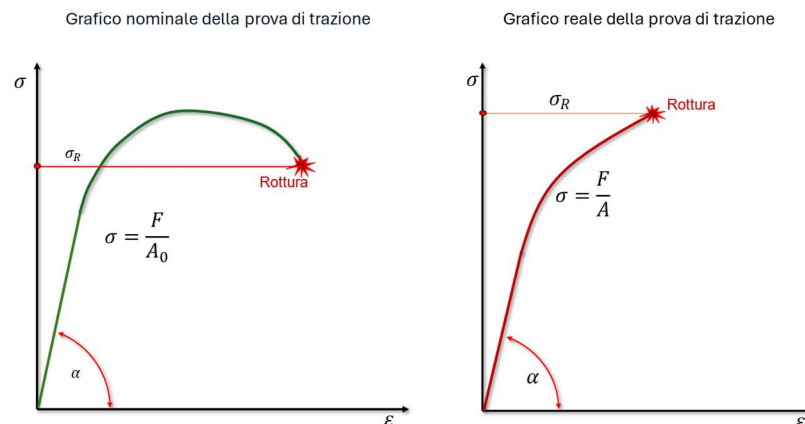
$$\sigma_1 = E \varepsilon_1, \quad \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}$$

Scrivere la legge di Hooke mono-assiale o scrivere la relazione di proporzionalità tra carico e allungamento è sinonimo di scrivere la medesima cosa, ma con la legge di Hooke si riesce ad essere più generici, non facendo riferimento alcuno alla geometria. Tuttavia, a titolo di completezza, è opportuno segnalare che la legge di Hooke, considerando un caso reale, quindi triassiale, applicata sempre ad un provino caricato assialmente a trazione, può essere estesa, facendo i seguenti passaggi logici:

$$\begin{array}{llll} F = K\Delta l & F_1 = K\Delta l_1 & \sigma_1 = E\varepsilon_1 & \varepsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ & F_2 = K\Delta l_2 & \sigma_2 = -\nu E\varepsilon_2 & \varepsilon_2 = \frac{1}{E}[\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \\ & F_3 = K\Delta l_3 & \sigma_3 = -\nu E\varepsilon_3 & \varepsilon_3 = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{array}$$

Assumendo che la direzione 1 è la direzione di applicazione del carico, si ha che le $\varepsilon_{i=1..3}$ e le $\sigma_{i=1..3}$ sono rispettivamente le deformazioni e le tensioni nelle tre direzioni. Ha senso fare questo ragionamento nel caso in cui volessimo quantificare la deformazione in ogni direzione, tenendo conto dei molteplici effetti della prova considerando quindi sia l'allungamento, sia deformazione trasversale, sia le tensioni nelle altre due direzioni alle quali il provino è soggetto. È vero che la prova di trazione è considerata mono-assiale, ma volendo indagare su cosa succede al provino nella realtà è chiaro come sia necessario un approccio più approfondito.

Arrivati a questo punto è possibile quindi introdurre il grafico della prova di trazione, il quale ci fornirà la caratterizzazione statica del materiale correlando la tensione con la deformazione:



Vediamo due tipologie di grafico, a sinistra troviamo il grafico nominale, mentre a destra quello reale. La differenza sostanziale sta proprio nel fatto che in quello reale il parametro di normalizzazione della forza è la sezione trasversale attuale A e non la sezione trasversale iniziale A_0 come in quello nominale. Questo ovviamente comporta un diverso andamento delle curve, in particolare il grafico reale risulta monotono crescente e il punto di rottura è rappresentato dal valore massimo raggiunto dalla tensione. Questa piccola premessa fatta sulle curve ci consente di concentrarci sul tratto iniziale del grafico, corrispondente al campo elastico lineare, in particolare notiamo come questo sia contraddistinto da una certa inclinazione definita dall'angolo α .

L'angolo in questione attraverso la sua tangente individua una caratteristica specifica del materiale, il Modulo di Young il quale, dimensionalmente assume le caratteristiche di una tensione, infatti:

$$E = \text{Modulo di Young}, \quad [E] = \frac{N}{mm^2} = MPa \quad E = tg\alpha$$

Caratterizzare un materiale comporta anche la conoscenza di E , ma quest'ultimo pur essendo legato alla geometria del grafico statico, non verrà determinato misurando l'inclinazione del tratto elastico lineare rispetto il semiasse positivo delle ascisse, in quanto procedendo in questo senso si avrebbe una misurazione caratterizzata da una fortissima incertezza visto che il sistema di misura adoperato garantirebbe una scarsissima sensibilità. Quindi occorre sfruttare altri metodi; è necessario appellarci alle caratteristiche dinamiche del materiale studiato. Sfruttando infatti la dipendenza da E della frequenza propria f del materiale, è possibile condurre una misurazione molto accurata, infatti nota la geometria del provino, in termini di sezione A e lunghezza l abbiamo:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad \text{con } K \equiv \text{rigidezza} = \frac{EA}{l}$$

$m = \text{massa}$

$$E = \frac{4\pi^2 f^2 l m}{A}$$

Ovviamente in questo breve calcolo si fa implicito riferimento al fatto che il provino, destinato al calcolo di E avente geometria nota, sia messo in vibrazione assialmente e non in senso flessionale. Tuttavia, è possibile impostare e risolvere il conto anche con quest'ultima variante di impulso, ma la frequenza propria f del materiale assumerebbe una modellazione differente, in quanto sarebbero comparsi gli annessi momenti di inerzia. Essendo la caratterizzazione statica un'analisi sperimentale volta alla comprensione del comportamento meccanico, in condizioni per l'appunto statiche, è necessario trattare con altrettanta sistematicità la regione plastica del grafico della prova di trazione. Se da una parte una deformazione elastica comporta una variazione specifica di volume, precedentemente indicata con ΔV_s , la deformazione plastica è invece caratterizzata dall'ipotesi che il volume sia costante. In altre parole, in campo plastico è possibile sfruttare l'ipotesi, con i relativi risultati, della **costanza dei volumi**, secondo la quale:

$$A_0 l_0 = A_f l_f$$

$$\frac{A_0}{A_f} = \frac{l_f}{l_0}$$

dove i pedici 0 e f indicano rispettivamente le caratteristiche iniziali e finali. Questa relazione ci consente di: in fase di test, comprendere come verranno riscritte le relazioni di tensione e deformazione; in fase di rielaborazione dati, ci consentiranno di distinguere le relazioni di tipo ingegneristico da quelle di tipo vero o "true" sulle quali saranno basati i rispettivi grafici.

Infatti, ricordando la definizione di deformazione ingegneristica ε e riscrivendo la deformazione reale, ma indicandola con δ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{l_f}{l_0} - 1, \quad 1 + \varepsilon = \frac{l_f}{l_0} \quad \text{con} \quad \frac{A_0}{A_f} = \frac{l_f}{l_0} \quad 1 + \varepsilon = \frac{A_0}{A_f}$$

$$\delta = \log \frac{l_f}{l_0} = \log(1 + \varepsilon), \quad \delta = \log(1 + \varepsilon)$$

è possibile evidenziarne il legame tra δ e ε :

$$e^\delta = 1 + \varepsilon$$

Ora è possibile procedere con il calcolo della σ_{true} in funzione di quella nominale, $\sigma = \frac{F}{A_0}$

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A} = \frac{F A_0}{A A_0} = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon), \quad \sigma_{true} = \sigma (1 + \varepsilon)$$

Avendo note le principali grandezze in gioco, possiamo inquadrare il comportamento plastico del materiale in una prova a trazione. Fondamentalmente il provino va in fallimento dopo un forte assottigliamento della sezione resistente, grossomodo nella sua parte mediana. In altre parole, la rottura è preceduta dal noto fenomeno della *strizione*, la quale fa sì che la variazione trasversale, oltre a superare i valori nominali della deformazione stessa, sia concentrata interamente in un tratto di lunghezza estremamente piccolo, quasi infinitesimo. Di particolare rilievo sono le conseguenze del soprascritto fenomeno il quale, come auspicabile, successivamente a un forte aumento della deformazione plastica conseguentemente a una diminuzione della sezione resistente attuale, innesca dinamiche di instabilità nell'intero provino. Il tutto culmina nella condizione di "Collasso Plastico", la quale prima di essere trattata e definita necessita di altri concetti "preliminari". Iniziamo segnalando il modello matematico che viene utilizzato nel campo plastico:

$$\sigma = k \varepsilon^n, \quad [\sigma] = MPa$$

dove k ed n sono delle caratteristiche del materiale, in particolare n è il coefficiente di incrudimento del materiale. Tale relazione pur essendo di tipo empirico, approssima molto bene il comportamento plastico dei materiali, pur rimanendo in ottica ingegneristica. Volendo passare a termini reali o *true* si ha:

$$\sigma_{true} = K \delta^n, \quad [\sigma_{true}] = MPa$$

Definite le equazioni costitutive del campo plastico, nominali e reali, calcoliamoci il carico di trazione P in funzione di σ_{true} :

$$\sigma_{true} = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{A_0}{e^\delta}} = \frac{P e^\delta}{A_0}, \quad \sigma_{true} = \frac{P e^\delta}{A_0}$$

$$P = \frac{\sigma_{true} A_0}{e^\delta}, \quad [P] = N$$

Ora noto il carico P , le relazioni del campo plastico, possiamo definire la “Condizione di Collasso Plastico” partendo dal presupposto che qualitativamente si instaura quando il provino non riesce più a compensare l’aumento di carico con un incremento della tensione interna. Quantitativamente si definisce come una condizione per la quale la variazione di carico ∂P calcolata rispetto alla variazione di deformazione vera $\partial \delta$ è nulla:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P}{\partial \delta} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial \delta} \left(\sigma_{true} \frac{A_0}{e^\delta} \right) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial \delta} \frac{A_0}{e^\delta} + \sigma_{true} A_0 \frac{\partial}{\partial \delta} \left(\frac{1}{e^\delta} \right) &= 0 \\ \frac{A_0}{e^\delta} \left[\frac{\partial \sigma_{true}}{\partial \delta} - \sigma_{true} \right] &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{true}}{\partial \delta} &= \sigma_{true}\end{aligned}$$

In particolare, sostituendo i vari pedici con quelli di rottura, la relazione che otterremo ci dice che quando il valore della σ_R , raggiunge il valore della sua derivata, $\partial \sigma_R$, calcolata rispetto alla deformazione reale δ , si verifica il collasso plastico:

$$\frac{\partial \sigma_{true}}{\partial \delta} = \sigma_{true} \quad , \quad \frac{\partial \sigma_R}{\partial \delta_R} = \sigma_R$$

Essendo, $\sigma_R = K \delta_R^n$ e $\frac{\partial \sigma_R}{\partial \delta_R} = \sigma_R$, si ha:

$$\frac{\partial \sigma_R}{\partial \delta_R} = \sigma_R \quad , \quad K \delta_R^n = K n \delta_R^{n-1}$$

$$\delta_R = n$$

In particolare, $\delta_R = n$ è una relazione che esprime il seguente concetto: il collasso plastico avviene quando il valore della deformazione reale a rottura δ_R uguaglia l’esponente di incrudimento n a deformazione. Per ultimo, ma non meno importante, è opportuno affrontare l’argomento della velocità di deformazione D . All’inizio della trattazione abbiamo chiarito il fatto che la prova di trazione statica venisse effettuata in regime di deformazione; quindi, con l’impostazione di una deformazione come variabile indipendente che ci permettesse poi l’analisi del valore di carico registrato. D è un parametro molto importante in quanto influenza direttamente quelle che sono le caratteristiche di:

$$\begin{aligned}\sigma_S &\equiv \text{tensione di snervamento;} \\ \varepsilon_R &\equiv \text{deformazione a rottura.}\end{aligned}$$

Le numerosissime evidenze sperimentali testimoniano come, a parità di materiale, di provino, di procedura e di strumentazione, adoperare dei diversi valori di D , $[D] = s^{-1}$, comporti delle diverse tendenze sulle caratteristiche di snervamento, e di rottura. In particolare, si ha che:

- Aumentare il valore di D , ha una tendenza positiva sulla tensione di snervamento σ_S ;

- Aumentare il valore di D , ha una tendenza negativa sulla deformazione a rottura ε_R .

Sinteticamente per spiegare quanto scritto potremmo parlare semplicemente di risposta del materiale, distinguendone la tipologia caso per caso; tuttavia, volendo rispondere al perché di questa evidenza sperimentale proseguiremo dicendo che la variazione di D ha un diretto risvolto sulle performance e comportamenti meccanici dei materiali, tra cui la viscoelasticità e la risposta microstrutturale, in particolare:

1. All'aumentare di D si registra un innalzamento della tensione di snervamento σ_S in quanto ai piani cristallini del materiale non è concesso il tempo necessario per riorganizzarsi, questo porta a una concentrazione di tensione data dalla maggior resistenza opposta dal materiale stesso alla deformazione;
2. All'aumentare di D si registra una diminuzione della deformazione a rottura ε_R in quanto il materiale non riesce a reagire alla deformazione caratterizzata da uno strain rate più alto; perciò, si comporterà in modo più fragile.

Prova di compressione statica

La prova di compressione statica riprende interamente tutti i punti salienti della prova di trazione, intendendo quindi modalità di esecuzione, modellazione matematica, concetti ed ipotesi. L'unica differenza, oltre la geometria del provino, sta nel verso di applicazione di carico. Volendo ragionare in termini di tensioni, invece di una σ positiva, tipica di una sollecitazione di trazione avremo una tensione negativa. Ovviamente le classificazioni positiva e negativa fanno riferimento alla convenzione dei segni secondo la quale ogni tensione di trazione è considerata positiva. Andiamo ad analizzare qualitativamente le eventuali problematiche annesse alla prova di compressione:

1. **Frattura fragile improvvisa:** è possibile che, durante l'esecuzione della prova, si inneschi un crollo improvviso del provino per motivazioni legate a difettosità interne al materiale;
2. **Fenomeni di instabilità elastica:** tipologia di fenomeno che si verifica quando un provino, sotto l'azione di una sollecitazione di compressione, subisce una deformazione improvvisa "trasversale" in direzione circa perpendicolare a quella del carico. Questo comportamento può portare a un collasso strutturale, anche prematuramente a quanto previsto, ed è tipico di elementi longilinei. L'instabilità elastica è spesso associata al fenomeno del "buckling". Nei casi in cui la geometria del campione non fosse allungata è possibile parlare di **fenomeni di imbutitura**.
3. **Disuniformità di sollecitazioni:** l'applicazione del carico potrebbe non essere uniforme, magari per un eventuale cedimento indesiderato del macchinario, generando zone caratterizzate da maggior stress;
4. **Effetti dissipativi (termici):** è noto come la variazione di temperatura vada a modificare le proprietà meccaniche di un materiale; infatti, basti pensare ai fenomeni di attrito che si riscontrano durante la prova, che se non adeguatamente trattati possono falsare la prova stessa;
5. **Fessurazione interna:** difetti preesistenti nel materiale possono amplificarsi durante l'applicazione del carico, sfociando con la formazione di fessure che influiscono sulla resistenza, inficiando la caratterizzazione;
6. **Comportamento residuo:** in qualche caso anche la modalità di rilascio del carico può influenzare la caratterizzazione meccanica del materiale in questione. Si specifica in qualche caso, poiché è possibile decidere dove "spingersi" con il test. Ergo se si arriva a rottura il problema non sussiste.

Queste sono le problematiche per le quali spesso, ove possibile si tende a preferire una prova di trazione a una di compressione quasi statica.

2.2.3.2 CARATTERIZZAZIONE DINAMICA-TEST DELLA BARRA DI HOPKINSON

Per caratterizzazione dinamica intendiamo la parte del processo di analisi sperimentale volta a scoprire il comportamento dinamico del materiale. In questo particolare momento verranno condotte le prove dinamiche, che naturalmente riprodurranno sperimentalmente delle sollecitazioni dinamiche. Funzionalmente al nostro scopo andremo ad affrontare esclusivamente il test condotto con l'ausilio della Barra di Hopkinson

Test della Barra di Hopkinson-Curva Caratteristica Compressione Dinamica

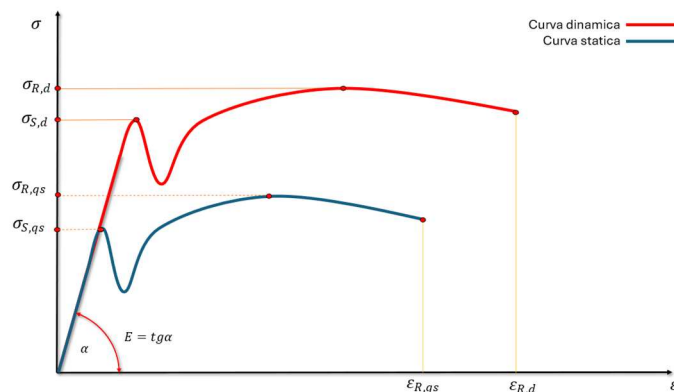
In questa sezione dell'elaborato tratteremo la metodologia, quindi i test che ci consentiranno di rispondere all'esigenza di caratterizzazione dinamica di un materiale oggetto di studio. Volendo entrare nel vivo della questione, andiamo ad enunciare le ragioni per le quali è importante condurre test dinamici. A livello del tutto introduttivo partiamo dal fatto che i materiali vengono sottoposti a test dinamici per studiarne il comportamento ad alte velocità di deformazione:

$$D \equiv \text{velocità di deformazione o strain rate} , [D] = s^{-1}$$

Studiare un materiale ad un elevato strain-rate ci consente nello specifico di comprendere:

- La **variazione della tensione di snervamento σ_S** ;
- La **variazione della tensione di rottura σ_R** ;
- La **variazione dell'allungamento a rottura ϵ_R** ;
- La **variazione del comportamento incrudente del materiale;**

Quindi studiare il comportamento di un materiale ci consente di capire come la curva dinamica "Stress-Strain" si differenzi qualitativamente e quantitativamente da quella statica.



Dal grafico emerge quanto scritto precedentemente ed è possibile apprezzare come la velocità di deformazione D non implichi variazioni rilevanti sul modulo di elasticità del materiale E . Il prossimo passo sarà derivare rispetto al tempo le grandezze che nella caratterizzazione statica individuavano le deformazioni ingegneristiche e reali:

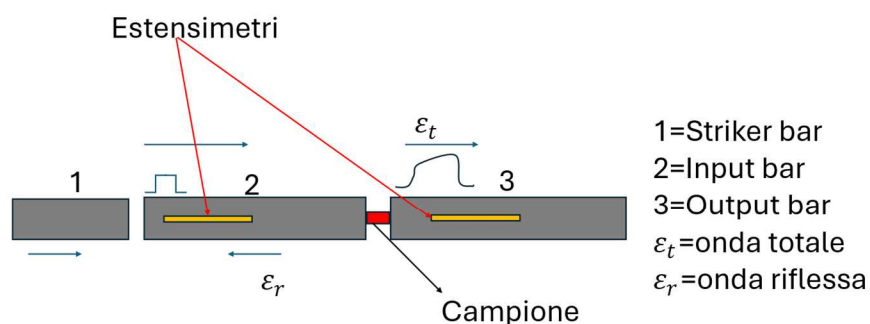
$$\epsilon = \frac{l_f}{l_0} - 1, \quad \dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \text{ con } \dot{\epsilon} = \text{velocità di deformazione ing.}$$

$$\delta = \log(1 + \varepsilon), \quad \dot{\delta} = \frac{d\delta}{dt} = \frac{\dot{\varepsilon}}{1 + \varepsilon} \text{ con } \dot{\delta} = \text{velocità di deformazione true}$$

Quanto scritto sopra vale in caso di strain rate non costanti, in caso fossero costanti si ha, come auspicabile:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t}, \quad \dot{\delta} = \frac{\delta}{t}$$

Ora avendo introdotto le definizioni di velocità di deformazione, sfruttando il concetto di derivata prima rispetto il tempo delle rispettive deformazioni, avviciniamoci al test della Barra di Hopkinson introducendo quella che è la morfologia della strumentazione funzionale alla compressione dei principi celati al suo interno. La tipologia di barra utilizzata è la *Split Hopkinson Pressure Bar*, globalmente composta da tre barre allineate, ossia troviamo la *Striker Bar*, la quale è sparata contro l'*Input Bar*, quest'ultima separata dalla *Output Bar* poiché tra le due sarà interposto il campione:



Il principio fisico attorno il quale ruota il funzionamento della *Split Hopkinson Pressure Bar* è la trasmissione di una sollecitazione dinamica al provino, o di trazione o di compressione, attraverso la creazione e la successiva propagazione di un'onda elastica attraverso un mezzo materiale, rappresentato in questo caso dalle barre in acciaio AISI304. Non volendo intraprendere una trattazione dettagliata sul funzionamento complessivo della sopradetta strumentazione, in quanto si esulerebbe dall'obiettivo dell'elaborato, andiamo ad analizzarne esclusivamente il percorso logico, includendo la modellazione nonché il principio di funzionamento necessario all'ottenimento della curva caratteristica dinamica a compressione. Volendo imprimere una sollecitazione di compressione dinamica al provino, avremo che un martinetto pretensionerà la *Striker bar*, avente lunghezza l , la quale sarà proiettata in avanti verso la barra di input con una velocità \vec{v} . La tensione σ generata al momento dell'impatto tra le due barre, sarà funzione delle caratteristiche del materiale delle stesse, della velocità (del suono) di propagazione dell'onda e la velocità della barra d'input. In particolare:

$$\sigma = \rho c \frac{v}{2} \quad \text{con: } [\rho] = \frac{kg}{m^3} \equiv \text{densità materiale}$$

$$[c] = \frac{m}{s} \equiv \text{vel. propagazione onda}$$

$$[v] = \frac{m}{s} \equiv \text{vel. Striker bar}$$

$$[\sigma] = MPa \equiv \text{tensione d'impatto}$$

L'onda, generatasi inseguito l'impatto tra le due barre, si propagherà con una velocità c , pari a quella del suono funzionalmente alle caratteristiche del materiale:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{con } [E] = \frac{N}{m^2} = MPa$$

$$[\rho] = \frac{kg}{m^3}$$

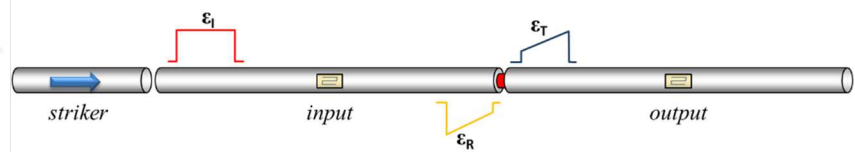
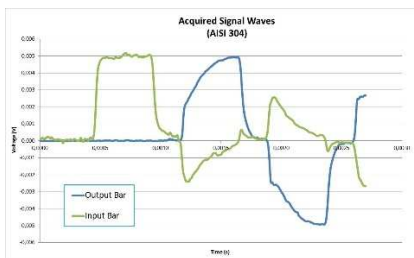
Il tempo con il quale, l'onda percorrerà l'input bar, di lunghezza $2L$, sarà pari a:

$$t = 2 \frac{L}{c} \quad , \quad [L] = m$$

$$[c] = m/s$$

$$[t] = s$$

Il segnale, in termini di variazione di tensione, sarà relazionato al tempo e verrà misurato tramite l'ausilio di alcuni estensimetri opportunamente alimentati e collegati alla barra tramite il notorio schema del Ponte di Wheatstone, in particolare due dei quattro estremi del ponte sono alimentati da comunissime batterie ricaricabili, gli altri due sono "liberi" e sono preposti alla misurazione vera e propria. Volendo fare un esempio di segnale per il caso della compressione dinamica si ha:



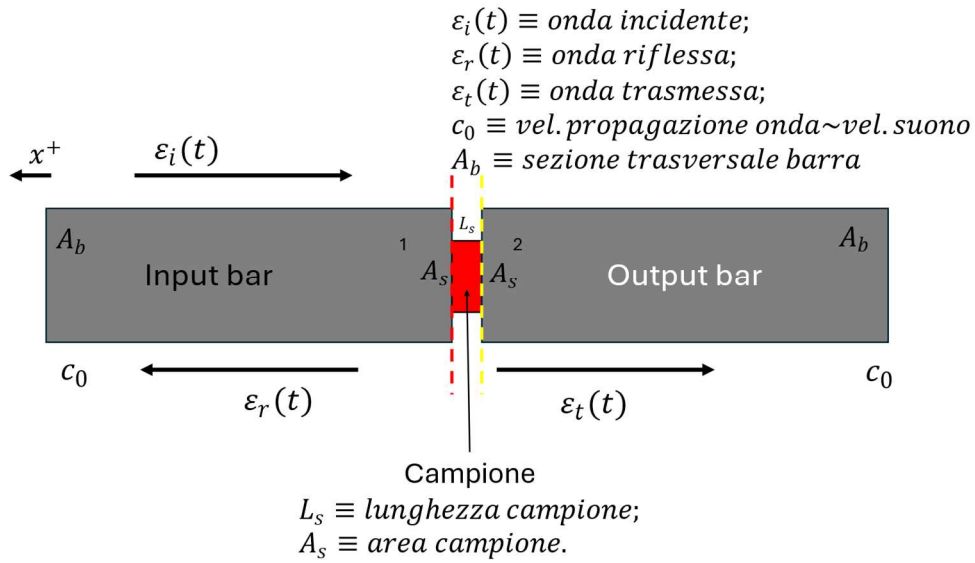
5

Per la misurazione della deformazione nominale ε , della velocità di deformazione D e della tensione nominale nel provino σ sono necessarie alcune ipotesi:

- La propagazione delle onde nelle barre di pressione può essere approssimata da una teoria monodimensionale elastica;
- La distribuzione delle deformazioni è uniforme;
- Lo stato tensionale del provino è anch'esso uniforme e monodimensionale;
- Essendo trascurabile la massa del provino rispetto alle barre, l'effetto inerziale sia in senso radiale sia longitudinale del provino è irrilevante; perciò, è garantito l'equilibrio dinamico del campione;
- Non si considerano effetti dissipativi legati all'attrito delle interfacce barre di pressione-provino;
- Il fenomeno di dispersione meccanica delle onde elastiche è inconsistente in quanto l'effetto inerziale delle barre di pressione è trascurabile;
- La lunghezza del provino è trascurabile, visto la grossa differenza con la lunghezza delle barre.

Ponendoci all'interfaccia provino-barra, sfruttando i risultati della teoria di propagazione monodimensionale delle onde elastiche, definendo un sistema di riferimento con verso positivo nel senso decrescente delle ascisse avremo:

⁵: nella figura 5 troviamo un esempio di segnale per una prova di compressione dinamica. Inoltre, la fonte dello schema della barra è la seguente: Design of an Innovative System for Wave Generation in Direct Tension-Compression Split Hopkinson Bar E. Mancini1 • M. Sasso1 • M. Rossi1 • G. Chiappini1 • G. Newaz2 • D. Amodio



Concentrandoci sull' *Input Bar*, diremo che la sua sezione A_b e materiale E_b sono identici a quelli dell'*Output bar*, come anche la velocità di propagazione dell'onda, quindi la velocità del suono c_0 . Sull'*Input bar* le onde interessate sono quella incidente ε_i e quella riflessa ε_r . Fatti questi presupposti è possibile calcolare, con un semplice integrale definito, lo spostamento u_1 e il carico P_1 agente sulla barra:

$$u_1 = c_0 \int_0^t [\varepsilon_r(\tau) - \varepsilon_i(\tau)] d\tau$$

$$P_1(t) = A_b E_b [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)]$$

Volendo calcolare le omonime grandezze dell'*Output bar*, facendo considerazioni analoghe si ha:

$$u_2 = -c_0 \int_0^t \varepsilon_t(\tau) d\tau$$

$$P_2(t) = A_b E_b [\varepsilon_t(t)]$$

Passiamo al calcolo ora del valor medio della deformazione $\varepsilon(t)$ e tensione $\sigma(t)$, ovviamente entrambe ingegneristiche, avremo:

$$\varepsilon(t) = \frac{[u_2(t) - u_1(t)]}{L_s} = -\frac{c_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_i(\tau) - \varepsilon_r(\tau) - \varepsilon_t(\tau)] d\tau$$

$$\sigma(t) = \frac{[P_1(t) + P_2(t)]}{2A_s} = \frac{A_b E_b}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)]$$

Sfruttando l'ipotesi dove si scriveva che l'equilibrio dinamico è soddisfatto si ha:

$$P_1(t) = P_2(t) \quad , \quad \varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t)$$

Calcolando la derivata di $\varepsilon(t)$ sarà possibile parlare di *strain-rate* coerentemente espresso da $\varepsilon'(t)$:

$$\varepsilon'(t) = \frac{c_0}{L_s} \frac{d[\varepsilon(t)]}{dt} = \frac{c_0}{L_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)]$$

Sostituendo il risultato dell'equilibrio dinamico, $\varepsilon_t(t) = \varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)$ in $\varepsilon'(t)$:

$$\varepsilon'(t) = \frac{c_0}{L_s} [-2\varepsilon_r(t)] \quad , \quad \varepsilon'(t) \propto \varepsilon_r(t)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{-2c_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_r(\tau)] d\tau$$

Reiterando il processo di sostituzione del risultato dell'equilibrio dinamico nell'espressione di $\sigma(t)$:

$$\sigma(t) = \frac{A_b E_b}{A_s} [\varepsilon_t(t)] \quad , \quad \sigma(t) \propto \varepsilon_t(t)$$

Sinteticamente è chiaro come $\dot{\varepsilon}(t) \propto \varepsilon_r(t)$ direttamente, dove $\varepsilon_r(t)$ non è altro che l'onda riflessa (di trazione), quindi lo strain-rate, anch'esso funzione del tempo sarà strettamente correlato all'onda compressiva incidente $\varepsilon_i(t)$. Grazie all'apposito estensimetro sito sulla barra di input si riceve il segnale $\varepsilon_r(t)$, il quale previo operazione di integrazione immediata quantificherà il valore di $\varepsilon(t)$, nonché entità della deformazione nominale del campione. Analogamente è appurato che $\sigma(t) \propto \varepsilon_t(t)$ direttamente, dove $\varepsilon_t(t)$ è semplicemente l'onda trasmessa compressiva. Sfruttando l'estensimetro sito sull'Output bar riusciremo a calcolarne il valore. Previa sincronizzazione dei segnali dell'onda riflessa $\varepsilon_r(t)$ e trasmessa $\varepsilon_t(t)$, sarà possibile elidere il tempo dalle rispettive relazioni e raggiungere le modellazioni costitutive necessarie per la caratterizzazione del materiale:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_0}{L_s} [\varepsilon_r(t)] \qquad \varepsilon(t) = -\frac{2c_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_r(\tau)] d\tau \qquad \sigma(t) = \frac{A_b E_b}{A_s} [\varepsilon_t(t)]$$

Le soprascritte equazioni standard di Hopkinson-Kolsky consentono di quantificare tensioni e deformazioni ingegneristiche all'interno del provino in quanto fanno riferimento alla lunghezza iniziale L_s ed alla sezione trasversale A_s iniziale del campione esaminato. È possibile considerare le tensioni e deformazioni ingegneristiche prossime ai valori reali solamente in condizioni di Strain-rate non particolarmente elevato. In tal caso sarà opportuno definire le relazioni che consentiranno al passaggio a valori reali. La relazione tra i valori reali e ingegneristici è analoga a quella vista per il caso statico; perciò, per riscrivere i modelli di deformazione e tensione reale si ripeterà il ragionamento partendo dallo stesso punto per giungere a risultati comparabili pur essendo in ambito diverso dal precedente, per l'appunto dinamico. Riportiamo esclusivamente l'espressione di δ , quindi della deformazione reale e di σ_{true} , quindi tensione reale:

$$\delta = \log(1 + \varepsilon) \quad , \quad \sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad \text{con } 1 + \varepsilon = \frac{A_0}{A_f}$$

2.2.4 Caratterizzazione meccanica-ATTIVITA' DI POST PROCESSING

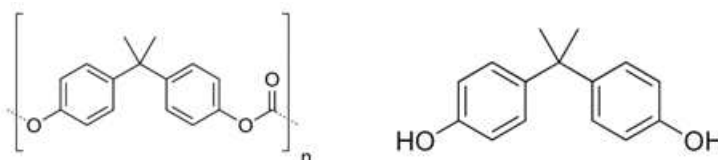
Un'altra fase di primaria importanza del processo di caratterizzazione di un materiale è sicuramente l'insieme di attività atte alla rielaborazione dei dati forniti dalle prove sperimentali. Per rielaborazione intendiamo un processo iterativo che ha come scopo quello di: raccogliere, analizzare, rimaneggiare e infine di rendere fruibili le evidenze provenienti dalle prove strumentali. Sinteticamente, si sta parlando delle attività di post-processing. Il procedimento di rielaborazione dei dati è ovviamente funzione del tipo di caratterizzazione che si vuole condurre sul materiale oggetto di studio, in particolare essendo noi interessati alla comprensione del comportamento meccanico, svolgeremo delle attività di post processing mirate alla quantificazione di parametri funzionali all'analisi sperimentale del comportamento meccanico a trazione e compressione sia in condizioni statiche sia in dinamiche.

Concettualmente, ai fini di afferrare l'idea, è possibile dire che è la totalità delle attività di post-processing che consente di giungere ai risultati cercati, quindi per esempio alla ricostruzione della curva tensione-deformazione ($\sigma - \epsilon$) dei materiali testati e alla definizione dei parametri costitutivi secondo leggi che tengono conto dello strain-rate, dell'incrudimento, della temperatura. È opportuno segnalare che questa fase, pur essendo molto rilevante, è equipollente, quindi non prevalente, rispetto tutte le altre. Più semplicisticamente basta ricordarsi quanto scritto nel paragrafo 2.2, si riportano testuali parole: "Non esistono fasi più o meno importanti in quanto ognuna è essenziale in egual modo per raggiungere l'obiettivo". Concludendo, come precedentemente già detto, volendo attribuire a questo specifico taglio dell'elaborato una sfumatura quasi didattica, come se si volesse redigere delle linee guida per la caratterizzazione meccanica di un materiale, ci limiteremo, solo per ora, a far sì che vengano compresi i principi generali delle fasi nonché la loro mutua interazione, per poi approfondire a momento debito. Perciò rimanderemo la trattazione delle attività specifiche di post processing solo dopo aver introdotto i test, con relative evidenze sperimentali, del policarbonato sperimentale.

3. CARTA D'IDENTITA' POLICARBONATO CONVENZIONALE-PC DIN 7728

3.1 CARATTERISTICHE E APPLICAZIONI TIPICHE DEL PC DIN 7728

Avendo gettato le basi del nostro percorso, trattate quindi tutte le fasi del processo, avviciniamoci maggiormente al nostro casus studi introducendo la tipologia di POLICARBONATO convenzionale. Allo scopo di voler distinguere il materiale convenzionale da quello sperimentale, assegneremo al primo la nomenclatura normata vigente; si parlerà perciò di POLICARBONATO PC DIN 7728 E 16780⁶ compatto. Il PC è un tecnopolimero ottenuto dall'acido carbonico, H_2CO_3 , appartenente alla famiglia delle resine poliesteri. Globalmente è possibile ottenere il PC da diverse sostanze, ma ricordiamo, per i nostri fini, quello ottenuto dal bisfenolo-a (BPA) $C_{15}H_{16}O_2$. Quest'ultimo è una sostanza organica di sintesi con due gruppi fenolici terminali. È noto anche come **2,2-bis (4-idrossifenil) propano**. Il BPA è largamente usato come additivo nella produzione di materie plastiche, tra cui il PC. Inoltre, trova impiego nella realizzazione di rivestimenti per contenitori alimentari, sottoforma di resine di tipo epossidico. A seguire la formula di struttura del PC a sinistra e a destra del BPA:



Un tecnopolimero è un materiale, per l'appunto polimerico, che si differenzia dagli altri per il suo particolare processo di formatura; infatti, in un primo momento necessita di calore, per poi passare a un successivo raffreddamento per il fissaggio della forma. È contraddistinto da lunghe catene di legami COVALENTI e SECONDARI. Presenza di Carbonio, Azoto, Ossigeno. Comportamento tipicamente VISCO-ELASTICO. Inoltre, il PC, essendo un tecnopolimero, è opportuno segnalarne le sue proprietà meccaniche di particolare spessore; è possibile affermare che genericamente sono superiori a quelle di un qualsiasi polimero di massa. Andando nello specifico invece, ricordiamo la sua discreta lavorabilità, la sua spiccata resistenza agli urti, nonché la sua malleabilità, duttilità e stabilità. Questo mix di caratteristiche conferisce al materiale in esame un'estrema versatilità; elenchiamone i principali impieghi: partiamo dall'ambito della sicurezza nelle industrie; è possibile trovare manufatti di PC a livello di protezione per i tecnici alle macchine utensili.

DIN 7728 E 16780⁶: sono le normative vigenti che associano un'identificazione univoca a ogni materia plastica.

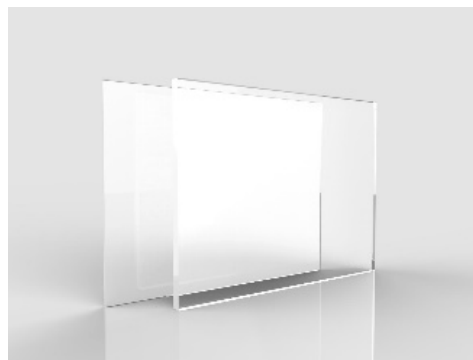
Continuando, arriviamo all'edilizia; basta pensare alle finestre dei lucernai in PC e non in vetro; o ancora ricordiamo il settore degli elettrodomestici, qui è impiegato nella costruzione dei casing destinati a termostati e resistenze. Per ultimo potremmo rivolgerci al mondo automotive, dove è impiegato nella produzione della fanaleria e nella finestratura dell'auto.



2. In foto, un impiego di un particolare PC, il Lexan™, per la costruzione dell'intera fanaleria e finestratura dell'Alfa Romeo Giulia Quadrifoglio GTAM.

Per ragioni di completezza, terminiamo questo piccolo excursus a carattere generico sul PC accennando una definizione non troppo approfondita sulle caratteristiche delle resine poliestere; ossia appartengono a una particolare tipologia di sostanza resinosa contraddistinta dal legame ESTERE, che vede coinvolti un gruppo fosfato ed un alcool in un processo di «estereficazione» con eliminazione di acqua. Pur avendo dato un'indicazione della natura chimica del materiale, non si è voluto approfondire ulteriormente in quanto l'oggetto di questo elaborato è la caratterizzazione meccanica e non chimica del materiale. Contrariamente, volendo inquadrare "meccanicamente" il PC DIN 7728 compatto, elenchiamone alcune caratteristiche di rilievo ingegneristico:

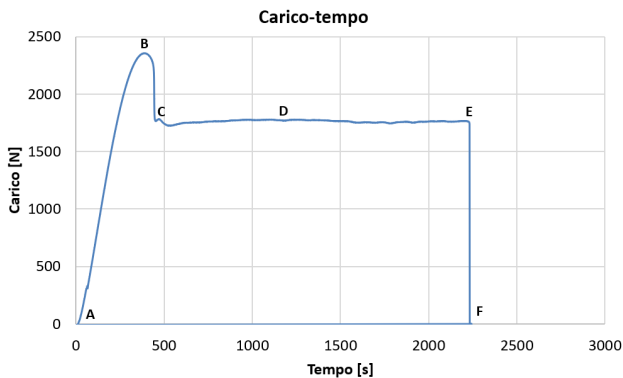
- Densità $\rho_{PC} = 1,2 \text{ g/cm}^3$;
- Tensione di snervamento $\sigma_S \sim 60 \text{ MPa}$;
- Tensione di rottura $\sigma_R \sim 70 \text{ MPa}$;
- Modulo di Young $E \sim 2300 \text{ MPa}$ (costante fino a 130°C);
- Resistenza di Charpy senza intaglio $K_{un.} \geq 50 \text{ kJ/m}^2$;
- Resistenza di Charpy con intaglio $K_n \leq 50 \text{ kJ/m}^2$;
- Resistenza all'impatto $u, 640 < u < 840$ con $[u] = \text{J/m}$;
- Intervallo di temperatura massima di utilizzo $T_{MAX}, 100 < T_{MAX} < 180$ con $[T_{MAX}] = ^\circ\text{C}$;
- Temperatura di fusione $T_f, 200 < T_f < 250$ con $[T_f] = ^\circ\text{C}$;
- Temperatura di transizione vetrosa $T_g = 150^\circ\text{C}$;
- Coefficiente di dilatazione termica $\alpha = 68 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.



3. Vediamo un comunissimo manufatto laminare di PC DIN 7728 compatto.

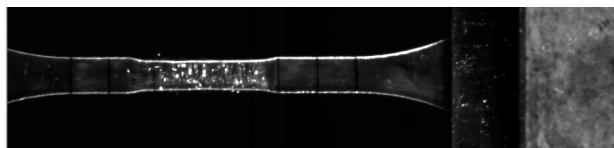
3.2 ANALISI QUALITATIVA DELLA RISPOSTA STATICA A TRAZIONE DEL PC DIN 7728

Passiamo ora all'analisi qualitativa della risposta del materiale a una sollecitazione STATICA di trazione. Servendoci del successivo diagramma Carico-Tempo si ha:



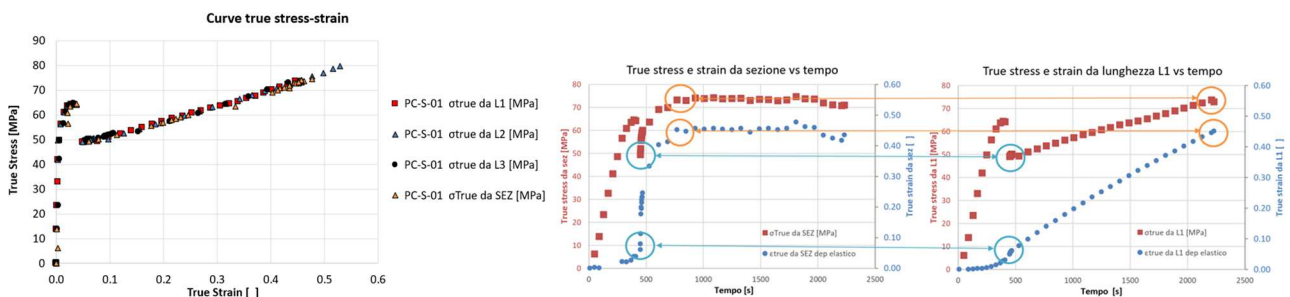
\overline{AB} = strain uniforme;
 \overline{BC} = strain localizzata (strizione);
 \overline{CD} = transione/propagazione dello strain localizzato;
 \overline{DE} = zona di rottura;
 \overline{EF} = rottura avvenuta.

Dal grafico emerge che in un primo tratto, \overline{AB} , lo strain è uniforme. Arrivati in B, oltre ad avere il picco di carico, ha luogo un importantissimo fenomeno, in particolare da uno strain uniforme si passa a una localizzazione dello strain. In altre parole, si sta assumendo che in B abbia inizio la strizione, la quale continua per tutto il tratto \overline{BC} . Ora lo strain diventa molto severo, facendo sì che si verifichi una forte riduzione in larghezza (trasversalmente alla direzione di applicazione del carico) concentrata in un tratto brevissimo di lunghezza. Proseguendo in \overline{CE} , lo strain che prima era localizzato in un tratto infinitesimo della lunghezza del provino, si espande con la contemporanea apparizione del fenomeno di *crazing*, ossia la formazione di bolle:



4. Visualizzazione del fenomeno di "Crazing" tipico del PC.

La rottura del provino avviene nel tratto di diagramma \overline{EF} in qualche istante di tempo prima che il tratto interessato dallo strain copra interamente la lunghezza del provino. In F la rottura è pressoché avvenuta.⁷ Passando ai diagrammi Stress-Strain ($\sigma - \epsilon$) di tipo *true* troviamo una corrispondenza qualitativa nell'andamento delle curve con il grafico precedentemente analizzato:



Analizzando ulteriori tipologie di grafici, quelli "Area-based" e quelli "Lenght-based", oltre alla similarità qualitativa, è possibile apprezzare come le curve "Area-based" siano più veloci delle altre. Si tange la differenza analizzando i tempi che intercorrono tra l'inizio della localizzazione dello strain e il valore finale dello stesso; in particolare i diagrammi "Lenght-based" sono più lenti tra i due⁷.

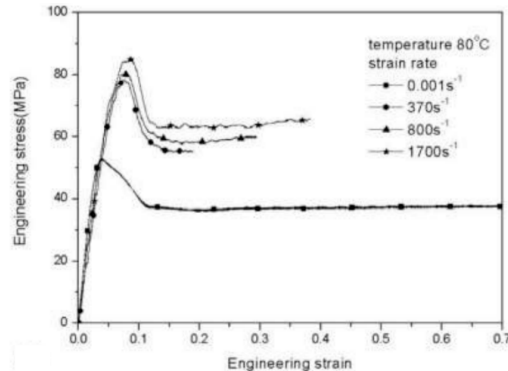
⁷: dati riguardanti PC-S-01 con strain rate $D = 0,0003s^{-1}$ di un provino di sezione rettangolare $A_0 = w_0 b_0 = 9,96 \cdot 3,87 = 38,55mm^2$ con $l_0 = 60mm$ fonte XTREMA

3.3 ANALISI QUALITATIVA DELLA RIPOSTA DINAMICA PC DIN 7728

In condizioni **dinamiche**, a livello generico il PC è affine con gli altri polimeri, in particolare a un aumento della velocità di deformazione D corrisponde una diminuzione della duttilità con un conseguente aumento per la tensione di snervamento σ_S , legame che viene mantenuto anche in fasi post-snervamento.

Analiticamente osserviamo che la pendenza della curva è funzione della velocità di deformazione e della temperatura. Seppur il processo di deformazione con alti valori di *strain rate* comporti un aumento di temperatura, il processo può essere considerato adiabatico in quanto, proprio per la brevità in termini temporali del processo, il calore non ha tempo di dissiparsi⁸.

5. Nel diagramma sottostante abbiamo la curva Stress-Strain INGEGNERISTICA a trazione DINAMICA del PC



4. CARATTERIZZAZIONE PC SPERIMENTALE

In questa sezione specifica dell'elaborato entreremo nel vivo della questione andando ad affrontare sistematicamente ogni passo necessario alla caratterizzazione del PC sperimentale nonché l'analisi del suo comportamento meccanico in condizioni statiche e dinamiche con il conseguente ottenimento delle curve caratteristiche desiderate.

4.1 PREPARAZIONE DEI PROVINI DI PC SPERIMENTALE

Con questa fase ha inizio il processo iterativo che ci porterà alla comprensione del comportamento meccanico del PC sperimentale. Procedendo con ordine, occorre segnalare che il materiale è stato fornito sottoforma di semilavorato laminare incolore avente spessore 4 mm. Come già scritto, il procedimento di formatura dei provini è stato ideato, scelto e messo in pratica perseguendo un duplice scopo: in primis è stato fatto il possibile affinché al materiale non venisse trasmesso nessun tipo di stress e/o sollecitazione e in secundis si è lavorato per ottenere la forma più vicina possibile a quella ideale necessaria all'esecuzione dei successivi test. Se non si fossero mantenute queste due linee guida i test che si sarebbero effettuati successivamente e gli annessi risultati sarebbero stati tutt'altro che veritieri e consistenti. Perciò, sfruttando la strumentazione del laboratorio di Facoltà, si è optato per una prima sgrossatura con l'ausilio di utensili taglio, con l'obiettivo di separare dalla lamina un manufatto avente una forma più vicina a quella richiesta dal test, ma soprattutto avente una geometria che ne esaltasse la maneggevolezza del campione; caratteristica fortemente richiesta per la successiva rifinitura a mano, la quale ha visto l'utilizzo combinato di pialle, carta vetrata e una mola orbitale leggera.

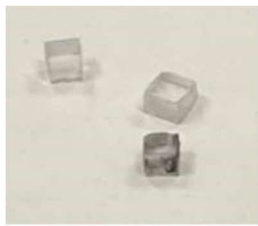
⁸: la fonte dalla quale è stato ripreso il comportamento dinamico del PC è: Kan Cao, Yang Wang, Yu Wang, Experimental investigation and modeling of the tension behavior of polycarbonate with temperature effects from low to high strain rates.

Fondamentalmente sono state realizzate quattro tipologie di geometria di provino⁹:

- Per la prova di trazione statica è stata realizzata una serie di provini a classidra, la quale è caratterizzata da una sezione resistente iniziale $A_{5qs} = 22,4mm^2$, da una lunghezza iniziale $l_0 = 75,2mm$ e da uno spessore iniziale pari a quello della lamina [foto 1)]
- Per la prova di compressione statica sono state realizzate più geometrie:
 - Provini cilindrici, aventi un diametro iniziale medio $d_0 = 15,3mm$ e uno spessore iniziale identico a quello della lamina. Ricordiamone le aree iniziali $A_{1,2qs} = 183,85mm^2$ [foto 3)];
 - Provini simil-cubici, aventi una dimensione pari allo spessore della lamina, e le altre due mediamente di circa 5mm. Ricordiamone le aree iniziali: $A_{3qs} = 24,16mm^2$, per il cubo n°3 e $A_{4qs} = 25,63mm^2$ per il n°4 [foto 2)].
- Per le prove di compressione dinamica alla Barra di Hopkinson è stata realizzata un'unica tipologia di provini avente forma cilindrica con diametro iniziale $d_0 = 7,5mm$ e spessore analogo a quello del laminato. Ricordandone le sezioni trasversali: $A_{3-d} = 44,2mm^2$. In più si è condotto un ulteriore test con un provino di sezione identica a quella dei provini destinati alla prova di compressione statica $A_{7d} = 183,85mm^2$ [foto 3)].



1)



2)



3)



4)



5)

Il processo di preparazione dei provini è culminato con la preparazione dello *speckle* ossia una particolare verniciatura a contrasto propedeutica per il corretto funzionamento del software di acquisizione di dati utilizzato, dove il bianco fungeva da base e il nero da agente per il contrasto [foto5)].

4.2 ALLESTIMENTO HARDWARE PER TEST PC SPERIMENTALE

In questa sezione verranno analizzati gli allestimenti degli hardware necessari allo svolgimento dei successivi test. Verranno elencati i principali parametri adoperati, riguardanti sia la strumentazione, sia il sistema di acquisizione dati allo scopo di definire il contesto sperimentale nel quale si sono svolte le prove.

4.2.1 Allestimento hardware-TEST STATICI

Per la prova di trazione statica è stato adoperato il macchinario disponibile al Dipartimento Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche=DIISM del laboratorio di Costruzione di Macchine di Facoltà. Successivamente è stato aggiunto un sistema di acquisizione dati composto totalmente da 8 sensori ottici ad alta frequenza di acquisizione immagini ed alta risoluzione, ma solamente 6 effettivamente operativi. È opportuno specificare come due di questi canali fossero collegati a MatchID e le altre rimanenti, tranne due, non utilizzate, a Labview. I principali dati riguardanti il set-up per la prova di trazione sono i seguenti: la frequenza di acquisizione adoperata è stata $\nu = 5Hz$, lo spostamento $\Delta l = 30mm$, il tempo impiegato $t = 250s$ [foto 1)].

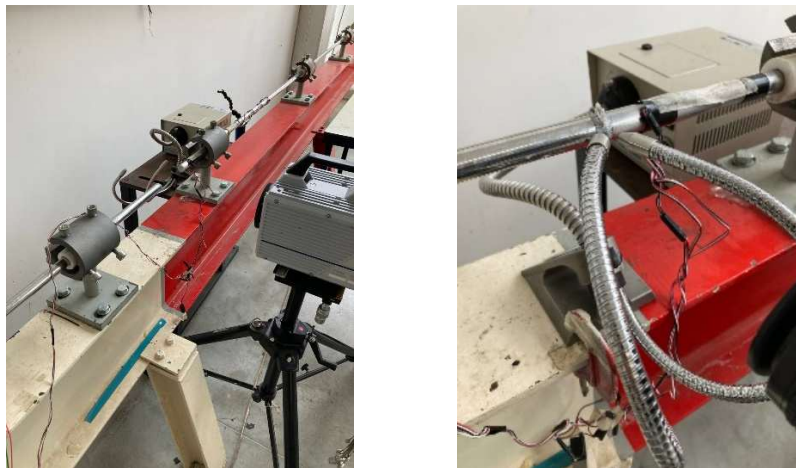
⁹: alla sezione di ogni provino è associato un pedice che indica il numero associato alla tipologia del test qs =quasi statico e d =dinamico

Mentre per la prova di compressione statica è stato adoperato lo stesso macchinario utilizzato per il precedente test, previa applicazione di afferraggi appositi. Successivamente si è applicato un sistema di acquisizione dati del tutto analogo a quello usato precedentemente, ma composto solamente da due sensori ottici collegati a MatchID. I principali dati riguardanti il set-up per la prova di compressione sono analoghi a quelli utilizzati per la trazione: $v=5Hz$, $\Delta l = 30mm$, $t = 250s$ [foto2].



4.2.2 Allestimento hardware-TEST DINAMICI

Per la prova di compressione dinamica si è utilizzata la Barra di Hopkinson installata presso i laboratori di Facoltà. Successivamente è stata applicata una FAST-CAM, ossia un sensore ottico in grado di acquisire con un altissimo numero di FPS, in caso di acquisizione di video, oppure con un'altissima risoluzione e frequenza in caso di immagini. Per fissare le idee, basta pensare che i dati relativi le prove dinamiche sono stati acquisiti a ben 125'000 FPS.



6. In foto, alcuni momenti dell'allestimento ed esecuzione dei test alla Barra di Hopkinson.

Per ultimo, ma non per importanza, è stato allestito un sistema di estensimetri, disposto secondo lo schema del «Ponte di Wheatstone», nel quale due dei quattro estremi sono stati alimentati da batterie ricaricabili, mentre i rimanenti sono stati adoperati per la misurazione vera e propria dei segnali, intesi come variazione di tensione espressa in Volt, provenienti dall' *Input* e dall' *Output bar*. Opportunamente elaborati, questi ultimi consentiranno l'extrapolazione successiva della curva caratteristica cercata. Sopra è mostrato l'allestimento della barra, da notare la sorgente luminosa, la quale è stata gestita minuziosamente per evitare il surriscaldamento del policarbonato e un conseguente esito falsato dei test.

Prima di passare alla sezione successiva, quindi al confronto qualitativo dei provini pre-post test è opportuno spiegare il perché si sono utilizzati più sistemi di acquisizione dati. Si parta dal presupposto che, ogni software impiegato, singolarmente avrebbe potuto restituirci tutti i dati di interesse (vedremo poi quali nella sezione dedicata), ma si è preferito utilizzare più sistemi per avere una visione più completa del test e per essere sicuri di adoperare per ogni dato di interesse il software più consono.

4.3 ESECUZIONE TEST PC SPERIMENTALE

Avendo già trattato le modalità di esecuzione e inquadrato il contesto sperimentale dei test, per non essere ridondanti, in questa sezione ci limiteremo a commentare il comportamento del materiale durante la prova analizzata. Successivamente confronteremo qualitativamente i provini prima e dopo tutti i test, visionando alcune immagini funzionali allo scopo.

4.3.1 esecuzione test-TEST STATICI

Prova di trazione

Durante la prova di trazione si è visto come il comportamento del PC sperimentale fosse analogo a quello convenzionale, in particolare si è visto come, per un tratto iniziale, in corrispondenza del campo elastico del materiale, il provino si deformasse elasticamente. Successivamente, in corrispondenza del massimo carico registrato, lo strain si è localizzato, con la conseguente comparsa della strizione, ossia di una forte variazione di larghezza distribuita in un tratto infinitesimo della lunghezza del provino. Procedendo, lo strain, da localizzato che era, ha iniziato a propagarsi ed in particolare si è individuato un piano di scorrimento inclinato di 45° rispetto al piano degli afferraggi. Una volta che lo strain ha interessato un tratto di lunghezza paragonabile alla lunghezza iniziale l_0 del provino, si è visualizzata la prima lacerazione del materiale che ha comportato la successiva rottura.



7. Da sinistra a destra vediamo il piano di scorrimento, la rottura del provino e un confronto tra il provino pre-post test a trazione statica.

Prova di compressione

Prima di commentare il comportamento meccanico emerso dai test, è doveroso segnalare che per i provini di geometria simil-cubica è stata variata la direzione di applicazione del carico. In particolare, per il test n°4, di sezione $A_{4qs} = 25,63 \text{ mm}^2$, il carico è stato applicato perpendicolarmente alla faccia di dimensioni $A_{4qs} = 5,34 \cdot 4,8 = 25,63 \text{ mm}^2$, quindi lungo la dimensione che originariamente era lo spessore della lamina iniziale. Per il test n°3, di sezione $A_{3qs} = 24,16 \text{ mm}^2$, il carico è stato applicato perpendicolarmente alla faccia di dimensioni $A_{3qs} = 4 \cdot 6,04 = 24,16 \text{ mm}^2$, quindi perpendicolarmente alla dimensione che in origine era lo spessore della lamina iniziale. Si è optato per questa diversificazione per vedere quanto realmente impattasse la variazione della direzione di applicazione del carico sulla risposta meccanica del materiale. Indipendentemente dalla geometria del provino, qualitativamente il comportamento a compressione è stato analogo, nello specifico, dopo un primo comportamento elastico del materiale, si è verificato un fenomeno di barilottatura seguita da un'apparente densificazione del materiale in fase di post-snervamento. Quando poi il soprascritto fenomeno di barilottatura è diventato molto severo, il materiale è andato in contro al fallimento, arrivando a rottura.

Sempre dal test è stato possibile scovare, un minimo cedimento δ del macchinario per la compressione, probabilmente dovuto a una disuniformità di applicazione del carico o a una problematica riguardante lo stato d'usura e di manutenzione dello stesso.

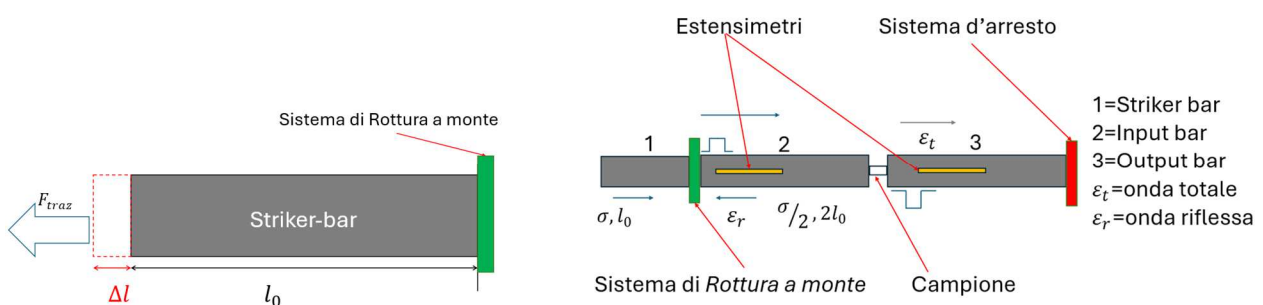


8. In foto, un confronto tra i provini destinati a compressione statica, notare quanto sia apprezzabile la differenza nei provini simil-cubici.

4.3.2 esecuzione test-TEST DINAMICI

Prova di compressione dinamica

Diversamente dalle prove statiche, avendo precedentemente parlato solo ed esclusivamente dei concetti logici con annesse modellazioni matematiche, è opportuno dare un'indicazione riguardante le principali azioni necessarie per l'esecuzione delle prove dinamiche. Dopo aver completato tutte le *operazioni generali*, come aver allestito correttamente il sistema di estensimetri ed aver reso operativa la fast-cam impostando i più consoni parametri di *trigger* e di *threshold* nei relativi sistemi di acquisizione dati, si procede intervenendo sul sistema di battuta detto "Rottura a monte" selezionando in primis il corretto elemento toroidale sacrificale con relativo posizionamento, verificandone in secundis il suo corretto orientamento, ossia verso la *Striker bar*. Segue poi la lubrificazione del provino e successivo procedimento di alloggiamento e centraggio dello stesso rispetto le *Input bar* e *Output bar*. Volendo noi testare la caratteristica di compressione dinamica, è necessario sottoporre la *Striker bar* a uno stress di trazione; perciò, il martinetto provvederà a tirare la barra allontanandola dalla sua posizione iniziale. Sfruttando l'elasticità delle barre, nel momento in cui viene tolto il carico, la *Striker bar* tenderà a ritornare nella sua posizione di partenza e quindi si avrà la conseguente trasmissione di una forza di compressione, sull'intera *Input bar* e quindi di un'onda di compressione. Il vincolo di incastro, come auspicabile, è realizzato grazie al sopradescritto sistema di battuta detto "Rottura a monte". Pretensionando la *Striker bar* di lunghezza l_0 , ad un certo valore di tensione σ , viene generata un'onda *quadra* di ampiezza $\sigma/2$ e una lunghezza d'onda pari a $2l_0$:



Tralasciando tutta la modellazione matematica, in quanto già trattata, ci limiteremo a osservare che nel momento in cui l'onda investe il provino, parte di essa lo attraverserà mantenendo lo stesso segno dell'onda di input, mentre l'altra parte verrà riflessa e avrà segno opposto alla precedente. Le ampiezze delle due onde vengono quantificate grazie alla presenza del sistema sopradescritto di estensimetri.

Nella parte finale dev'essere reso operativo il sistema di arresto, il quale prima dell'esecuzione del test dev'essere opportunamente precaricato mediante operazione di serraggio o smollo del relativo accoppiamento filettato. Chiarita la preparazione funzionale all'esecuzione stessa è possibile ora affrontare il comportamento del materiale in situazione di compressione dinamica. Volendo noi comprendere il comportamento meccanico in condizioni di compressione dinamica, sono state condotte delle prove caratterizzate da diverse condizioni sperimentali con lo scopo di imprimere al provino diverse deformazioni, sia in termini di severità e di tipologia. Principalmente si è agito sulla strumentazione per ottenere diversi valori di *strain rate*. Condurre diverse prove con diversi valori di velocità di deformazione ci consente di visualizzare diversi comportamenti del materiale. Concretamente, per diversificare i test nella maniera sopradescritta, si è agito sull'elemento sacrificale, selezionandolo in base al suo spessore. Infatti, approssimativamente è possibile affermare che il valore di *strain rate* raggiunto durante il test sia legato indirettamente allo spessore dell'elemento toroidale sacrificale, in particolare aumentandolo si raggiungono valori di *strain rate* più alti. Diversificare i test ha consentito di visualizzare risposte diverse del materiale, globalmente si è visto come, mantenendo valori bassi di *strain rate* la risposta del materiale assumesse le somiglianze di un comportamento duttile. Aumentando D , oltre a verificarsi un comportamento più tipicamente fragile, si è visto come la rottura, o meglio la deformazione a rottura ϵ_R "arrivasse prima", nonostante la tensione di snervamento fosse più alta rispetto alle prove fatte con un valore di D più basso. Questo trova anche corrispondenza nella relazione precedentemente scritta tra D , ϵ_R e σ_S e in più le evidenze sperimentali ci dicono che anche per questo tecnopolimero, il PC sperimentale, ci sia una transizione duttile-fragile all'aumentare di D .



9. Da sinistra a destra: nelle prime due immagini, troviamo un confronto pre-post test; a destra un estratto relativo a un test ritraente un attimo prima della rottura.

4.4 ATTIVITA' DI POST PROCESSING PC SPERIMENTALE

In questa fase specifica dell'elaborato verranno elencati i dati di interesse includendo il modo con cui sono stati estrapolati e successivamente rielaborati. Verranno chiarite tutte le scelte scendendo nel dettaglio di tutte le metodologie, modellazioni matematiche e principali parametri utilizzati nella rielaborazione dei dati inerenti a tutti test. Prima di entrare nel merito dell'attività di rielaborazione dati è opportuno elencare tipologia e provenienza dei dati d'interesse per ogni test effettuato.

Acquisizione dati per la prova di trazione statica

Per la prova di trazione statica totalmente sono stati impiegati ben tre sistemi di acquisizione dati: MatchID™, Labview e l'elettronica del macchinario da trazione. Si vuole ribadire che, ogni software impiegato, singolarmente avrebbe potuto restituirci tutti i dati di interesse, ma si è preferito utilizzare più sistemi per avere una visione più completa del test e per essere sicuri di adoperare per ogni dato di interesse il software più consono. Scendendo nel dettaglio si ha:

- L'elettronica del macchinario da trazione è stata impiegata per l'estrapolazione dei valori di carico relazionati al tempo, opportunamente normalizzati in fase successiva in tensione σ ;

- Dai sensori ottici, la DIC¹⁰, quindi con MatchID™ e Labview, si sono estrapolati i seguenti dati:
 - X, Y, Z ≡ coordinate dei punti;
 - U, V, W ≡ componenti del vettore spostamento rispettivamente lungo le tre direzioni X, Y, Z ;
 - $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ≡ deformazioni nelle direzioni principali;
 - $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{eq.V.M}$ ≡ deformazioni lungo X, Y, XY e la deformazione Equivalente di Von Mises.

Elencati i dati di interesse e il sistema utilizzato per la loro relativa estrapolazione è necessario osservare che per “spostamenti” e relative componenti dell’omonimo vettore sono intesi come differenza tra le coordinate di un punto a t_0 e le coordinate dello stesso punto a un istante di tempo successivo t nel quale il provino sarà deformato. Ovviamente all’istante iniziale temporale t_0 , il provino è considerato indeformato.

Acquisizione dati per la prova di compressione statica

Per quanto concerne l’acquisizione dati per la prova di compressione statica i dati d’interesse, le metodologie di acquisizione sono totalmente analoghe a quelle viste per il test di trazione statica, tranne per il fatto che in questo caso specifico si è scelto di non usare Labview.

Acquisizione dati per le prove di compressione dinamica

Il sistema di acquisizione dati per le prove di compressione dinamica annovera la presenza di due principali sorgenti:

- Ponte di Wheatstone: il quale, mediante elettronica collegata a Labview, ha permesso di quantificare i segnali, in termini di variazione di potenziale, espressi in Volt, provenienti dalle varie onde, incidenti, riflesse e trasmesse;
- Fast Cam: la quale, attraverso la sua elettronica dedicata ha permesso di acquisire immagini e video ad altissima frequenza e risoluzione.

I dati d’interesse per queste prove sono:

- Strain ≡ ε , $[\varepsilon] = \text{adim}$;
- Strain Rate ≡ D , $[D] = s^{-1}$;
- Stress ≡ σ , $[\sigma] = \text{MPa}$.

4.4.1 Attività di post processing-TEST STATICI

Per i test statici, come già anticipato, si è fatto un uso congiunto di MatchID™ e Labview, questo per rispondere all’esigenza di avere a disposizione più di due canali di acquisizione dati. Solo in fase conclusiva si è utilizzato Matlab, il quale ha permesso di plottare i dati precedentemente raccolti restituendo le curve di caratterizzazione cercate. Globalmente, la maggioranza delle attività di post processing ha visto l’uso di MatchID™ e di tutte le sue sezioni. In particolare, si è iniziato, successivamente all’allestimento dell’hardware per i vari test, con la calibrazione del sistema di acquisizione tramite la sezione dedicata MatchID™ Grabber.

DIC¹⁰: l’acronimo in questione è utilizzato per indicare il sistema di sensori ottici legati a MatchID. Presenta il seguente significato: “Digital Image Correlation”.

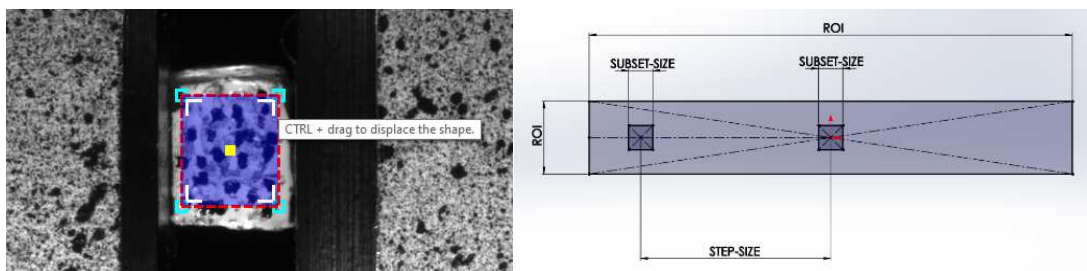
Tralasciando i dettagli dei comandi e delle azioni svolte in questa fase, è sufficiente dire che il software sfrutta un sistema di riferimento definito posteriormente a una procedura di *calibrazione*. Concretamente in questa fase si prevede l'utilizzo di un target puntinato, noto al programma in tutte le sue caratteristiche (larghezza, lunghezza, mutua distanza tra i punti e numero dei punti), il quale sarà traslato e ruotato in tutti i modi possibili affinché il sistema riesca a stabilire i parametri linearmente indipendenti necessari alla definizione del sistema di riferimento cercato. Calibrato il sistema, acquisite le immagini, iniziano le “vere” attività di post processing. In particolare, tramite la sezione MatchID™ Stereo, si procede con il caricamento dell'immagine di “riferimento”, detta *Reference Image*, sulla quale andrà disegnata la ROI, una regione di interesse appartenente al provino dove il software concluderà i suoi calcoli, sfruttando lo speckle. Di particolare rilievo sono i parametri caratterizzanti della ROI; ricordiamo il *Subset* e lo *Step*:

- *Subset*: è una superficie di controllo molto piccola, assimilabile a un punto di misura;
- *Step*: rappresenta una distanza geometrica tra i centri dei *subset*.

Associare ai sopradetti concetti la parola *size* comporta:

- *Subset-size*: significa definire la grandezza (in Pixel) del suddetto punto di misura;
- *Step-size*: significa quantificare l'entità della distanza (in Pixel) tra i subset.

Per fissare le idee si visionino le seguenti immagini:



10. A sinistra un estratto delle attività di post-processing relativo a uno dei test di compressione statica. In blu vediamo la ROI, in giallo il subset. A destra uno schema didattico funzionale alla compressione dei parametri di Step-size e Subset-size.

È evidente come ci sia una strettissima correlazione tra i parametri soprascritti:

- A parità di ROI e di Step-size, impiegare un Subset-size piccolo, è sinonimo di avere una media di un'area più piccola. Analogamente un **Subset-size grande** implica avere una media di area **più grande**;
- A parità di ROI e di Subset-size, scegliere uno Step-size piccolo significa avere un calcolo fatto con un numero maggiore di punti di misura. Come auspicabile, uno **Step-size grande** fa sì che il calcolo abbia un **numero minore** di punti di misura;
- Concettualmente il Subset-size e lo Step-size andrebbero impostati come se la ROI dovesse essere imbrigliata in una sorta di rete.

Inoltre, sperimentalmente si è visto come il *Subset-size* andrebbe scelto in funzione dello speckle, in particolare la grandezza del punto di misura dovrebbe essere tale da poter inglobare almeno 3 speckle di medie dimensioni. Il nocciolo delle attività di post processing eseguita con MatchID™ è il calcolo dello **strain ϵ** il quale viene condotto attraverso il modello di Hencky:

$$\epsilon^H = Ln\left(\sqrt{F^T F}\right)$$

Vediamo ora nel dettaglio tutte le grandezze che compaiono nel soprascritto modello matematico:

A sinistra dell'uguale troviamo l'esponente \mathbf{H} della ε , che rappresenta la matrice delle derivate parziali degli spostamenti, calcolate lungo le direzioni di applicazione del carico e quella perpendicolare. In altre parole, potremmo definirla come un gradiente di spostamento di dimensione 2. In termini analitici:

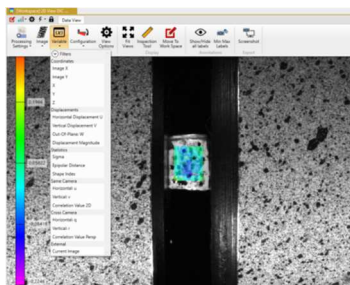
$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix} = \mathbf{F} - \mathbf{I}$$

Dove \mathbf{F} è definito come *gradiente di deformazione*, il quale è funzione di due parametri:

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} + \text{Grad } u(x) , \quad \mathbf{I} \equiv \text{indice del livello d'intensità di grigio delle immagini};$$

$$\text{Grad } u(x) \equiv \text{gradiente del vettore posizione di un punto nella configurazione di riferimento.}$$

È doveroso, arrivati a questo punto, dare un senso fisico all'equazione soprascritta. Partendo dall'idea di base che il radicando $\mathbf{F}^T \mathbf{F}$, oltre a rappresentare il prodotto della matrice trasposta di \mathbf{F} per sé stessa, rappresenta in particolare una misura della deformazione totale. Generalmente questo termine viene anche utilizzato nel caso in cui si volessero quantificare le deformazioni nelle *direzioni principali* in un materiale. Inoltre, il suddetto termine è anche legato al tensore di deformazione, il quale descrive anche la deformazione in termini di *distorsione e rotazione*. Solo a titolo conoscitivo, senza entrare per ovvie ragioni nel dettaglio, aggiungeremo che il termine $\sqrt{\mathbf{F}^T \mathbf{F}}$ indica una operazione di *decomposizione spettrale* che permette il calcolo della matrice radice. Ora, chiarito il significato di ogni termine, è possibile dare un'interpretazione alla Legge di Hencky; in particolare, quest'ultima rappresenta una misura di deformazione finita; la quale è di vitale importanza in tutti quei casi dove si vogliono descrivere dei fenomeni deformativi appartenenti all'ipotesi delle "*grandi deformazioni*" tenendo conto anche di tutte quelle che sono le variazioni volumetriche e delle deformazioni elasto-plastiche. Quanto descritto può essere applicato in tutti quei casi dove l'obiettivo è quantificare le grandi deformazioni subite da un materiale polimerico, come il nostro PC sperimentale, non tralasciandone ciò che queste comportano. Concludendo, tale modellazione è applicata a materiali come quello che stiamo caratterizzando perché, come già scritto sopra, riesce ad operare nell'ipotesi di *grandi deformazioni* conciliando quelli che sono comportamenti non lineari (notare l'operatore logaritmo). In più è compatibile con le risposte viscoelastiche, tipiche dei materiali polimerici, i quali mostrano diversi comportamenti in diverse condizioni riguardo temperature, condizioni di deformazione includendo anche lo strain rate¹². Noto lo strain ε , il software ci restituirà una mappa colorata in funzione delle variabili d'interesse precedentemente selezionate.



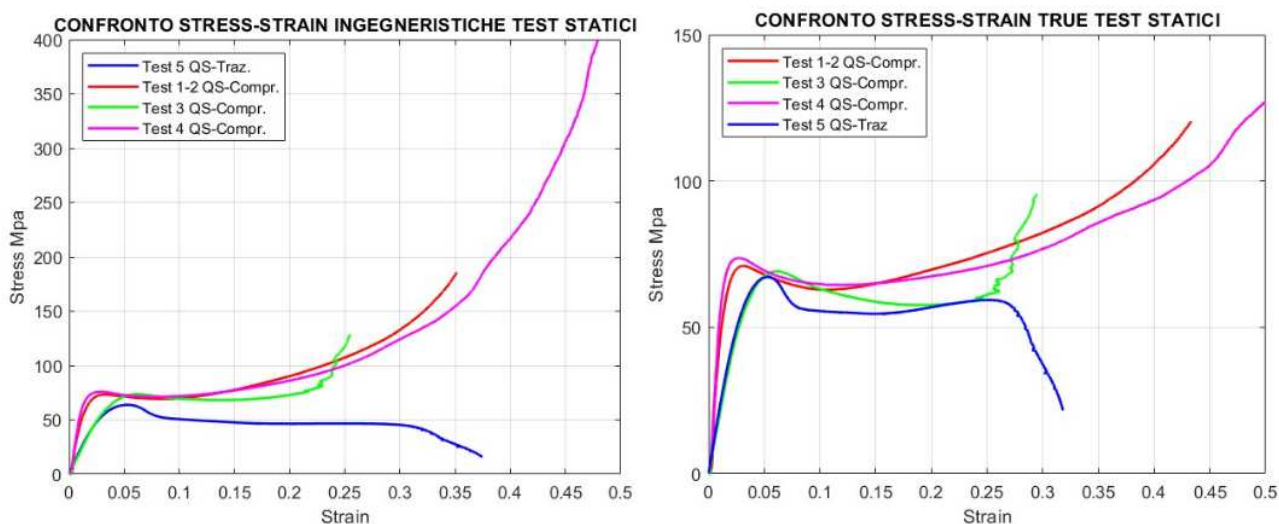
11. In foto, un esempio di un estratto delle attività di post processing per un provino simil-cubico di PC sperimentale destinato alla prova di compressione statica.

¹²: l'interpretazione dei termini appartenenti al modello di Hencky, nonché la spiegazione del perché è utilizzata nell'ambito dei materiali polimerici è stata il frutto di una lettura riguardante le principali caratteristiche del modello stesso unitamente al perché venisse utilizzato consultando le relative parti appartenenti ai seguenti libri: "Mechanical Behavior of Materials" di Norman E. Dowling, "Introduction to Polymer Physics" di Ulrich E. Wiesner e per ultimo "Polymer Physics" di M. Doi e S.F. Edwards.

Altro aspetto da trattare in relazione alla rielaborazione dei dati per i test statici è la modifica *in itinere* di un calcolo. Spesso per problematiche legate alla dimensione molto piccola dei provini, o anche per lo speckle non propriamente realizzato ad hoc, durante la correlazione era piuttosto frequente, in alcuni momenti, il verificarsi di incappare in alcune zone, appartenenti alla ROI, di non correlazione. Allora con l'obiettivo di risolvere il problema si procedeva con la modifica del riferimento. Per la comprensione di quanto scritto occorre ricordare che MatchID™ di default setta come riferimento assoluto la prima immagine caricata detta *Reference Image*, la quale confrontata con le successive, dette *Deformed Images*, rende possibile la correlazione stessa. Selezionando un particolare comando “*Spatial+Update Reference*” si modifica il riferimento nel modo seguente: il software non confronterà più l'immagine “corrente”, ovviamente deformata, con la prima, non deformata, ma la correlerà alla precedente, la quale, come comprensibile è già stata oggetto di calcolo. Da una parte questa modifica consente la buona riuscita della correlazione selezionando delle impostazioni più performanti, ma dall'altra però, irrimediabilmente, abbassa la precisione del calcolo in quanto si sta aumentando l'incertezza calcolata. Per fissare le idee è sufficiente fare il seguente esempio: immaginiamo di voler misurare una distanza di 1m con un righello di soli 50cm. Arrivati al valore massimo del nostro righello da 50cm, per procedere con la misurazione è necessario spostare il righello, ponendo quello che prima era il punto finale allo zero. Così facendo noi stiamo, si misurando la distanza richiesta di 1m, ma stiamo sfruttando un riferimento già precedentemente utilizzato, il quale può essere oggetto di errore. Concettualmente, questo è il significato di cosa comporta la selezione del comando “*Spatial+Update Reference*”. Concludendo, la rielaborazione dei test statici è culminata con l'utilizzo di Matlab, il quale sfruttando i precedenti dati estrapolati ci ha consentito di tracciare agevolmente le curve di caratterizzazione statiche. In particolare, inserendo nel codice le seguenti variabili:

1. $\sigma_{true}, \epsilon_{true}$ valori di tensione e di deformazione vera;
2. $\sigma_{ing}, \epsilon_{ing}$ valori di tensione e di deformazione ingegneristica;

Abbiamo raggiunto i seguenti grafici:



12. Vediamo raffigurati i grafici caratteristici statici, frutto dell'attività di post-processing relativi ai test statici.

Si rimanda il commento, quindi l'analisi delle risposte statiche di trazione e di compressione al paragrafo dedicato.

4.4.2 Attività di post processing-TEST DINAMICI

Le attività di post processing dei test dinamici, come già anticipato, ha previsto l'utilizzo di Labview per l'acquisizione dei segnali e Matlab per la successiva rielaborazione con annesso ottenimento delle curve caratteristiche dinamiche cercate. Come fatto per i test statici, è opportuno, arrivati a questo punto, capire concettualmente i passi fondamentali del processo di acquisizione e successiva rielaborazione dei dati, senza entrare troppo nello specifico. Per quanto concerne la rielaborazione di un segnale di una prova di compressione dinamica alla barra di Hopkinson, si deve partire dal presupposto che le operazioni implicate sono molteplici. Si inizia con l'acquisizione tramite Labview del segnale stesso, proveniente dal Ponte di Wheatstone, per poi continuare con la visualizzazione dei risultati, correlandolo inseguito con i dati provenienti dalla Fast-cam. Solo a questo punto è possibile pensare di determinare il comportamento meccanico del materiale. Impostato per prima cosa il dispositivo preposto all'acquisizione, si procede campionando i segnali entranti. Campionare un segnale significa studiarne la frequenza, operando nello specifico con un'azione di discretizzazione dello stesso. Discretizzare un segnale significa passare da un segnale *continuo* a uno di tipo *discreto*, caratterizzato da un numero, per l'appunto, discreto di informazioni. L'operazione che consente la discretizzazione è proprio il *campionamento* che può essere svolto o a *frequenza singola o variabile*. Acquisito il segnale, ove richiesto si procede con la sua preelaborazione ossia ci si adopera per renderlo "più pulito" attraverso un'operazione di filtraggio; nel nostro caso si è scelto un filtraggio passabasso unito a uno di tipo mediano. Poi è stata necessaria un'ulteriore azione di "centraggio" del segnale in quanto è presente una componente di offset, la quale viene "annullata" da un'operazione di *shift* del segnale. Conclusa la preelaborazione del segnale, si procede con la determinazione dei segnali relativi alle onde incidenti, riflesse e trasmesse. La tecnica maggiormente usata è quella di sfruttare un algoritmo di analisi temporale per identificare le onde coinvolte, analizzando la forma d'onda in questione e il tempo di propagazione. Ora attraverso i modelli matematici già visti, è possibile quantificare le velocità delle onde elastiche funzionalmente al materiale e alla geometria della barra di Hopkinson:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{con } [E] = \frac{N}{m^2} = MPa$$
$$[\rho] = \frac{kg}{m^3}$$

Trattando opportunamente il ritardo tra l'onda incidente e quella riflessa attraverso l'uso di una funzione di *correlazione incrociata*, sarà possibile calcolare la velocità delle onde nel materiale. Essendo il materiale delle barre AISI 304, quindi $E = 19600 MPa, \rho = 7900 \frac{kg}{m^3}, \nu = 0,3$:

$$c = 159,3 \frac{m}{s}$$

Quantificata la velocità, è possibile definire le proprietà meccaniche del materiale oggetto della caratterizzazione, calcolando tensioni e deformazioni attraverso le equazioni della conservazione di quantità di moto. In particolare, separati i segnali incidenti e riflessi è possibile determinare quantitativamente le deformazioni analizzando i segnali provenienti propriamente dal sistema di estensimetri precedentemente allestito. La tensione sarà ricavata utilizzando il relativo modello matematico. Infine, utilizzando nuovamente i segnali relativi alle velocità delle onde è possibile calcolare il Modulo di Young E del materiale attraverso l'inversione di una relazione analoga alla precedente:

$$E = \rho_s c^2 \quad \text{con } \rho_s \equiv \text{densità del campione}$$

Ora avendo chiarito la parte di acquisizione dati è possibile passare alla fase di rielaborazione, nonché calcolo delle curve caratteristiche sfruttando Matlab. A differenza dei test statici, per i quali è stato sufficiente inserire le variabili costitutive di tipo *ingegneristico* e di tipo *true*; per i test dinamici il percorso è stato più articolato in quanto nel codice funzionale all'ottenimento delle curve caratteristiche dinamiche del materiale, doveva essere inclusa la modellazione che permette il passaggio da una grandezza *ingegneristica* a una di tipo *true*, visto che i dati estrapolati dalla strumentazione sono di tipo ingegneristico:

$$\sigma_{ING} \equiv \sigma \equiv \text{valore di tensione ingegneristico } [\sigma] = \text{MPa};$$

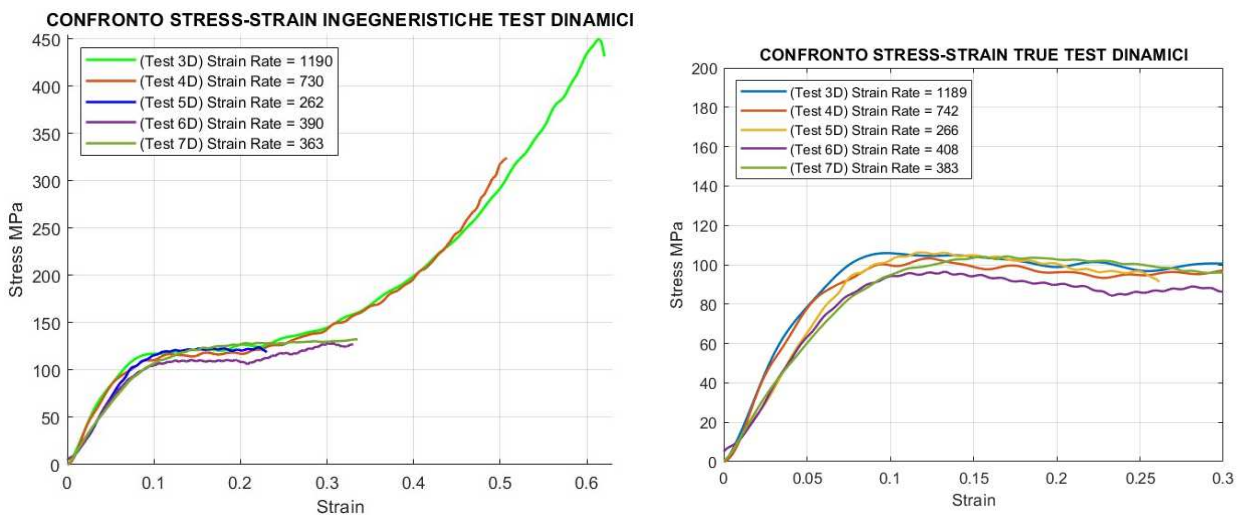
$$\varepsilon_{ING} \equiv \varepsilon \equiv \text{valore di deformazione ingegneristica}.$$

Per comodità riportiamo qui di seguito le modellazioni necessarie allo scopo:

$$\varepsilon = \frac{l_f}{l_0} - 1, \quad \delta = \log(1 + \varepsilon) \quad \text{con:} \quad \delta \equiv \text{deformazione di tipo true};$$

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad \text{con:} \quad \sigma_{true} \equiv \text{tensione true}.$$

Il tutto ha portato all'ottenimento dei seguenti grafici:



13. Vediamo raffigurati i grafici caratteristici dinamici, frutto dell'attività di post-processing relativi ai test dinamici.

Come per i test statici, si rimanda il commento, quindi l'analisi dei grafici delle risposte dinamiche al paragrafo dedicato.

4.5 ANALISI DEI GRAFICI CARATTERISTICI

In questa sezione dell'elaborato verranno analizzati sistematicamente e singolarmente i grafici caratteristici del PC sperimentale ottenuti dalle attività post-processing sia per i test statici sia per quelli dinamici. In più saranno condotti dei paragoni con il PC DIN 7728, ossia il policarbonato convenzionale.

4.5.1 Analisi dei grafici caratteristici-TEST STATICI

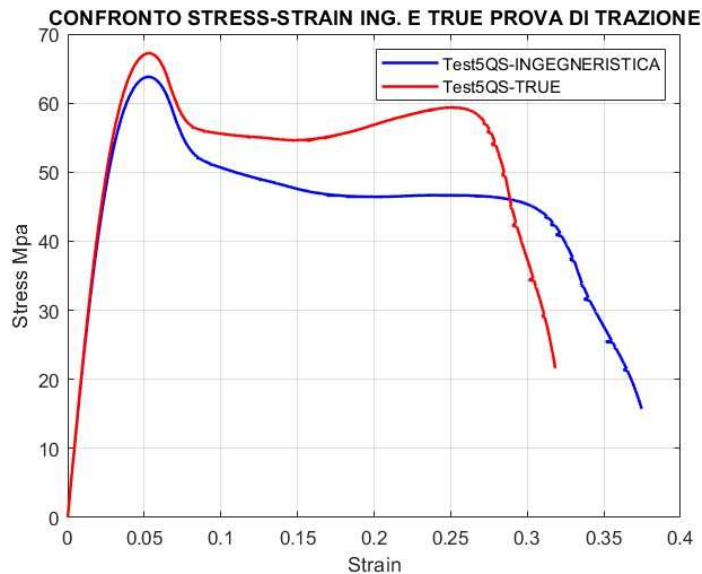
In questo paragrafo andremo ad analizzare i grafici caratteristici delle prove statiche con lo scopo di comprendere la risposta del materiale in condizione di sollecitazioni statiche. Si inizierà con la prova più rappresentativa, quindi con la prova di trazione quasi statica per poi procedere con le prove di compressione quasi statica.

Relativamente a quest'ultima tipologia di test occorre segnalare il fatto che verranno diversificate in funzione di due aspetti principali:

- Geometria del provino testato;
- Direzione di applicazione del carico.

4.5.1.1 Analisi grafico caratteristico-PROVA DI TRAZIONE STATICA

Avvalendoci del seguente grafico relativo alla prova di trazione quasi statica, Test 5QS, con provino di sezione resistente $A_{5qs} = 22,4mm^2$, una lunghezza iniziale $l_0 = 75,2mm$ iniziamo con l'analisi.



Dal grafico soprastante è possibile vedere la tipologia di risposta statica a trazione del PC sperimentale. In prima battuta è possibile cogliere una somiglianza generalizzata piuttosto marcata tra l'andamento della suddetta curva con quella del PC-DIN7728. Alla luce di questo, come auspicabile, condurre un parallelismo tra i due materiali è piuttosto semplice, visto che per ogni fase, di ogni prova dei due materiali, è possibile individuarne la corrispondente sull'altro. Riferendoci alla curva di tipo *ingegneristico*, in blu, vediamo come macroscopicamente i tratti individuati precedentemente nel diagramma $F - \Delta l$ del PC DIN-7728, siano facilmente individuabili, infatti suddividendo la curva in più tratti diversificati l'un l'altro da una definizione dell'entità di deformazione ε abbiamo:

- Con $0 \leq \varepsilon \leq 0,037$, troviamo uno *strain* di tipo lineare;
- Con $0,037 \leq \varepsilon \leq 0,052$ siamo in una fase di transizione, la quale accompagnerà il materiale, verso una regione caratterizzata da un comportamento tipicamente plastico;
- Con $\varepsilon = 0,052$, individuiamo il picco di tensione $\sigma_{MAX} = 63,8 MPa$;
- Con $0,052 \leq \varepsilon \leq 0,08$, si ha la *localizzazione dello strain*, con conseguente comparsa della *strizione*;
- Con $0,08 \leq \varepsilon \leq 0,27$ si ha la comparsa di un fenomeno, molto affine, al *crazing*;
- Con $0,27 \leq \varepsilon \leq 0,37$ è possibile individuare il piano di scorrimento inclinato di circa 45° rispetto il piano degli afferraggi, il quale accompagnerà il materiale alla prima lacerazione. Il tutto culminerà con la rottura del provino.

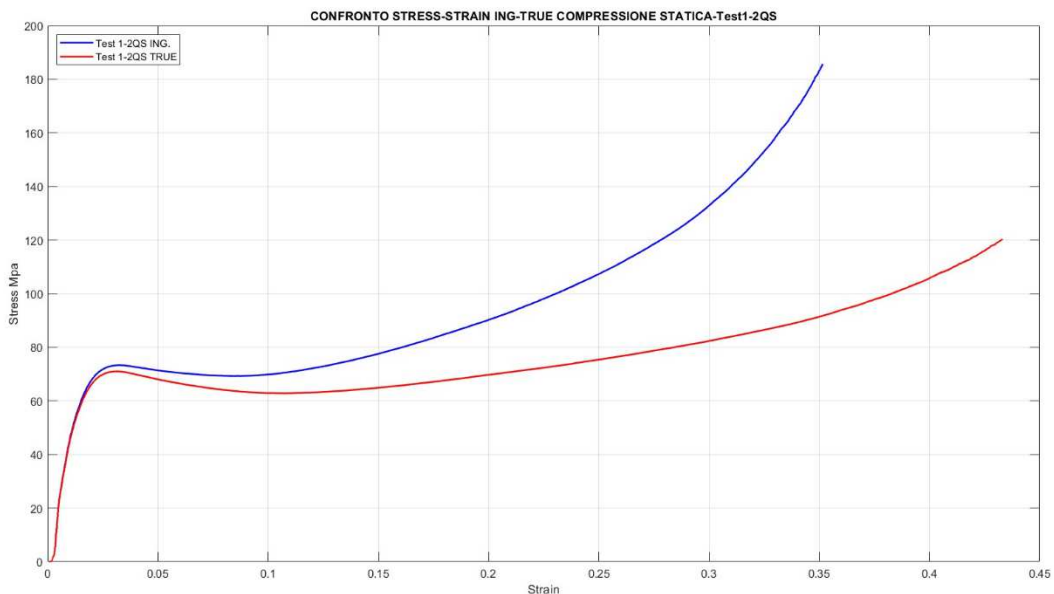
Volendo essere completi, occorre segnalare che nel primo tratto, quindi con $0 \leq \varepsilon \leq 0,037$, siamo in corrispondenza del tratto del campo elastico del materiale.

Nella fase di transizione, quindi con $0,037 \leq \varepsilon \leq 0,052$, ha luogo il fenomeno di snervamento, in particolare $\sigma_s = 60,15 \text{ MPa}$ e $\varepsilon_s \sim 0,035$. Nelle fasi successive al picco di carico, siamo in presenza della regione plastica del materiale, in quanto prende piede la *localizzazione dello strain*, con conseguente comparsa della *strizione*, quindi di una fortissima variazione di larghezza concentrata in un tratto infinitesimo di lunghezza. Nel tratto che va da $\varepsilon \geq 0,27$ la fortissima variazione di larghezza, che prima era localizzata, interessa oramai una lunghezza del provino paragonabile a l_0 ; questo si traduce in una prima lacerazione del materiale, inseguito a un'individuazione di un piano di scorrimento inclinato di 45° , rispetto agli afferraggi, dovuto a una riorganizzazione plastica del materiale.

4.5.1.2 Analisi grafici caratteristici-PROVA DI COMPRESSIONE STATICA

Provini cilindrici-Test 1-2 QS

Avvalendoci del seguente grafico relativo alla prova di compressione quasi statica, Test 1-2QS, con provini di sezione resistente $A_{1,2qs} = 183,85 \text{ mm}^2$, aventi un diametro iniziale medio $d_0 = 15,3 \text{ mm}$ e uno spessore pari a quello della lamina iniziale, iniziamo con l'analisi.



Pur trattandosi di una sollecitazione di compressione statica, quindi di una sollecitazione per lo più opposta alla prova di trazione, è possibile tuttavia, compararne il grafico a quello della prova di trazione precedentemente analizzata. Adoperando la stessa strategia vista per la prova di trazione, considerando la curva *ingegneristica*, in blu, suddivideremo il grafico in più regioni differenziate l'una l'altra da una definizione dell'entità di deformazione ε . In particolare:

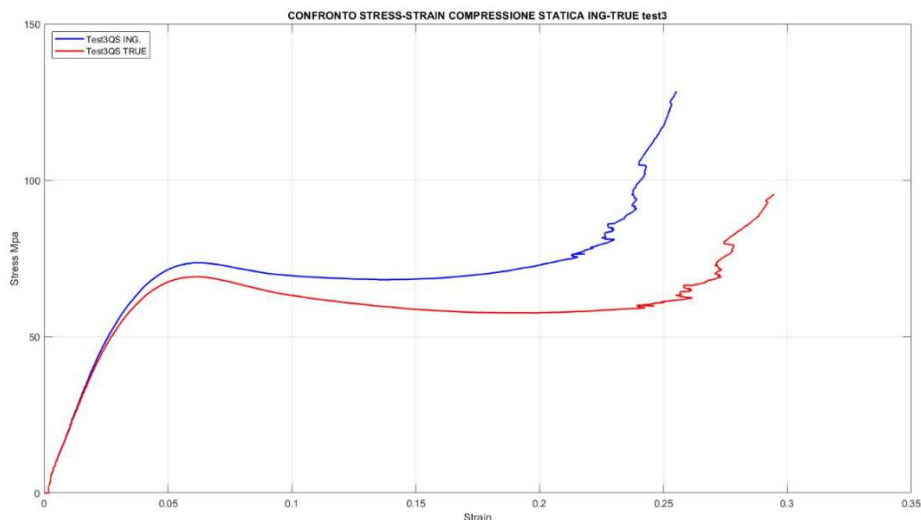
- Con $0 \leq \varepsilon \leq 0,017$, siamo in presenza del campo elastico lineare del materiale;
- Con $0,017 \leq \varepsilon \leq 0,030$ siamo in una zona di transizione dove il materiale abbandona un comportamento tipicamente elastico. Con $\varepsilon \sim 0,017$ si ha lo snervamento del materiale con $\sigma_s = 64 \text{ MPa}$;
- Con $\varepsilon \geq 0,030$ ci trasferiamo in una regione tipicamente plastica del materiale;
- Con $0,030 \leq \varepsilon \leq 0,090$ si verifica il classico "plateau" della tensione;
- Con $\varepsilon \geq 0,090$ si ha un aumento sostanziale della tensione.

Volendo essere completi occorre segnalare che: nella fase dove si è verificato lo snervamento, quindi con $0,017 \leq \varepsilon \leq 0,030$, ha luogo un primo fenomeno di imbutitura nella dimensione dello spessore,

con una successiva densificazione apparente del materiale post snervamento. Inoltre, degno di nota, è il fatto che nella zona di plateau della tensione, quindi con $0,030 \leq \varepsilon \leq 0,090$, si verifica una riorganizzazione plastica del materiale, la quale accompagnerà il provino fino alla fine della prova. Tuttavia, ai fini pratici, si ritiene interessante solamente la porzione di curva con un valore di $\varepsilon \leq 0,15$, in quanto, spingersi oltre comporterebbe lavorare con un materiale fortemente compromesso, in quanto i fenomeni deformativi, oltre a essere molto severi, sono di natura fortemente plastica. Un altro dato utile è lo spessore finale dei due provini. In particolare, il provino n°1 in seguito alla prova, partendo da uno spessore iniziale $t_0 = 4\text{mm}$ è arrivato a uno spessore finale $t_{f_1} = 3,1260\text{mm}$, mentre per il provino n°2 si è registrato un $t_{f_2} = 3,1243\text{mm}$. Il valore di tensione massimo registrato durante le prove di compressione statica per i provini cilindrici è stato di $\sigma_{MAX_{1,2}} = 185\text{MPa}$.

Provino simil-cubico-Test 3QS

Avvalendoci del seguente grafico relativo alla prova di compressione quasi statica, Test 3QS, con provino di sezione resistente $A_{3QS} = 24,16\text{mm}^2$ e di volume $V_{3QS} = 4 \cdot 6,04 \cdot 5,78 = 139,6\text{mm}^3$, iniziamo l'analisi. Si segnala che il carico è stato applicato perpendicolarmente alla faccia di dimensioni $A_{3QS} = 4 \cdot 6,04 = 24,16\text{mm}^2$, quindi lungo la dimensione pari a $5,78\text{mm}$.



Nonostante la geometria del provino testato, totalmente diversa da quella del test 1-2, in quanto nell'omonimo test ci si riferisce a una simmetria cilindrica, è comunque possibile condurre dei parallelismi in termini di andamento delle curve. Infatti, è possibile individuare dei tratti dove il materiale presenta un comportamento analogo o comunque fortemente simile su entrambi i grafici. Rapportandoci alla curva *ingegneristica*, in blu, suddividiamola ancora in tratti differenziati l'un l'altro per una definizione dell'entità di deformazione ε . In particolare:

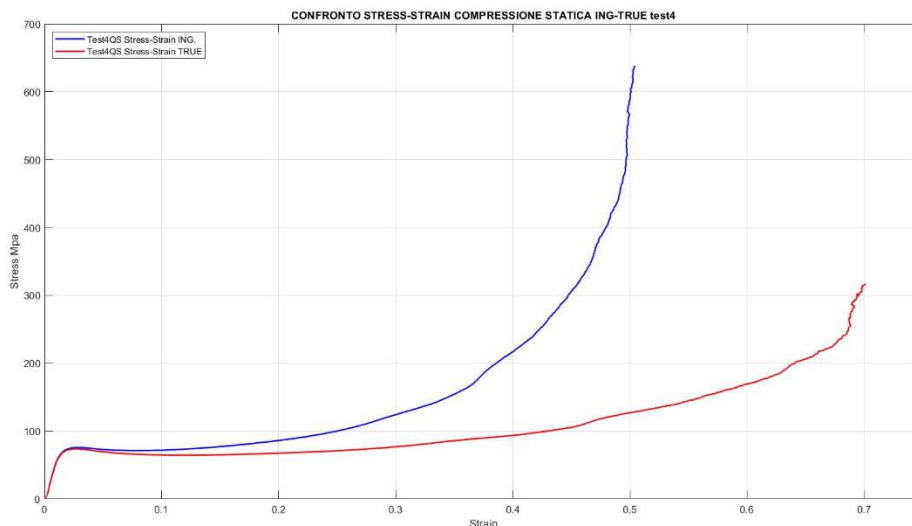
- Con $0 \leq \varepsilon \leq 0,025$, siamo in presenza del campo elastico lineare del materiale;
- Con $0,025 \leq \varepsilon \leq 0,061$, siamo in una zona di transizione dove il materiale abbandona un comportamento prettamente elastico per passare a un altro che accomuna in sé alcune caratteristiche tipiche della regione elastica e altre familiari alla regione plastica. Con $\varepsilon \sim 0,037$ si ha lo snervamento con $\sigma_s = 63,7\text{MPa}$;
- Con $0,061 \leq \varepsilon \leq 0,19$, si ha il classico "plateau" della tensione;
- Con $\varepsilon \geq 0,19$, vediamo un sostanziale aumento della tensione.

Volendo perseguire la completezza è opportuno segnalare che in corrispondenza dello snervamento,

quindi nel tratto con $0,025 \leq \varepsilon \leq 0,061$, prende piede un fenomeno di imbutitura nella dimensione lungo la quale è stata applicato il carico, quindi nella dimensione di valore $5,78mm$. Successivamente si è verificata una densificazione apparente del materiale. Nella zona di plateau del grafico, quindi con $0,061 \leq \varepsilon \leq 0,19$, si verifica nel materiale una riorganizzazione plastica, la quale accompagnerà il provino fino alla fine della prova. Tuttavia, ai fini pratici, si ritiene interessante solamente la porzione di curva con un valore di $\varepsilon \leq 0,20$, in quanto, spingersi oltre comporterebbe lavorare con un materiale fortemente compromesso, in quanto i fenomeni deformativi, oltre a essere molto severi, sono di natura fortemente plastica. Un altro dato utile è l'altezza finale del provino. In particolare, il provino n°3 in seguito alla prova, partendo da un'altezza iniziale $h_0 = 5,78mm$ è arrivato a un'altezza finale $h_{f_3} = 3,14 mm$. Il valore di tensione massimo registrato durante le prove di compressione statica per i provini cilindrici è stato di $\sigma_{MAX_3} = 128 MPa$.

Provino simil-cubico-Test 4QS

Avvalendoci del seguente grafico relativo alla prova di compressione quasi statica, Test 4QS, con provino di sezione resistente $A_{4qs} = 25,63 mm^2$ e di volume $V_{4qs} = 4,8 \cdot 5,34 \cdot 4 = 102,5 mm^3$, iniziamo l'analisi. Si segnala che il carico è stato applicato perpendicolarmente alla faccia di dimensioni $A_{4qs} = 4,8 \cdot 5,34 = 25,63 mm^2$, quindi lungo la dimensione pari a $4mm$, quindi nella direzione di quella che originariamente era lo spessore della lamina iniziale.



Prima di commentare l'andamento della curva, andando a cercare tutti i tratti contraddistinti da un comportamento tipico del materiale funzionalmente all'entità di deformazione ε , è opportuno focalizzarsi su ciò che ha comportato la variazione di direzione dell'applicazione del carico sul materiale. Ricordando che nel test3QS di stessa geometria, il carico è stato applicato perpendicolarmente allo spessore, quindi alla faccia di sezione resistente $A_{3qs} = 4 \cdot 6,04 = 24,16 mm^2$, qui il carico è stato applicato lungo la direzione dello spessore, quindi alla faccia di sezione resistente $A_{4qs} = 4,8 \cdot 5,34 = 25,63 mm^2$, vediamo come globalmente l'andamento della curva sia ancora comparabile alle precedenti. Quello che cambia in primis è l'entità della deformazione ε subita dal materiale. Infatti, riferendoci sempre alla curva *ingegneristica*, in blu, basta vedere come nel test3QS, l'entità di deformazione massima raggiunta ε si attesti intorno al 25% dell'altezza iniziale h_0 a dispetto di un circa 50% dell'altezza iniziale h_0 del provino del test 4QS. In secundis vediamo anche come il valore di tensione massima σ raggiunta durante la prova sia sensibilmente diverso, nel test3QS $\sigma_{MAX_{3qs}} = 128 MPa$, mentre nel test4QS, $\sigma_{MAX_{4qs}} = 638 MPa$.

Le principali differenze viste tra le due prove sono dovute a un'**anisotropia** del materiale testato, anche il PC sperimentale presenta un comportamento **NON isotropo**. Ciò significa che le sue caratteristiche meccaniche sono funzione della direzione in cui sono misurate in quanto variano al variare della direzione in cui le si testa. Rimandando alle conclusioni ulteriori peculiarità del materiale, concentrandoci sul grafico, suddividendo la curva diversificandola per entità di deformazione ε , si ha:

- Con $0 \leq \varepsilon \leq 0,011$, siamo in presenza del campo elastico lineare del materiale;
- Con $0,011 \leq \varepsilon \leq 0,025$, abbiamo una zona di transizione dove il materiale abbandona un comportamento prettamente elastico per passare a un altro che accomuna in sé alcune caratteristiche tipiche della regione elastica e altre familiari alla regione plastica. Con $\varepsilon \sim 0,015$ si ha lo snervamento con $\sigma_s = 67MPa$;
- Con $0,025 \leq \varepsilon \leq 0,21$, si ha il classico “plateau” della tensione;
- Con $\varepsilon \geq 0,21$, vediamo un sostanziale aumento della tensione.

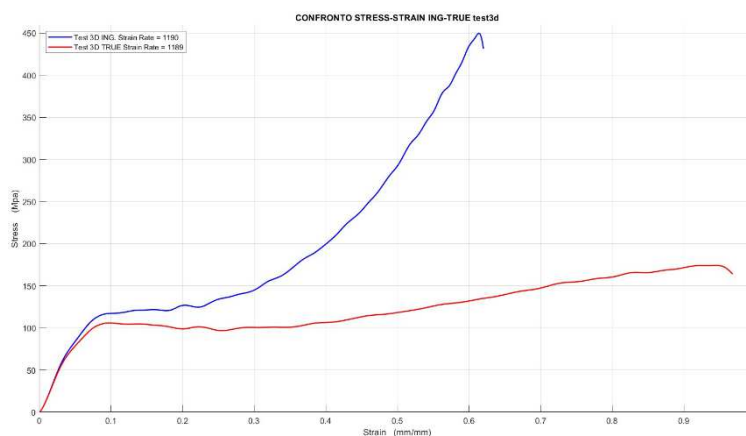
In corrispondenza dello snervamento, si verifica un fenomeno di imbutitura nella dimensione della direzione di applicazione del carico con successiva densificazione apparente del materiale. Nella zona di plateau del grafico, quindi con $0,025 \leq \varepsilon \leq 0,21$, si ha una riorganizzazione plastica del materiale, la quale accompagnerà il provino fino al termine della prova. Da notare la differente estensione della regione plastica del materiale tra i test 3QS e 4QS, questo significa che il materiale nell'ultimo test presenta un'enorme “serbatoio di resistenza” che rende possibile un assorbimento importante di energia di deformazione plastica. Si ricorda che il contesto sperimentale dei due test è il medesimo e si segnala l'altezza finale del provino $h_{f_4} = 3,12 mm$.

4.5.2 Analisi dei grafici caratteristici-TEST DINAMICI

In questo paragrafo analizzando i grafici caratteristici delle prove dinamiche, comprenderemo la risposta del materiale in condizioni di compressione dinamica.

Provino cilindrico-Test 3D

Avvalendoci del seguente grafico relativo alla prova di compressione dinamica, Test 3D, con provino di sezione resistente $A_{3d} = 44,2mm^2$, iniziamo l'analisi. Il carico, per tutti i test dinamici, è stato applicato perpendicolarmente alla faccia di dimensioni $A_{3d} = \pi \frac{d_0^2}{4} = 44,2mm^2$.



Procedendo come fatto per i test statici, andremo ad analizzare il grafico in base all'entità di deformazione ε , con lo scopo di trovare dei tratti di curva dov'è possibile attribuire al materiale comportamenti simili.

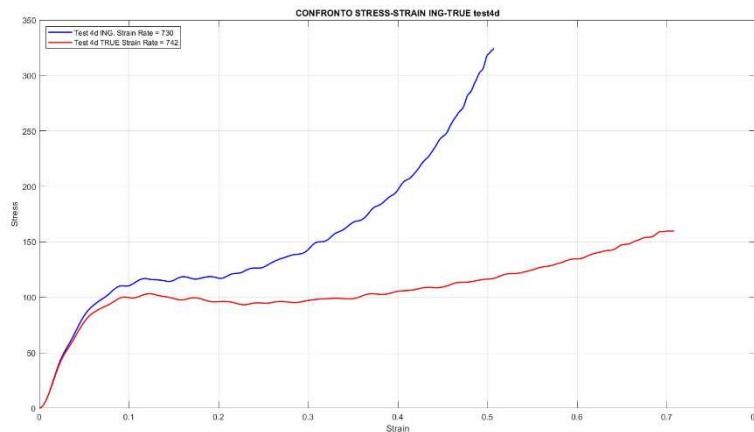
La cosa che colpisce immediatamente l'attenzione è che nonostante qui si tratti di sollecitazioni dinamiche, quindi di entità e tipologia differente, l'andamento della curva sia piuttosto comparabile a una curva di compressione statica del materiale in quanto l'andamento globale risulta simile. In particolare, riferendoci alla curva *ingegneristica*, in blu:

- Con $0 \leq \varepsilon \leq 0,028$, siamo in presenza del campo elastico lineare del materiale;
- Con $0,028 \leq \varepsilon \leq 0,1$, c'è una zona di transizione dove il materiale abbandona un comportamento prettamente elastico per adottarne un altro intermedio che accomuna in sé alcune caratteristiche tipiche della regione elastica e altre della regione plastica. Con $\varepsilon \sim 0,05$ si ha lo snervamento con $\sigma_s = 80MPa$;
- Con $0,1 \leq \varepsilon \leq 0,17$, si ha il classico "plateau" della tensione;
- Con $\varepsilon \geq 0,17$, vediamo un sostanziale aumento della tensione.

In questa prova di compressione dinamica, caratterizzata da un valore di *strain rate* alto, $D = 1189 s^{-1}$, si evince quanto la regione plastica del materiale sia piuttosto limitata, mentre la tensione di snervamento σ_s abbia un buon valore. Questo trova conferma nelle relazioni, già scritte secondo le quali, adoperare un valore di *strain rate* alto, comporti una tendenza positiva per lo snervamento, ma negativa per la deformazione a rottura ε_R . Si segnala l'altezza finale post test, a rottura avvenuta, $h_{f_{3d}} = 1,5 mm$.

Provino cilindrico-Test 4D

Avvalendoci del seguente grafico relativo alla prova di compressione dinamica, Test 4D, con provino di sezione resistente $A_{4d} = 44,2mm^2$, iniziamo l'analisi. Il carico, per tutti i test dinamici, è stato applicato perpendicolarmente alla faccia di dimensioni $A_{4d} = \pi \frac{d_0^2}{4} = 44,2mm^2$.



Ancora una volta dal grafico è possibile vedere come a parità di geometria del provino, operare con un diverso valore di *strain rate* comporti delle differenze a livello di caratteristica di snervamento rilevata e di regione plastica del materiale. In particolare, considerando la curva di tipo *ingegneristico*, in blu, dividendola in più tratti diversificati da una definizione dell'entità di deformazione ε , avremo:

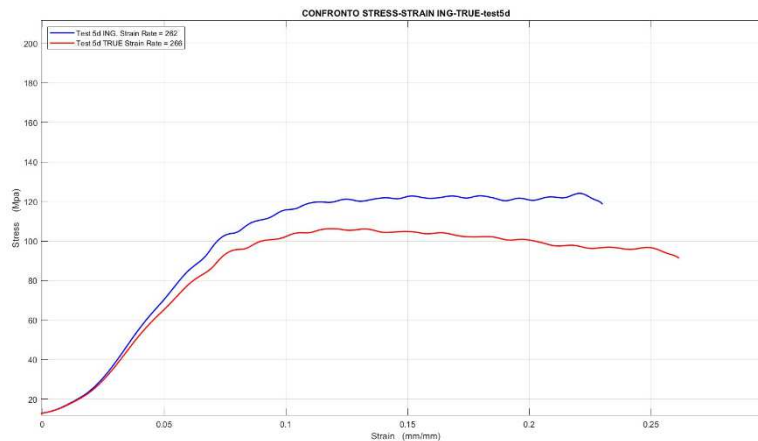
- Con $0 \leq \varepsilon \leq 0,027$, siamo nel campo elastico lineare del materiale;
- Con $0,027 \leq \varepsilon \leq 0,1$, abbiamo una zona di transizione dove il materiale abbandona un comportamento prettamente elastico per passare a un altro intermedio che ingloba in sé alcuni anche alcuni aspetti tipici della regione plastica. Con $\varepsilon \sim 0,041$, si ha lo snervamento con $\sigma_s = 70MPa$;
- Con $0,1 \leq \varepsilon \leq 0,2$ si ha il classico "plateau" della tensione;

- Con $\varepsilon \geq 0,2$ vediamo un sostanziale aumento della tensione.

Questo particolare test è caratterizzato da un valore di *strain rate* medio, in particolare $D = 730 \text{ s}^{-1}$. Tuttavia, pur non discostandosi troppo dal valore precedente dello strain rate, è ancora evidente come la risposta del materiale sia inevitabilmente legata ad esso. Come già anticipato, si evincono delle differenze sostanziali sia per l'estensione del campo plastico, più ampio in questo test rispetto al precedente, sia per il valore di tensione dello snervamento del materiale, più basso rispetto a prima. Non si menzionano gli effetti della temperatura in quanto tutte le prove di compressione dinamica si sono effettuate con le stesse condizioni di temperatura e pressione.

Provino cilindrico-Test 5D

Avvalendoci del seguente grafico relativo alla prova di compressione dinamica, Test 5D, con provino di sezione resistente $A_{5d} = 44,2 \text{ mm}^2$, iniziamo l'analisi. Il carico, per tutti i test dinamici, è stato applicato perpendicolarmente alla faccia di dimensioni $A_{5d} = \pi \frac{d_0^2}{4} = 44,2 \text{ mm}^2$.



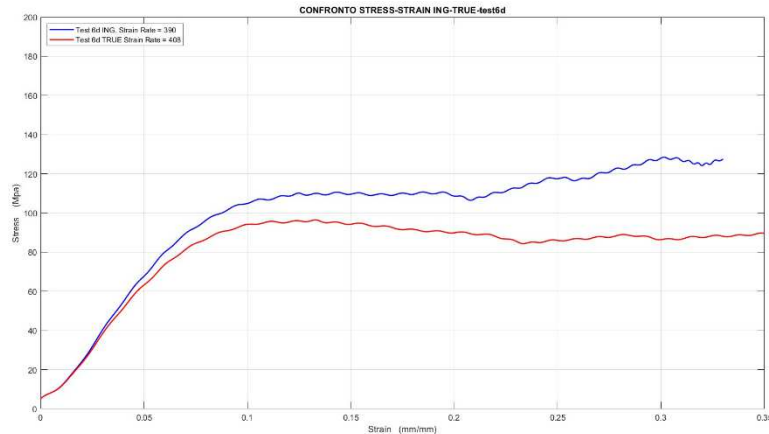
Il test 5d è il test caratterizzato da un valore di *strain rate* estremamente basso; infatti, possiamo vedere fin da subito come la risposta sia molto piatta dopo un tratto iniziale dove la tensione σ è legata alla deformazione ε linearmente. Adoperando la strategia precedentemente vista, andiamo a suddividere la curva in più tratti in base al valore dell'entità di deformazione ε . In particolare, considerando la *curva ingegneristica*, in blu, si ha:

- Con $0 \leq \varepsilon \leq 0,042$, siamo nel campo elastico lineare del materiale;
- Con $0,042 \leq \varepsilon \leq 0,11$, si presenta una zona di transizione dove il materiale assume un comportamento intermedio inglobando caratteristiche della precedente regione elastica con altre della regione plastica. Al valore di $\varepsilon \sim 0,042$, si accredita lo snervamento con $\sigma_S = 60 \text{ MPa}$;
- Con $\varepsilon \geq 0,11$ si ha il classico "plateau" della tensione;

Sicuramente, un altro parametro da ricordare, oltre al più basso *strain rate* rispetto a tutti i test condotti con questa geometria, nello specifico $D = 262 \text{ s}^{-1}$, è la tipologia di risposta del materiale nella sua regione plastica. Con un eufemismo potremo definire "flat" la curva di questo test, visto che il valore di tensione σ rimane circa costante fino alla fine della prova stessa. Volendo stressare ancora il concetto che lega $D, \sigma_S, \varepsilon_R$, tralasciando gli effetti della temperatura per le motivazioni già scritte, vediamo come il valore della caratteristica snervamento sia il più basso di tutti, contrariamente all'estensione della regione plastica, la più alta di tutti. Si segnala l'altezza finale post test del provino a rottura non avvenuta $h_{f5d} = 3,62 \text{ mm}$.

Provino cilindrico-Test 6D

Avvalendoci del seguente grafico relativo alla prova di compressione dinamica, Test 6D, con provino di sezione resistente $A_{6d} = 44,2mm^2$, iniziamo l'analisi. Il carico, per tutti i test dinamici, è stato applicato perpendicolarmente alla faccia di dimensioni $A_{6d} = \pi \frac{d_0^2}{4} = 44,2mm^2$.



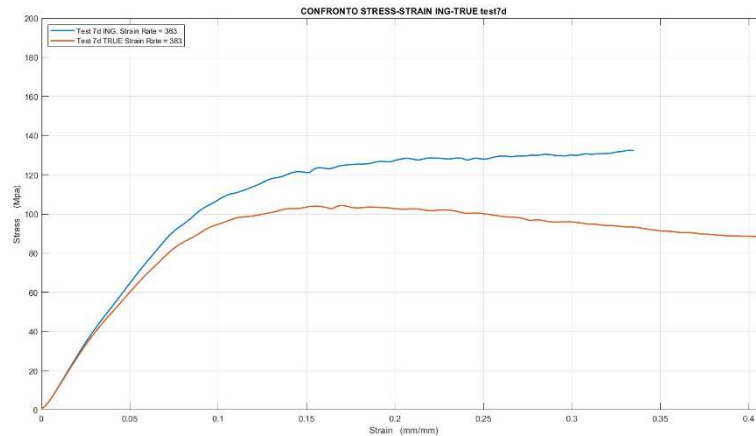
Anche il test6d è caratterizzato da un valore di *strain rate* mediamente basso, infatti come visto per il test precedente è ovvio come la risposta sia molto piatta dopo un tratto iniziale distinto da un legame di tipo lineare tra la tensione σ e la deformazione ε . Come per i precedenti test, suddividiamo la curva in più tratti in base al valore dell'entità di deformazione ε , in particolare, considerando la *curva ingegneristica*, in blu, si ha:

- Con $0 \leq \varepsilon \leq 0,046$, siamo nel campo elastico lineare del materiale;
- Con $0,046 \leq \varepsilon \leq 0,094$, si presenta una zona di transizione dove il materiale assume un comportamento intermedio inglobando caratteristiche della precedente regione elastica con altre della regione plastica. Al valore di $\varepsilon \sim 0,046$, si accredita lo snervamento con $\sigma_s = 64MPa$;
- Con $0,094 \leq \varepsilon \leq 0,21$, si ha il classico "plateau" della tensione;
- Con $\varepsilon \geq 0,21$ si ha un leggero aumento, di tipo lineare, della tensione;

Alla luce del precedente e di questo test, quest'ultimo caratterizzato da un valore di strain mediamente basso, $D = 390s^{-1}$, è possibile cogliere un altro aspetto di vitale importanza. Si è visto come, diminuendo il valore di *strain rate*, la risposta dinamica del materiale si appiattisse gradualmente con conseguente aumento della deformazione massima ε_{MAX} sostenuta dal materiale a discapito di una caratteristica di snervamento σ_s decrescente. In altre parole, è possibile affermare che diminuendo lo strain rate si verifica una transizione da fragile a duttile. Questa dinamica è in linea con gli altri materiali polimerici testati. Tuttavia, per rendersi conto di quanto affermato, basta semplicemente cogliere l'estrema differenza di estensione del plateau in corrispondenza della regione plastica di ogni prova, in particolare noteremo come per il test 3d, questa sia estremamente limitata, a differenza del test 5d, dove il plateau è estremamente esteso. Si segnala infine l'altezza finale, post test, del provino a rottura non avvenuta $h_{f6d} = 3,14 mm$ a fronte di un'altezza iniziale $h_{06d} = 4 mm$.

Provino cilindrico-Test 7D

Iniziamo l'analisi, avvalendoci del seguente grafico relativo alla prova di compressione dinamica, Test 7D, con provino di sezione resistente $A_{7d} = 183,85\text{mm}^2$ e di diametro iniziale $d_0 = 15,3\text{mm}$. Il carico, come per tutti gli altri test dinamici, è stato applicato perpendicolarmente alla faccia di dimensioni $A_{6d} = \pi \frac{d_0^2}{4} = 183,85\text{mm}^2$.



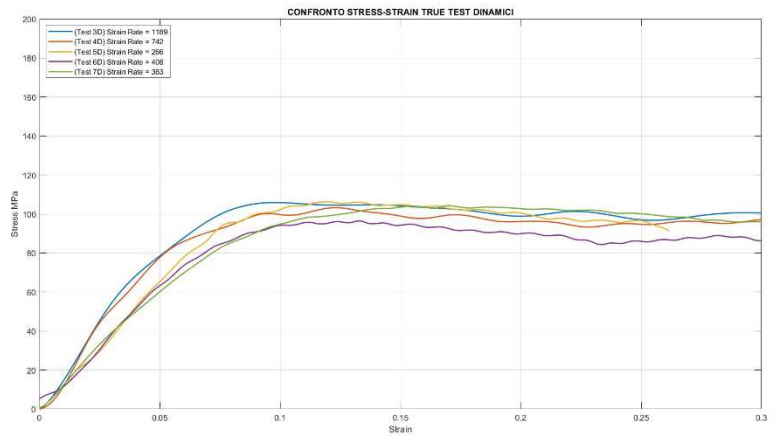
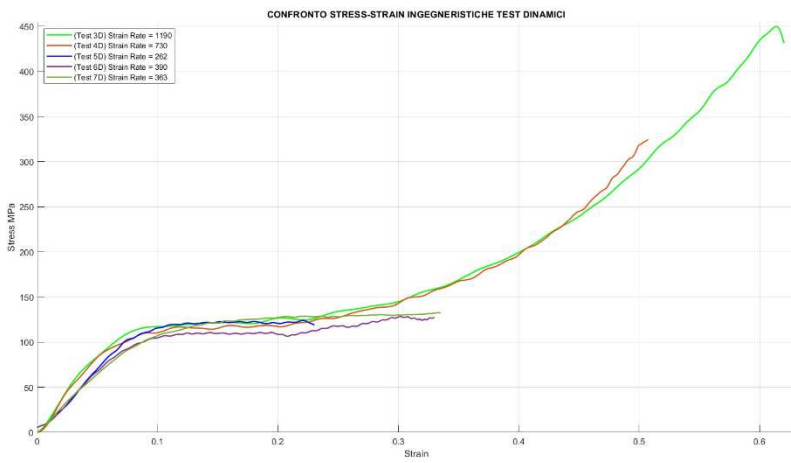
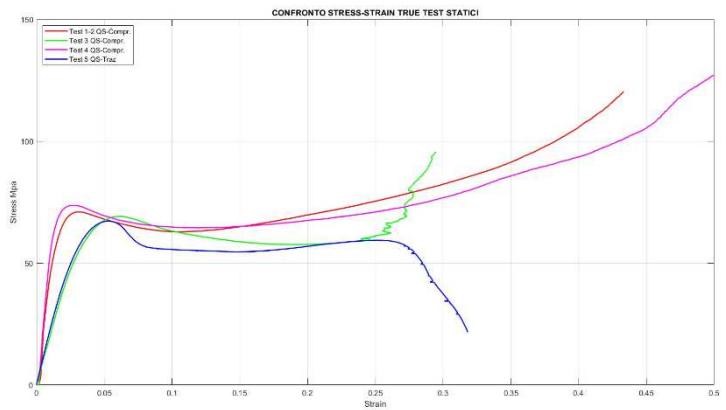
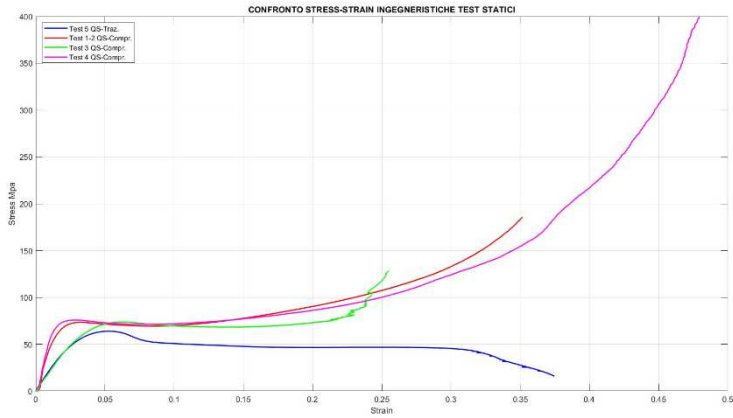
Ribadendo che per il test7d è stato utilizzato un provino avente una stessa simmetria cilindrica, uno stesso spessore, ma un diametro d_0 sensibilmente diverso, circa il doppio rispetto agli altri, possiamo comunque osservare una risposta simile a quella vista per i test 5-6d in funzione anche di uno *strain rate* mediamente basso. Globalmente, si evince come la risposta sia molto piatta, dopo una porzione di curva iniziale avente un legame di tipo lineare tra la tensione σ e la deformazione ε . Come per i precedenti test, si suddivide la curva in più tratti in base al valore dell'entità di deformazione ε , in particolare, considerando la *curva ingegneristica*, in blu, si ha:

- Con $0 \leq \varepsilon \leq 0,05$, siamo nel campo elastico lineare del materiale;
- Con $0,05 \leq \varepsilon \leq 0,15$, si ha una zona di transizione dove il materiale assume un comportamento intermedio tipico di un materiale prettamente elastico e prettamente plastico. Al valore di $\varepsilon \sim 0,063$, si accredita lo snervamento con $\sigma_S = 80\text{MPa}$;
- Con $0,15 \leq \varepsilon \leq 0,31$, si ha il classico "plateau" della tensione;
- Con $\varepsilon \geq 0,31$ si ha un leggerissimo aumento, quasi impercettibile, della tensione fino al termine della prova.

A titolo di completezza è opportuno segnalare che per valore *mediamente basso* di *strain rate*, si intende $D = 363\text{ s}^{-1}$.

Vediamo come la risposta sia abbastanza piatta, questo significa che il materiale assume un comportamento tipicamente duttile per valori di *strain rate* generalmente bassi. È lecito pensare che se si fossero condotti altri test sperimentali a compressione dinamica, spingendo il materiale, anche con quest'ultima tipologia di provino, a valori di *strain rate* sensibilmente più alti, si sarebbe visto un comportamento opposto tipicamente fragile, come appurato nel test 3d, dove si è spinto il materiale a valori sensibilmente più alti rispetto agli altri. Si segnala infine l'altezza finale, post test, del provino a rottura non avvenuta $h_{f7d} = 3,94\text{mm}$ a fronte di un'altezza iniziale $h_{06d} = 4\text{mm}$.

A seguire una panoramica di tutti grafici *ingegneristici* e *true* di tutti i test effettuati.



4.6 CONCLUSIONI

In questo paragrafo conclusivo andremo a delineare il comportamento del Policarbonato Sperimentale sfruttando le evidenze raccolte. Come prima informazione diremo che, coerentemente alla natura di appartenenza, il materiale presenta un comportamento tipicamente **viscoelastico**. In particolare, si è visto come per stati deformativi appartenenti all' ipotesi delle cosiddette "piccole deformazioni", il comportamento risultasse tipicamente elastico, mentre per gli altri non appartenenti alla sopra scritta categoria; quindi, facenti parte dell'ipotesi di "grandi deformazioni", si è visto come il comportamento risultasse viscoso, in quanto, tra l'applicazione del carico e l'effettiva visualizzazione della deformazione effettiva sussistesse un certo ritardo. Sempre coerentemente alla sua natura di appartenenza, la seconda informazione che andremo a condividere è l'**anisotropia** del materiale. Un materiale si definisce **anisotropo** quando le sue caratteristiche meccaniche sono funzione della direzione nella quale si testano, in altre parole è l'opposto di un materiale che assume un comportamento tipicamente **isotropo**. Questa caratteristica rilevante è emersa principalmente dalla caratterizzazione statica, specificatamente dai test statici di compressione, nei quali si è volutamente modificata la direzione di applicazione del carico variando l'orientazione dei provini, allo scopo di visualizzare la variazione della resistenza del materiale testato, ovviamente mantenendo invariato il contesto sperimentale delle due prove in questione. Dalla caratterizzazione dinamica, quindi dalle prove a compressione dinamica, invece è emerso come il comportamento del Policarbonato Sperimentale potesse assumere una duplice tipologia di risposta funzionalmente allo *strain rate*. In particolare, si è visto come all'aumentare dello *strain rate*, il materiale reagisse in maniera fragile. Contrariamente, al diminuire dello *strain rate*, il materiale ha mostrato un comportamento tipicamente duttile. Infatti, le evidenze sperimentali ci mostrano come la l'estensione della regione plastica della risposta del materiale fosse tanto più grande quanto fosse più basso il valore di *strain rate*. Nell'elaborato tuttavia non si sono menzionati gli effetti della variazione della temperatura, non tanto perché non si conosce l'effettiva correlazione tra temperatura e il tasso di deformazione, ma perché, come scritto già precedentemente, i test sono stati condotti tutti alle stesse condizioni di temperatura e pressione. Non è stato perciò possibile inquadrare il materiale sotto questo aspetto, ma è lecito pensare che il materiale sperimentale caratterizzato segua il suo corrispettivo descritto dalla normativa DIN 7728; ossia è possibile che all'aumentare della temperatura si comporti da materiale duttile. Volendo concludere con qualche informazione numerica ricordiamo la densità del Policarbonato sperimentale $\rho_{PC_s} = 1270 \text{ Kg}/\text{m}^3$ e il suo Modulo di Young $E_{PC_s} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ MPa}$.