

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA



Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di ingegneria industriale

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di laurea

ANALISI DEL COMPORTAMENTO A CREEP DEL BLEND POLIBUTILENETEREFTALATO / POLICARBONATO

Relatore: prof. Ricotta Mauro

Correlatore: ing. Salvador Marco

Laureando: Giacca Francesco

Anno accademico 2013 - 2014

INDICE

PAGINA

4 INTRODUZIONE

4	<i>IL CREEP</i>
5	<i>RISORSE PER LA TESI</i>
5	<i>OBBIETTIVO DELLA TESI</i>
6	<i>IL BLEND PBT/PC</i>

7 MODELLI DI ROTTURA A CREEP

7	<i>CRITERI DI CEDIMENTO BASATI SULL'ENERGIA LIBERA</i>
18	<i>CRITERIO VISCOPLASTICO PER LA DETERMINAZIONE DEL LIFE-TIME</i>
21	<i>MODELLO DI SNERVAMENTO DIPENDENTE DAL TEMPO</i>
23	<i>MECCANISMO DI DANNEGGIAMENTO CONTINUO</i>
24	<i>MECCANISMO DI FRATTURA ESTESO A MATERIALI VISCOELASTICI</i>

27 PROVE DI TRAZIONE PIBITHER® HI A1301 - PROVINI RITAGLIATI

27	<i>1. PARAMETRI E DEFINIZIONI</i>
29	<i>2. MODALITÀ OPERATIVE E ACCORGIMENTI PROPOSTI DA NORMATIVA</i>
29	<i>3. ANALISI FELTRO - INDIVIDUAZIONE AREE UTILI</i>
30	<i>4. SCELTA PROVINI</i>
32	<i>5. REALIZZAZIONE DEI PROVINI</i>
34	<i>6. APPARATO SPERIMENTALE</i>
36	<i>7. PROGRAMMA PROVE</i>
37	<i>8. ESECUZIONE DELLE PROVE</i>
57	<i>9. ANALISI DEI RISULTATI e CONCLUSIONI</i>

61 PROVE DI TRAZIONE PIBITHER® HI A1301 - PROVINI STAMPATI

62	<i>STAMPAGGIO PROVINI</i>
64	<i>RISULTATI PROVINI STAMPATI</i>
68	<i>COMMENTI e OSSERVAZIONI</i>
72	<i>CONFRONTO: PROVINI RITAGLIATI vs PROVINI STAMPATI vs DATA SHEET</i>

74 CREEP A ROTTURA - TEST

74	<i>SCELTA DEL PROVINO</i>
----	---------------------------

75	<i>APPARATO SPERIMENTALE</i>
76	<i>PROCEDURA SPERIMENTALE</i>
77	<i>ANALISI DEI DATI</i>
81	<i>SERIE 1</i>
93	<i>SERIE 2</i>
105	<i>SERIE 3</i>

118 CREEP A ROTTURA - ANALISI DATI E BEST FIT MODELLI

118	<i>ANALISI DEI RISULTATI</i>
128	<i>DATI DI CREEP A ROTTURA</i>
129	<i>BEST FIT DEI MODELLI TEORICI</i>
154	<i>CONFRONTO TRA MODELLI TEORICI</i>

159 ANALISI CREEP A ROTTURA MEDIANTE FEM

159	<i>PROCEDIMENTO</i>
160	<i>SCELTA DELLA FORMA DELLA PARTE</i>
161	<i>ANALISI STATICA</i>
169	<i>ANALISI VISCO</i>
172	<i>ANALISI COMPARATIVA STATIC - VISCO</i>

176 CONCLUSIONI

176	<i>I CRITERI DI CREEP A ROTTURA</i>
176	<i>TEST DI TRAZIONE</i>
177	<i>CREEP A ROTTURA - TEST</i>
177	<i>CREEP TEST - ANALISI DATI</i>
178	<i>CRITERIO DI ROTTURA A CREEP - BEST FIT</i>
178	<i>ANALISI - ROTTURA A CREEP MEDIANTE FEM</i>

180 BIBLIOGRAFIA

181 RINGRAZIAMENTI

INTRODUZIONE

In questo lavoro di tesi magistrale ci si pone l'obiettivo di analizzare il comportamento a creep di un materiale polimerico isotropo. In particolare, in base alle risorse messe a disposizione dall'azienda STEP ENGINEERING e dall'ing. Marco Salvador, si ha l'intento di analizzare prevalentemente il comportamento di rottura a creep di un blend composto da polibutilentereftalato (PBT) e policarbonato (PC).

IL CREEP

Il creep è un comportamento presente in tutti i materiali, ma per alcuni di essi (in particolare i materiali polimerici), questo assume una rilevanza non trascurabile, tanto da diventare una caratteristica tipica di questi materiali.

Il fenomeno del creep consiste nell'avere, nel caso in cui ad una struttura venga applicato un carico costante, una deformazione non costante nel tempo. Infatti qualora si applichi una forza premente costante e non eccessiva ad una mensola metallica, essa generalmente si fletterà elasticamente verso il basso istantaneamente senza però sviluppare un'ulteriore deformazione nel tempo. In più essa tenderà a tornare immediatamente nella posizione originale nel momento in cui la forza venga rimossa. Se invece la mensola dovesse essere in materiale polimerico, si avrà comunque una deformazione elastica istantanea ma oltre ad essa si svilupperà una deformazione non costante nel tempo detta viscosa; inoltre qualora dovesse essere rimosso il carico la deformazione elastica sarà recuperata immediatamente mentre non avverrà lo stesso per la componente viscosa della deformazione. Per questo motivo i materiali che mostrano un non trascurabile comportamento a creep sono classificati come viscoelastici.

Per quanto riguarda la viscoelasticità, essa può essere lineare o non lineare. Un materiale viscoelastico lineare è inteso come un materiale che ha una deformazione elastica, seguita da una deformazione viscosa. Inoltre la linearità risiede nel fatto che per ad una tensione nel materiale doppia corrisponde (a parità di tempo) una deformazione doppia. Si noti però che nella stragrande maggioranza dei materiali polimerici il comportamento è non lineare.

Il creep a rottura

Il creep a rottura è quel particolare caso in cui la tensione applicata al materiale porta nel tempo ad una deformazione viscoelastica che non mostra un comportamento asintotico, bensì si ha una deformazione crescente nel tempo che porta al cedimento e quindi alla rottura del componente. Questo comportamento è tanto più evidente, tanto più la tensione applicata si avvicina al limite statico del materiale. A seconda del comportamento a trazione del materiale, la tensione limite staticamente, può essere la tensione di rottura oppure la tensione di snervamento.

RISORSE PER LA TESI

Per l'attività di ricerca e la parte sperimentale della tesi sono state utilizzate le strutture e le attrezzature messe a disposizione dallo studio di ingegneria STEP ENGINEERING S.N.C. di Asolo (TV). Le risorse che sono state messe a disposizione sono le seguenti:

- Un videoterminale dedicato alla ricerca bibliografica;
- Un videoterminale per disegno tecnico e analisi FEM;
- Un componente in PBT/PC per compiere analisi sul materiale impiegato su un prodotto finito;
- Un sacco da 25 kg del blend PBT/PC sotto forma di materia prima;
- La possibilità di stampare 100 provini normati in PBT/PC presso un'azienda cliente;
- Una macchina UTM (Universal Testing Machine) con cui poter eseguire i test di trazione e i test di rottura a creep.

OBBIETTIVO DELLA TESI

In questo studio si cercherà poi di partire dalla materia prima per arrivare a definirne il comportamento a creep a rottura del materiale considerato. Innanzitutto, si eseguirà un'approfondita ricerca bibliografica per raccogliere il numero più elevato di criteri di rottura a creep, facendo attenzione al fatto che siano pertinenti alla tipologia di materiale che si sta analizzando. Inoltre si esegua uno studio delle norme sui materiali polimerici che possano essere utili per queste tipologie di test.

Volendo indagare questo tipo di comportamento, innanzitutto sarà necessario valutare la tensione massima applicabile affinché sia possibile eseguire un creep test (nello specifico a rottura): per fare questo si eseguiranno dei test di trazione, in modo tale da sapere se sia necessario considerare la tensione di snervamento oppure quella di rottura. Per eseguire le prove di trazione sul materiale si farà riferimento alla normativa ISO oppure ASTM a seconda dei casi.

La norma suggerisce due possibili alternative per eseguire dei test di trazione: o si eseguono su dei provini ricavati direttamente da un prodotto finito oppure si eseguono su dei provini ottenuti per stampaggio ad iniezione. Avendo a disposizione entrambe le risorse si eseguiranno entrambe le tipologie di test per valutare le differenze e scegliere la soluzione più adatta per questo studio.

In seguito ai test di trazione si potrà proseguire con i test di rottura a creep. A causa di limiti di sicurezza della macchina presente in laboratorio dell'azienda, si potranno eseguire solamente test della durata massima di 10 ore, per questo motivo i valori di carico applicati durante i test di rottura a creep rimarranno generalmente elevati: si valuterà in fase di test, partendo da valori prossimi alla tensione di snervamento, a che livello di tensione convenga fermarsi per ottenere tempi di rottura a creep inferiori alle 10 ore.

Dopo aver raccolto un insieme significativo di dati di rottura per creep, si cercherà di eseguire un best fit dei dati sperimentali con i criteri raccolti durante la ricerca bibliografica, allo scopo di individuare il

modello che meglio li interpoli. Per fare questo si eseguirà un'analisi di dati incrociata utilizzando MS Excel e il software MATHCAD.

Infine si cercherà di determinare un coefficiente correttivo che permetta di ottenere dei valori plausibili di tempo di rottura a creep eseguendo delle analisi ad elementi finiti di tipo static, anziché visco, con ABAQUS in modo tale da ottenere una convergenza più facile e tempi di durata delle analisi sostanzialmente più brevi.

IL BLEND PBT/PC

Il materiale che si analizzerà ha il nome commerciale PIBITER® HI A1301 ed è prodotto dall'azienda Softer s.p.a. Il marchio Pibiter® identifica una gamma di prodotti a base di Polibutilentereftalato caratterizzati da elevate caratteristiche meccaniche ed elettriche e da ottime prestazioni ad alta temperatura.

La combinazione di proprietà termiche, meccaniche ed elettriche, unitamente all'utilizzo di additivi resistenti alla fiamma e agli agenti chimici, pone il Pibiter® nella classe dei polimeri termoplastici più interessanti per applicazione nel settore ingegneristico.

SCHEDA TECNICA PIBITER® HI A1301

Lega PBT/PC, alta resilienza, bassa fluidità



PROPRIETÀ	METODO	UNITÀ	VALORE
PROPRIETÀ FISICHE			
1 Peso Specifico	ASTM D 792	g/cm ³	1,21
2 Ceneri	INTERNO	%	-
3 Assorbimento d'acqua all'equilibrio (23°C/ 50% UR)	ASTM D 570	%	-
4 Assorbimento all'acqua (24 h / 23° C)	ASTM D 570	%	0,1
5 Ritiro allo stampaggio [valore medio]	INTERNO	%	1,5 - 2
6 Indice di Fluidità (250 °C / 2,16 Kg)	ASTM D 1238	g/10 ^{mm}	3,5
7 Fluidità su stampo spirale a 270 °C (3 mm)	INTERNO	cm	-
PROPRIETÀ MECCANICHE			
8 Sollecitazione in prova tensile	ASTM D 638	MPa	35
- a snervamento		MPa	32
- a rottura	ASTM D 638	%	> 200
9 Allungamento a rottura	ASTM D 638	MPa	1550
10 Modulo elastico a trazione	ASTM D 638	MPa	50
11 Carico Massimo a Flessione	ASTM D 790	MPa	1550
12 Modulo elastico a Flessione	ASTM D 790	MPa	1550
13 Resilienza IZOD con intaglio :	ASTM D 256/A	J/m	900
a 23 °C		J/m	-
a - 10 °C		J/m	850
a - 30 °C		J/m	300
a - 40 °C	ASTM D 256/A	J/m	300
14 Resilienza CHARPY con intaglio :	ISO 179/1eA	kJ/m ²	-
a 23 °C		kJ/m ²	-
a - 30 °C	ISO 179/1eA	kJ/m ²	-
15 Resilienza CHARPY senza intaglio :	ISO 179/1eU	kJ/m ²	NR
a 23 °C		kJ/m ²	NR
a - 30 °C	ISO 179/1eU	kJ/m ²	NR
16 Durezza ROCKWELL	ASTM D 785	M	-
PROPRIETÀ TERMICHE			
17 Temperatura di Rammollimento VICAT :	ASTM D 1525	° C	211
A/50		° C	117
B/50	ASTM D 1525	° C	-
18 H.D.T. - Metodo A (1,82 MPa)	ASTM D 648	° C	70
- Metodo B (0,4552 MPa)	ASTM D 648	° C	-
19 Coefficiente di dilatazione termica lineare	ASTM D 696	10 ⁻⁵ /K	-
PROPRIETÀ DI INFIAMMABILITÀ			
20 Test di reazione al fuoco (0,8 mm)	UL 94	-	HB
PROPRIETÀ ELETTRICHE			
21 Resistenza specifica di superficie	ASTM D 257	Ohm	-
22 Resistività di volume	ASTM D 257	Ohm.cm	-
23 Rigidità Dielettrica (a 1,6 mm)	ASTM D 149	kV/mm	-
24 Costante dielettrica [1 kHz]	ASTM D 150	-	-
25 Resistenza alle correnti striscianti	DIN 53480	-	-
26 Fattore di dissipazione tan δ	ASTM D 150	-	-
- 1 KHz		-	-
- 100 KHz	ASTM D 150	-	-

I materiali Pibiter® della serie HI, come in questo caso, sono caratterizzati dal fatto che sono leghe a base di PBT modificato con Policarbonato ed Elastomero per applicazioni che richiedono elevata resistenza all'urto unitamente a buone caratteristiche meccaniche e termiche. La scheda tecnica del prodotto è presentata in figura (1).

Per questo lavoro di tesi si ha a disposizione sia il materiale sottoforma di prodotto finito (selle di bicicletta fornite da un cliente di STEP ENGINEERING) sia di materiale sotto forma di grano per ottenere dei provini dallo stampaggio ad iniezione. Sarà interessante analizzare la variabilità del comportamento del materiale ricavato direttamente dal prodotto finito oppure da processo di stampaggio ad iniezione.

Figura 1 - Data sheet del blend PBT/PC considerato

MODELLI DI ROTTURA A CREEP

Un aspetto molto importante per caratterizzare il comportamento meccanico di un componente in materiale polimerico è quello relativo alla rottura a creep. Il creep è un fenomeno tipico di questi materiali e si divide in tre fasi: primario, secondario e terziario. Qualora dovesse raggiungere il livello terziario si incorrerebbe in un cedimento abbastanza rapido che porterebbe alla rottura del componente. Si ha quindi in questo caso il fenomeno di cedimento a creep.

Esso dipende sostanzialmente da tre fattori: il livello di carico, il tempo e la temperatura.

Per identificare un cedimento a creep è necessario quindi conoscere come dati di input: le caratteristiche del materiale, la temperatura di impiego, il carico applicato. Noti queste si dovrebbe poter ottenere come risultato il tempo necessario affinché il componente arrivi al cedimento per creep.

Lo sviluppo di modelli atti a determinare la vita dei materiali polimerici, a creep e a fatica, è stato molto faticoso negli anni passati. Per affrontare questo problema sono stati sviluppati diversi approcci: molti di questi si basano sui meccanismi di frattura che hanno come scopo quello di predire la crescita delle cricche in funzione del tempo. Altri metodi, non sviluppati ancora molto profondamente, si basano sul modulo e sulle leggi di resistenza dei materiali viscoelastici.

CRITERI DI CEDIMENTO BASATI SULL'ENERGIA LIBERA

Un particolare tipo di approccio, seguito per determinare il cedimento a creep, mette in relazione il modulo con le leggi costitutive dei materiali viscoelastici. Un esempio di questo approccio è il criterio di Reiner-Weissenberg, su cui sono state fatte delle ricerche estese da parte di Bruller, Hiel e Schapery.

Il concetto di base su cui si fonda questo criterio è il seguente: il lavoro svolto durante il caricamento dalle forze esterne su un materiale viscoelastico viene convertito in due parti: una che viene immagazzinata (energia potenziale) e un'altra che viene persa (energia dissipata). Sostanzialmente il criterio sostiene che l'istante in cui si ha il cedimento dipende da una combinazione tra l'energia libera di distorsione e l'energia dissipata: un valore di soglia dell'energia di libera distorsionale è la quantità che governa il fenomeno.

In un materiale avente un comportamento puramente elastico si hanno come limiti strutturali di resistenza un certo valore di carico o di deformazione massimo, oltre i quali si ha il cedimento. Il criterio R-W può essere considerato un'estensione di quanto appena detto, applicato però ai materiali viscoelastici. Ora non sono più il carico o la deformazione massimi a rappresentare gli unici limiti: si aggiunge anche quello della massima energia immagazzinabile, considerata una costante del materiale (alla pari della tensione di snervamento e della deformazione a rottura). Affinché questo criterio sia applicabile è necessario assumere alcune ipotesi: il materiale deve essere assunto lineare viscoelastico, si è nel caso monoassiale e la tensione applicata è di semplice trazione.

Molti ricercatori in quest'ambito hanno fatto delle obiezioni nell'assumere l'esistenza dell'energia libera per materiali che hanno memoria, questo perché abbastanza frequentemente si nota che i parametri termodinamici non hanno valori univoci e costanti, ma variabili da caso a caso.

Hunter ha supposto che l'energia immagazzinata in un materiale viscoelastico lineare può essere considerata pari all'energia potenziale posseduta dalle molle di un qualunque modello molle-smorzatori.

Secondo altri è possibile determinare l'energia libera con una formulazione quadratica il più generale possibile anche senza ricorrere alla rappresentazione del modello, così come proposto da Breuer e Onat. Secondo questi autori inoltre non c'è un'unica soluzione al problema e l'energia immagazzinata in un materiale viscoelastico non può essere caratterizzata basandosi semplicemente sulle equazioni costitutive.

In letteratura sono poi presenti diverse formulazioni che esprimono l'energia libera per materiali lineari viscoelastici; Gurtin e Hrusa ne hanno proposto una per una relazione carico-deformazione ad integrale singolo. Data la costante V , l'energia è data da:

$$\psi(t) = V[\epsilon(t - \tau)] \quad , \quad 0 \leq \tau < \infty$$

Equazione 1

dove $\epsilon(t - \tau)$ è la storia di deformazione al tempo t , purché sia compatibile con la disuguaglianza di Clausius-Planck,

$$\dot{\psi}(t) \leq \sigma(t)\dot{\epsilon}(t)$$

Equazione 2

Quando il sistema è adiabatico e la funzione $\psi(t)$ rappresenta proprio l'energia interna, cioè con l'approssimazione isoterma, l'energia libera coincide con l'energia. Questa teoria si pone come obiettivo quello di caratterizzare in maniera esaustiva l'energia attraverso un'integrazione, quando sono noti i livelli di carico e di deformazione.

Si ipotizzi, a scopo illustrativo, di considerare il modello standard per materiali viscoelastici lineari, quello cioè di figura (1). La deformazione e la tensione dati da questo modello sono rispettivamente i seguenti:

$$\epsilon(t) = D_0\sigma(t) + \lambda D_1 \int_0^\infty e^{-\lambda\tau} \sigma(t - \tau) d\tau$$

Equazione 3

$$\sigma(t) = \frac{1}{D_0}\epsilon(t) - \lambda \frac{D_1}{(D_0)^2} \int_0^\infty e^{-\lambda \frac{D_0 + D_1}{D_0} \tau} \epsilon(t - \tau) d\tau$$

Equazione 4

Per la relazione tensione-deformazione data, Gurtin e Hrusa, scartando ogni modello molle-smorzatori, hanno dimostrato che c'è un'unica formula a singolo integrale per l'energia libera.

$$\psi = \frac{1}{2} \frac{1}{D_0 + D_1} \epsilon(t)^2 + \frac{1}{2} \lambda \frac{D_1}{(D_0)^2} \int_0^\infty \exp \left[-\lambda \frac{D_0 + D_1}{D_0} \tau \right] [\epsilon(t) - \epsilon(t - \tau)]^2 d\tau$$

Equazione 5

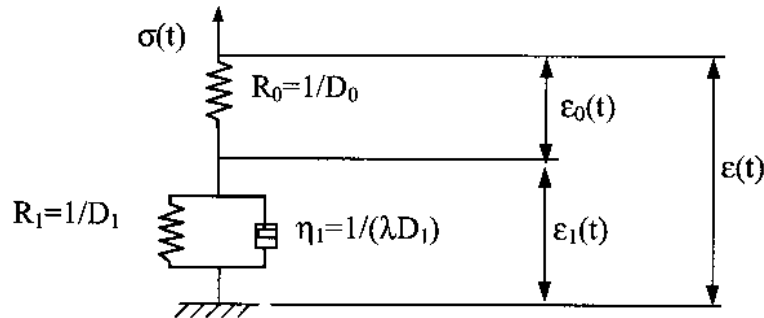


Figura 1 - modello standard per materiali viscoelastici

Ora si consideri il modello standard dato in figura (1). Seguendo la sua interpretazione fisica si può definire l'energia libera come l'energia potenziale contenuta nelle molle R_0 e R_1 , ed è pari a:

$$w = w_{R_0} + w_{R_1}$$

Equazione 6

$$w = \int_0^{\epsilon_0} \sigma_{R_0}(t) d\epsilon + \int_0^{\epsilon_1} \sigma_{R_1} d\epsilon$$

Equazione 7

$$w = \int_0^{\epsilon_0} \frac{\epsilon}{D_0} d\epsilon + \int_0^{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{D_1} d\epsilon$$

Equazione 8

Sapendo che:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0(t) + \epsilon_1(t)$$

Equazione 9

$$\epsilon_0(t) = D_0 \sigma(t)$$

Equazione 10

$$\epsilon_1(t) = \lambda D_1 \int_0^\infty e^{-\lambda \tau} \sigma(t - \tau) d\tau$$

Equazione 11

$$\sigma_{R_1}(t) = \frac{\epsilon_1(t)}{D_1} = \lambda \int_0^\infty e^{-\lambda\tau} \sigma(t-\tau) d\tau$$

Equazione 12

Sostituendo e facendo opportuni passaggi matematici ottengo il seguente risultato:

$$w = \frac{1}{2D_0} [\epsilon(t) - \epsilon_1(t)]^2 + \frac{1}{2D_1} [\epsilon_1(t)]^2$$

Equazione 13

Infine si ottiene l'energia libera in funzione della deformazione in seguito ad opportuni passaggi e sostituzioni:

$$w = \frac{1}{2} \frac{1}{D_0 + D_1} \epsilon(t)^2 + \frac{1}{2} \frac{D_1}{D_0(D_0 + D_1)} \times \left[\epsilon(t) - \lambda \frac{D_0 + D_1}{D_0} \int_0^\infty \exp\left[-\lambda \frac{D_0 + D_1}{D_0}\right] \epsilon(t-\tau) d\tau \right]^2$$

Equazione 14

Si noti che allo stesso modo è possibile ricavare l'energia come funzione della tensione, ottenendo quindi la seguente formulazione:

$$w = \frac{D_0}{2} \sigma(t)^2 + \frac{\lambda^2 D_1}{2} \left[\int_0^\infty e^{-\lambda\tau} \sigma(t-\tau) d\tau \right]^2$$

Equazione 15

Gli stessi risultati ottenuti in questo modo, si possono ottenere dalla formulazione proposta da Hunter, il quale, come è già stato detto, si è basato sui modelli fisici dei materiali viscoelastici.

Le espressioni delle energie libere ψ e w non sono identiche. A titolo di esempio si considerino i seguenti dati:

- $D_0 = 1 \text{ GPa}^{-1}$,
- $D_1 = 0.5 \text{ GPa}^{-1}$
- $\lambda = 0.5 \text{ s}^{-1}$

Usando questi parametri, sono state fatte due simulazioni numeriche per ottenere due diverse storie di carico: una curva di creep e una di rilassamento delle tensioni. Le curve così ottenute sono riportate in figura (2).

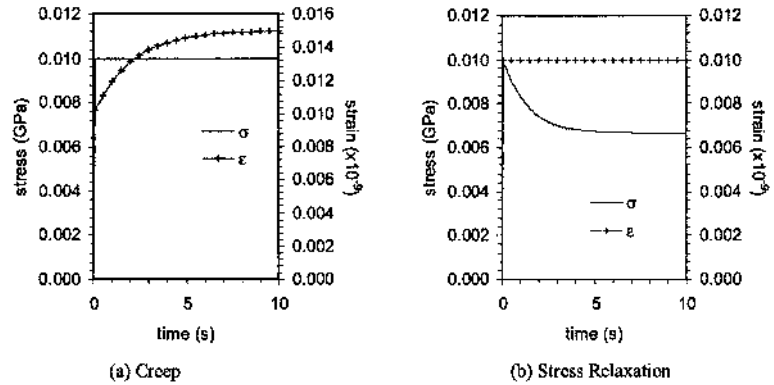


Figura 2 - tensione e deformazione per creep e rilassamento delle tensioni

Usando le equazioni (5) e (14) è stato possibile poi determinare le due energie libere relative ad ogni storia di carico, così da poterne confrontare i risultati. I risultati sono visibili in figura (3).

Osservando i grafici è possibile notare che l'energia libera w è sempre inferiore rispetto all'energia libera ψ , e solamente dopo un tempo sufficientemente lungo le due curve si avvicinano molto tendendo (per tempi infiniti) a coincidere.

In questo caso la particolare descrizione dello stato interno, rappresentato dalla fig (1), usata per calcolare l'energia libera w risulta un parametro univoco, corrispondente alla minima energia libera. Questa formulazione però è indipendente dal modello rappresentativo del materiale; per questo motivo il criterio di cedimento che sarà presentato si basa sulla teoria sviluppata da Hunter, il quale considera invece l'interpretazione fisica del modello, definendo l'energia libera come l'energia immagazzinata in ogni molla di un qualsiasi modello molle-smorzatori proposto.

Infine dunque, per quanto riguarda la determinazione dell'energia libera, è stata riscontrata la presenza in letteratura di principalmente due formulazioni: l'energia ψ e l'energia w , che corrisponde alla minima energia libera. Inoltre è stato constatato che vale la seguente disequazione:

$$\psi \geq w.$$

Equazione 16

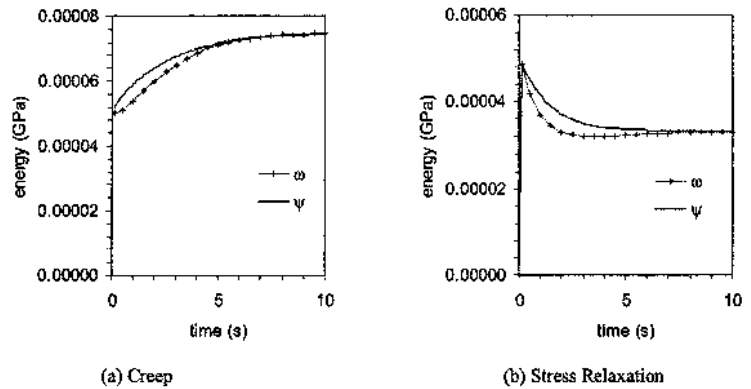


Figura 3- Energia libera per creep e per rilassamento delle tensioni

RELAZIONI TRA CREEP, ENERGIA LIBERA E CRITERIO DI CEDIMENTO

Per rappresentare il comportamento su larga scala temporale della maggior parte dei materiali viscoelastici, il modello standard non è adeguato. Bensì conviene fare riferimento ad un modello composto da n elementi di Kelvin (molla e smorzatore in serie) in parallelo ad una molla singola. L'andamento della deformazione è espresso dalla seguente equazione:

$$\epsilon(t) = D_0 \sigma(t) + \int_{-\infty}^t \sum_{i=1}^n D_i (1 - e^{-(t-\tau)/(\tau_i)}) \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau$$

Equazione 17

Si adotti l'assunzione fatta da Hunter, secondo cui il materiale viscoelastico può essere considerato come una serie di molle e smorzatori collegati tra loro. Supponendo un fenomeno di creep generico,

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t)$$

Equazione 18

È possibile ricavare il risultato dell'equazione (17), che è pari a:

$$\epsilon(t) = D_0 \sigma_0 + \sigma_0 \sum_{i=1}^n D_i (1 - e^{-t/\tau_i})$$

Equazione 19

Per questo caso di carico è possibile ricavare l'energia immagazzinata nelle molle (stored energy), l'energia dissipata dagli smorzatori (dissipated energy) e l'energia totale, ottenendo i seguenti risultati.

$$w_{stor} = \sigma_0^2 \left[\frac{D_0}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{2} (1 - e^{-t/\tau_i})^2 \right]$$

Equazione 20

$$w_{diss} = \sigma_0^2 \left[\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{2} (1 - e^{-2t/\tau_i}) \right]$$

Equazione 21

$$w_{tot} = w_{stor} + w_{diss} = \sigma_0^2 \left[\frac{D_0}{2} + \sum_{i=1}^n D_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right]$$

Equazione 22

In questo caso, in cui la funzione di creep (o rilassamento) di un materiale linearmente viscoelastico è data come combinazione lineare di un numero finito di elementi esponenziali negativi, la formulazione di Hunter fornisce la minima energia libera.

Tuttavia il modello ci costringe a dover individuare $2n+1$ costanti del materiale: D_0 , D_i e τ_i . Questo problema può essere evitato usando un modello lineare viscoelastico e approssimando la legge di potenza, nel seguente modo:

$$\epsilon(t) = D_0 \sigma(t) + \int_{-\infty}^t C \left(\frac{t-\tau}{\tau_0} \right)^n \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau$$

Equazione 23

La soluzione dell'equazione (23) appena riportata per il creep, $\sigma(t) = \sigma_0 H(t)$, è data da

$$\epsilon(t) = \left[D_0 + C \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n \right] \sigma_0$$

Equazione 24

Dove D_0 , C e n ($0 < n < 1$) sono dei parametri del materiale e τ_0 è un tempo di riferimento. Questo passaggio è stato reso possibile da Hiel, il quale ha determinato approssimativamente l'energia libera w quando il modulo a creep è rappresentato da una legge di potenza. Ha assunto che è equivalente ad un sistema di molle e smorzatori composto da n elementi di kelvin con una molla libera, ottenendo quindi il seguente risultato:

$$\frac{w_{tot}}{\sigma_0^2} - \frac{D_0}{2} = \sum_{i=1}^n D_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \approx C \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n$$

Equazione 25

Vale anche la seguente equazione:

$$\frac{w_{diss}}{\sigma_0^2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n D_i (1 - e^{-2t/\tau_i}) \approx \frac{1}{2} C \left(\frac{2t}{\tau_0} \right)^n$$

Equazione 26

Infine si ottiene l'espressione dell'energia libera, che è pari all'energia immagazzinata nelle molle del modello:

$$w_{stor} \approx \left[\frac{D_0}{2} + C \left(\left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n - \frac{1}{2} \left(\frac{2t}{\tau_0} \right)^n \right) \right] \sigma_0^2$$

Equazione 27

L'energia immagazzinata definisce una energia di Helmholtz (libera disponibile) di deformazione, cioè quel lavoro che è possibile svolgere per deformare il materiale prima che questo giunga a cedimento. La legge di potenza descrive il comportamento di un materiale viscoelastico lineare che mostra un ritardo nella risposta proporzionale a t^{n-1} , che è corrispondente proprio a quello che si ottiene con una distribuzione continua di molle e smorzatori.

Usando l'espressione dell'energia libera data da Hunter per il caso precedente, si ottiene

$$w_{stor} = \left[D_0 + C \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n \right] \sigma(t)^2 - \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^t \left[D_0 + C \left(\frac{2t - t_1 - t_2}{\tau_0} \right)^n \right] \frac{\partial \sigma(t_1)}{\partial t_1} \frac{\partial \sigma(t_2)}{\partial t_2} dt_1 dt_2$$

Equazione 28

Questa equazione in caso di sollecitazione a creep, espresso da $\sigma(t) = \sigma_0 H(t)$, diventa:

$$w_{stor} = \left[D_0 + C \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n \right] \sigma_0^2 - \frac{1}{2} \left[D_0 + C \left(\frac{2t}{\tau_0} \right)^n \right] \sigma_0^2$$

Equazione 29

Che è equivalente all'espressione ottenuta precedentemente (equazione 27). Questo prova che l'approccio suggerito da Hiel fornisce l'esatta espressione dell'energia immagazzinata in tutte le molle, assumendo il modello come una distribuzione continua di molle e smorzatori.

Nell'espressione proposta da Hiel dell'energia libera approssimata, se ne si considera il limite per il tempo che tende a zero, si ottiene

$$\lim_{t \rightarrow 0} w = \frac{D_0}{2} \sigma_0^2.$$

Equazione 30

Basandosi su questo risultato e considerando la tensione statica di rottura σ_R , ottenuta a temperatura costante, si può ricavare la massima energia libera possibile (w_R) per un dato materiale, ed è:

$$w_R = \frac{D_0}{2} \sigma_R^2$$

Equazione 31

Ovviamente questa equazione è valida per un materiale con comportamento lineare elastico. Per un materiale viscoelastico devono essere fatte delle considerazioni: nel caso della caratterizzazione statica è ragionevole constatare che il tempo necessario per arrivare a rottura è troppo corto per mostrare un significativo comportamento a creep; infatti in realtà un certo creep deve manifestarsi. Per questo, in un materiale viscoelastico, la tensione di rottura σ_R corrisponde a quella necessaria per rompere il materiale nella regione elastica. È bene quindi che il valore di questa tensione di rottura venga determinato da test di rottura a creep invece che da test di resistenza statici.

Ora, usando il criterio di Reiner-Weissenberg,

$$w = w_R$$

Equazione 32

E sfruttando le equazioni (27) e (31), si può infine ottenere il tempo necessario per avere il cedimento a creep

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_A = \left(\frac{1}{1 - 2^{n-1}}\right)^{1/n} \left[\frac{1}{2} \frac{D_0 (\sigma_R - \sigma_0)(\sigma_R + \sigma_0)}{C \sigma_0^2} \right]^{1/n}$$

Equazione 33

Si noti che questo esprime un tempo in forma adimensionale: il tempo per il cedimento t_R è rapportato ad una costante di tempo τ_0 .

CRITERIO DEL LAVORO DELLA TENSIONE MASSIMA

Altri autori usano una diversa formulazione per l'energia, ma da utilizzare in un criterio simile. In questo caso, facendo riferimento a quanto sviluppato da Malmeisters, il criterio afferma che il cedimento avviene quando il lavoro svolto dallo stress raggiunge un valore critico, ψ_R .

Per determinare il lavoro svolto dal carico si utilizzi la seguente espressione:

$$\psi = \left[\frac{D_0}{2} + C \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n \right] \sigma_0^2$$

Equazione 34

Si noti che in questa trattazione la quantità ψ_R , ottenuta dopo la rottura del materiale dall'equazione appena citata, è considerata una proprietà del materiale. Questa affermazione non vale per il criterio di Reiner-Weissenberg. Anche se per tempo tendente a zero si ha $\sigma_0 \rightarrow \sigma_R$, cosicché le equazioni (27) e (34) coincidono:

$$\psi_R = w_R,$$

Equazione 35

ottenendo dunque il seguente tempo per la rottura,

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0} \right)_B = \left[\frac{1}{2} \frac{D_0 (\sigma_R - \sigma_0) (\sigma_R + \sigma_0)}{C \sigma_0^2} \right]^{1/n}$$

Equazione 36

Anche in questo caso il tempo a rottura è in forma adimensionale, rapportato ad una costante di tempo.

CRITERIO DELLA MASSIMA DEFORMAZIONE

Questo criterio afferma che, affinché non ci sia cedimento è necessario rispettare la seguente condizione

$$\epsilon \leq \epsilon_{max}$$

Equazione 37

Dove $\epsilon_{max} = D_0 \sigma_R$.

Dall'equazione (24) per determinare la deformazione a creep, se si considera il limite per $t \rightarrow 0$, allora

$$\lim_{t \rightarrow 0} \epsilon(t) = D_0 \sigma_0$$

Equazione 38

Anche in questo caso, come per il criterio precedente, si assume σ_R pari alla tensione di rottura discussa precedentemente. Infine è possibile determinare il tempo a rottura con la seguente espressione

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0} \right)_C = \left[\frac{D_0 (\sigma_R - \sigma_0)}{C \sigma_0} \right]^{1/n}$$

Equazione 39

Che, come nei casi precedenti rappresenta un tempo adimensionale rapportato alla costante di tempo τ_0 .

Ora si analizzino i risultati ottenuti con i tre criteri appena presentati. È possibile dire che il tempo ricavato con il criterio della massima deformazione è maggiore di quello del massimo lavoro di stress, che è a sua volta maggiore di quello ricavato con il criterio di R-W,

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_C < \left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_B < \left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_A$$

Equazione 40

Infine, è possibile verificare per tutte le espressioni, che se la tensione applicata è nulla, ho un tempo a rottura infinito

$$\lim_{\sigma_0 \rightarrow 0} \frac{t_R}{\tau_0} = \infty$$

Equazione 41

Che è esattamente ciò che ci si aspetta e che accade nella realtà.

NUOVO APPROCCIO AL CRITERIO DI REINER WEISSENBERG

La teoria di R-W sostiene che la capacità di energia immagazzinabile di un materiale ha un valore massimo, e questo limite viene considerato un costante del materiale stesso. In questo nuovo approccio, invece si suppone che per alcuni polimeri l'energia massima immagazzinabile non è sempre costante e in alcuni casi può essere considerata in funzione dello stress applicato. Dopo delle osservazioni che sono state fatte in sede sperimentale da diversi autori si può apportare una semplice modifica al criterio di R-W che esprima l'energia libera di cedimento in funzione della tensione applicato. La relazione proposta per correlare questi due parametri è la seguente:

$$w_R = \left(\frac{D_0}{2} \sigma_R\right) \sigma_0$$

Equazione 42

Ora, se si applica il criterio di rottura dato dall'equazione (32), si può determinare il tempo necessario per arrivare alla rottura per creep.

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_D = \left(\frac{1}{1 - 2^{n-1}}\right)^{1/n} \left[\frac{1}{2} \frac{D_0}{C} \frac{(\sigma_R - \sigma_0)}{\sigma_0}\right]^{1/n}$$

Equazione 43

Analizzando l'espressione ottenuta per questo modello è facilmente constatabile che il tempo a rottura di quest'ultimo criterio è inferiore al tempo a rottura del criterio originale di R-W.

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_D < \left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_A$$

Equazione 44

Per poter confrontare i criteri presentati è necessario eseguire una normalizzazione dell'espressione dell'energia libera di cedimento e dell'espressione dello stress applicato. In questo modo si ha rispettivamente:

$$\bar{w}_R = \frac{w_R}{\left(\frac{D_0}{2} \sigma_R^2\right)}$$

Equazione 45

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_R}$$

Equazione 46

Grazie a queste espressioni è possibile riscrivere le espressioni di tutti i criteri in forma adimensionale. Si prenda l'equazione (27) per l'energia w e, introducendo il tempo di cedimento a creep ricavato per ogni criterio, si ottengono le seguenti espressioni dell'energia libera di rottura normalizzata in funzione della tensione applicata:

Criterio di R-W:

$$\bar{w}_R = 1$$

Equazione 47

Criterio del massimo lavoro della tensione:

$$\bar{w}_R = 2^n \bar{\sigma}_0^2 + (1 - 2^{n-1})$$

Equazione 48

Criterio della massima deformazione:

$$\bar{w}_R = (2^n - 1) \bar{\sigma}_0^2 + (2 - 2^n) \bar{\sigma}_0$$

Equazione 49

Criterio di R-W modificato:

$$\bar{w}_R = \bar{\sigma}_0$$

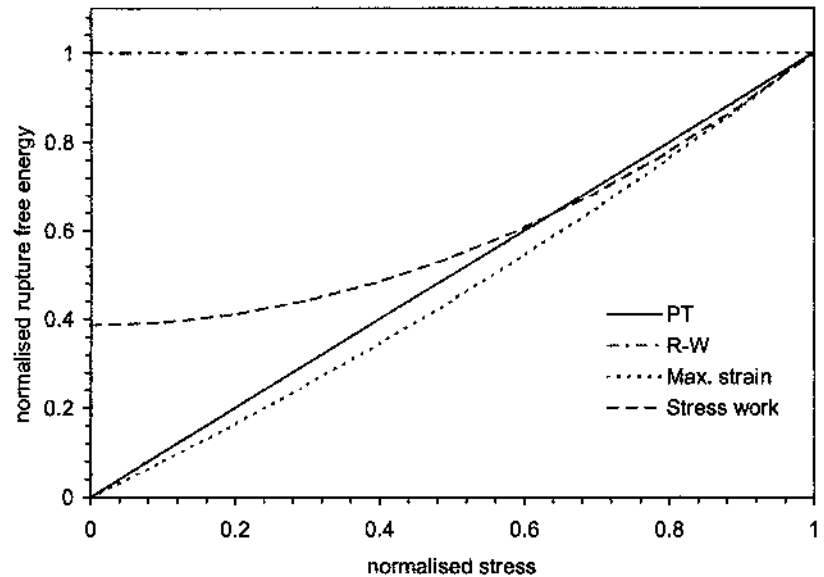
Equazione 50

Supponendo per esempio un valore di $n=0.3$, sono stati riportati i risultati di questi quattro criteri in figura (4).

Come si può vedere i diversi criteri forniscono risultati molto simili nelle regioni di livello di carico più alto, cioè quando la tensione supera il 50% della tensione di rottura, ad eccezion fatta per il criterio di R-W. Questo significa che questi criteri possono predire il tempo necessario per la rottura a creep

molto bene per valori di carico alti, mentre forniscono risultati sensibilmente diversi tra loro per livelli di tensione più bassi.

Figura 4 - Confronto tra criteri di cedimento per materiali lineari viscoelastici per $n=0.3$



CRITERIO VISCOPLASTICO PER LA DETERMINAZIONE DEL LIFE-TIME

Uno degli approcci più noti per la descrizione di cedimento per un materiale supposto viscoplastico è quello proposto da Mindel e Brown secondo cui la velocità di deformazione a creep è espressa dalla formula:

$$\dot{\epsilon} = f_1(T)f_2(\sigma/T)f_3(\epsilon)$$

Equazione 51

Dove $\dot{\epsilon}$ è la velocità di deformazione a creep, ϵ è la deformazione, T è la temperatura e f_1 , f_2 e f_3 sono delle funzioni specifiche.

Successivamente, in accordo con le teorie basate sull'attivazione termica, si ottiene la seguente formulazione della velocità di deformazione a creep:

$$\dot{\epsilon} = C e^{-Q/kT} e^{\sigma v_p/3kT} e^{(\sigma - \sigma_{int})v_s/kT}$$

Equazione 52

Dove:

- C è una costante;
- Q è l'energia di attivazione;
- k è la costante di Boltzmann;
- T è la temperatura;
- v_p è la pressure activation volume;
- v_s è shear activation volume;
- σ_{int} è uno stress interno.

Quest'ultimo stress è proporzionale alla deformazione recuperabile ϵ_r , grazie alla seguente relazione:

$$\sigma_{int} = K_2 \varepsilon_R$$

Equazione 53

In questa formula K_2 è una costante proporzionale alla temperatura.

Si noti che questa componente di tensione interna è quella che si oppone alla tensione effettivamente applicata al materiale. Ad ogni modo la velocità di deformazione può essere riscritta in forma semplificata nel seguente modo:

$$\dot{\varepsilon} = A e^{\sigma v_p / 3kT} e^{(\sigma - \sigma_{int}) v_s / kT}$$

Equazione 54

Durante il fenomeno del creep si ha un accumularsi di deformazioni che si sommano, in relazione alle proprietà viscoelastiche del materiale. Dopo una prima parte di deformazione viscoelastica, in cui si sono sviluppate grandi deformazioni, si può assumere che prevalga quella plastica. Per questo motivo la deformazione a creep può essere generalmente analizzata suddividendola in diversi contributi:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_p + \varepsilon_R$$

Equazione 55

- ε_{el} è la deformazione elastica, che ha un valore costante per ogni livello di carico;
- ε_p è la deformazione plastica;
- ε_R è la deformazione che viene poi recuperata (è stata già vista la sua definizione in precedenza).

Per determinare la deformazione plastica è necessario eseguire l'integrale della velocità di deformazione plastica, che secondo Spathis e Kontou si può ricavare nel seguente modo: si assuma che la deformazione sia distribuita in regioni specifiche caratterizzate da una quantità di volume libero extra o da difetti. Queste regioni operano come dei siti di nucleazione per la deformazione plastica, infatti è proprio da questi punti che essa nasce e si sviluppa. Per questo motivo si assume una distribuzione di densità di probabilità normale per identificare i siti di nucleazione della deformazione plastica.

Combinando questo meccanismo con una formulazione cinematica per la separazione della deformazione tra elastica e plastica, la velocità di deformazione plastica è data da:

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{\dot{\varepsilon}}{(1 + \varepsilon) \varepsilon^y} \frac{1}{s \sqrt{2\pi}} \int_0^\varepsilon e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_i - \mu}{s} \right)^2} d\varepsilon_i$$

Equazione 56

- $\dot{\varepsilon}$ è la velocità di deformazione globale data dall'equazione precedente;
- s e μ sono la deviazione standard e il valore medio della densità di probabilità ;
- ε^y è una costante, che si assume pari a μ .

I valori relativi alla densità di probabilità (media e deviazione standard) sono fondamentali per determinare la deformazione plastica in quanto controllano le modalità con cui i siti di nucleazione della deformazione plastica nascono e poi si sviluppano. Analizzando i dati e osservando la curva che mette in relazione la velocità di deformazione plastica con la deformazione (figura 6), si evince che il

passaggio dal comportamento viscoelastico a quello viscoplastico avviene bruscamente dopo che abbastanza deformazione è stata accumulata.

All'inizio della deformazione la componente plastica è nulla, avendo come responsabile principale la componente elastica. In queste condizioni al crescere della deformazione, essendo la componente elastica costante nel tempo, si avrà un aumento della sola deformazione recuperabile (almeno finché non compare la componente plastica). Quindi, osservando l'equazione (53) si noti che aumenta anche la tensione interna σ_{int} con conseguente riduzione del valore della differenza $(\sigma - \sigma_{int})$. Se si riduce questo termine, rifacendosi all'equazione relativa alla velocità di deformazione (eq. 54), si ottiene una riduzione della velocità di deformazione. Quindi nelle fasi iniziali del creep ci si trova ad avere velocità di deformazione decrescenti in quanto c'è la tensione interna che si oppone alla deformazione e tende a rallentare il creep. Man mano che il creep procede si ha la comparsa anche della deformazione plastica che genera un contributo rilevante sin da subito sulla deformazione globale, portando quindi alla diminuzione drastica della deformazione recuperabile: in questo modo diminuisce la tensione interna che tenderebbe a rallentare la deformazione e si ha dunque un innalzamento della velocità di deformazione.

È quindi presente un punto di minimo nella curva che rappresenta il logaritmo della velocità di deformazione in funzione del logaritmo del tempo. Il tempo corrispondente a questo punto può essere considerato proprio quello di cedimento del materiale. Secondo questo metodo si definisce il tempo di cedimento a creep come quel tempo a cui corrisponde la minima velocità di deformazione a creep.

Ora si osservi che è possibile ottenere la velocità di deformazione al variare della deformazione stessa nel modo seguente:

1. L'equazione (54) fornisce l'evoluzione della deformazione totale attraverso la velocità di deformazione;
2. Integrando l'equazione (56) posso ottenere la deformazione plastica;
3. Dall'equazione (55) mi ricavo la deformazione recuperabile;
4. Considero la deformazione elastica costante;
5. Dalla combinazione dei dati precedenti posso ricavarli l'andamento della velocità di deformazione con una deformazione variabile.

Esaminando una procedura di un test di deformazione a creep si può notare che se viene applicato un carico costante, si ottiene istantaneamente una deformazione elastica seguita da una fase nota con il nome di creep primario caratterizzata da una velocità di deformazione decrescente. In seguito si ha una fase di creep secondario in cui la velocità è considerata costante. Infine si passa al creep terziario con un brusco aumento di velocità di deformazione, dovuto alla componente plastica. Per questo modello quindi la risposta a creep si assume che il comportamento del materiale sia inizialmente viscoelastico non lineare e successivamente, quando la deformazione è accumulata, prevale un comportamento viscoplastico.

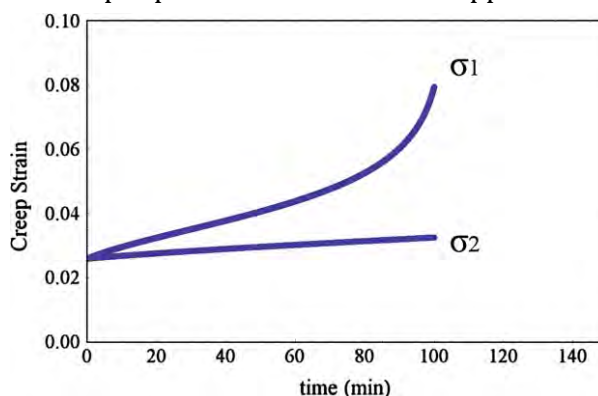


Figura 5 - presentazione schematizzata della curva deformazione-tempo a creep per due livelli di carico

Se eseguiamo un test di creep con un carico applicato σ_1 molto vicino alla tensione di snervamento del materiale, il provino giungerà molto rapidamente a rottura deformandosi significativamente in poco tempo. Se invece viene applicato un carico σ_2 sul provino relativamente inferiore rispetto alla tensione di snervamento si ottiene una deformazione molto minore (a parità di tempo) e quindi molto più lenta. In fig. (5) è riportato l'andamento della deformazione per i due livelli di carico.

Quindi il passaggio da comportamento non lineare - viscoelastico a viscoplastico può avvenire sia per tempi brevi con carichi applicati elevati, sia per tempi molto lunghi con carichi relativamente bassi.

Prendendo a riferimento la fig. (1) è possibile ricavare da essa la velocità di deformazione, che corrisponde alla pendenza della curva stessa e quindi alla derivata della deformazione rispetto al tempo.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Equazione 57

Si riporti la velocità così ottenuta in un grafico doppio logaritmico dove in ascissa si ha il logaritmo del tempo e in ordinata il logaritmo della velocità di deformazione (fig. 6).

Si noti che per il carico σ_1 è presente un punto di minimo, mentre la curva corrispondente al livello di carico inferiore σ_2 non presenta un minimo e continua a decrescere. I punti di minimo sono corrispondenti all'accelerazione del creep che si riscontra nel cambiamento di pendenza della curva di fig. (1). In corrispondenza di questo minimo della curva si ha il tempo di cedimento a creep.

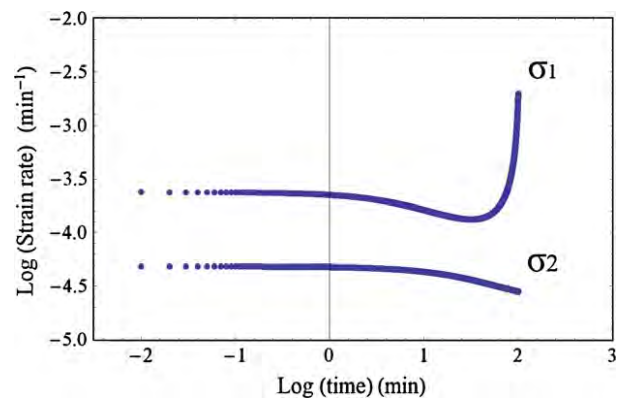


Figura 6 - presentazione schematizzata della curva velocità di deformazione-tempo a creep per due livelli di carico

Il modello qui proposto ha dimostrato sperimentalmente l'esistenza di questo punto di minimo solamente per livelli di carico elevati, cioè con un carico vicino alla tensione di snervamento.

È necessario riportare che il modello presentato è stato validato sperimentalmente per tre tipi di materiale polimerico: Nylon 66 (A190), Nylon 66 (A100) e PC Lexan 141; e uno di materiale composito: T300/VE.

MODELLO DI SNERVAMENTO DIPENDENTE DAL TEMPO

Un approccio differente per determinare la lunghezza della vita di un materiale è il modello multiassiale di cedimento/rottura per materiali viscoplastici, sviluppato da Naghdi e Murch e ripreso da Crochet. In questa teoria la deformazione globale è data dalla somma del contributo viscoelastico con quello plastico. Sia le tensioni che le deformazioni sono separate nelle loro componenti elastiche e viscoelastiche, deviatoriche e dilatatorie. La funzione di snervamento è la seguente:

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, \chi_{ij}, k_{ij}) = 0 \quad e \quad \chi_{ij} = \chi_{ij}(\varepsilon_{ij}^V - \varepsilon_{ij}^E)$$

Equazione 58

Dove:

- σ_{ij} è il tensore di stress;
- ε_{ij}^p è il tensore della deformazione plastica;
- k_{ij} è il tensore di strain hardening.

Il tensore χ_{ij} è una funzione dipendente dal tempo e dalla deformazione viscoelastica. La forma specifica di questa funzione è stata data da Crochet in forma scalare, ottenendo

$$\chi = \sqrt{(\varepsilon_{ij}^V - \varepsilon_{ij}^E)(\varepsilon_{ij}^V - \varepsilon_{ij}^E)}$$

Equazione 59

È stata sviluppata poi una equazione empirica per esprimere una funzione di cedimento monoassiale dipendente dal tempo. Questa è:

$$\sigma_y(t) = A + B e^{-C\chi}$$

Equazione 60

Dove A, B e C sono delle costanti del materiale. Assumendo una legge lineare viscoelastica data dalla legge di potenza, è possibile esprimere la deformazione a creep, con una sollecitazione applicata $\sigma(t) = \sigma_0$,

$$\varepsilon(t) = D_0 \sigma(t) + D_1 \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n \sigma_0$$

Equazione 61

Dove D_0 , D_1 e n sono costanti del materiale e τ_0 rappresenta l'unità di tempo. La differenza tra deformazione viscoelastica ed elastica in seguito ad una condizione di carico di creep è:

$$(\varepsilon_{11}^V - \varepsilon_{11}^E)^2 = \left[D_1 \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n \sigma_0 \right]^2$$

Equazione 62

E la deformazione laterale, assumendo un coefficiente di Poisson costante, è:

$$(\varepsilon_{22}^V - \varepsilon_{22}^E) = (\varepsilon_{33}^V - \varepsilon_{33}^E) = \nu^2 \left[D_1 \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n \sigma_0 \right]^2$$

Equazione 63

La funzione χ del criterio di snervamento dipendente dal tempo di Crochet per una tensione monoassiale diventa quindi

$$\chi = \sqrt{1 + 2\nu^2 \left[D_1 \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n \sigma_0 \right]}$$

Equazione 64

Sostituendo questa espressione nell'equazione (60), si può ricavare una formula che fornisca il tempo allo snervamento t_c per un materiale viscoelastico:

$$\frac{t_c}{\tau_0} = \left[\frac{1}{C} \sigma_f \frac{1}{D_1 \sqrt{1 + 2\nu^2}} \ln \left(\frac{b}{\sigma_f - a} \right) \right]^{1/n}$$

Equazione 65

Dove σ_f è il carico di rottura e si indica con il pedice f invece che y (yielding) per ricordare che si usa nell'ambito del cedimento a creep.

MECCANISMO DI DANNEGGIAMENTO CONTINUO

È un classico approccio per considerare la degradazione delle proprietà meccaniche del materiale, basato sull'idea originale di Kachanov. La tensione netta, definita come il carico impresso sulla sezione resistente rimasta, è data dall'equazione (66).

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - \omega}$$

Equazione 66

Dove $0 \leq \omega \leq 1$ è la variabile di danneggiamento. Una volta giunti a rottura non c'è più sezione resistente e quindi il valore della tensione netta tende ad infinito per $\omega \rightarrow 1$.

Kachanov ha assunto la seguente legge di crescita di danneggiamento:

$$\dot{\omega}(t) = C \left(\frac{\sigma(t)}{1 - \omega(t)} \right)^v$$

Equazione 67

Dove C e ν sono delle costanti del materiale. Questa equazione porta ad un'equazione differenziale per $\omega(t)$, assumendo $\omega(0) = 0$.

$$(1 - \omega(t))^v \dot{\omega}(t) = C \sigma^v(t) \Rightarrow 1 - (1 - \omega(t))^{1+\nu} = C(1 + \nu) \int_0^t \sigma^v(\tau) d\tau$$

Equazione 68

La legge di crescita del danno è data da:

$$\omega(t) = 1 - \left[1 - C(1 + \nu) \int_0^t \sigma^\nu(\tau) d\tau \right]^{\frac{1}{1+\nu}}.$$

Equazione 69

E la velocità di danneggiamento, in accordo con il tempo, può essere prontamente ottenuta come

$$\dot{\omega}(t) = C\sigma^\nu(t) \left[1 - C(1 + \nu) \int_0^t \sigma^\nu(\tau) d\tau \right]^{\frac{1}{1+\nu}}.$$

Equazione 70

Assumendo la rottura in corrispondenza di $\omega = 1$ si ottiene la seguente espressione

$$C(1 + \nu) \int_0^t \sigma^\nu(\tau) d\tau = 1.$$

Equazione 71

Assumendo $\sigma(t) = \sigma_0$, è possibile ottenere il tempo di cedimento a creep dalla relazione precedente:

$$t_c = \frac{1}{C(1 + \nu)\sigma_0^\nu}.$$

Equazione 72

Un'espressione simile si ottiene nel caso di condizioni CSR (constant stress rate), assumendo $\sigma(t) = Rt$,

$$t_s = \frac{1}{C\sigma_0^\nu}$$

Equazione 73

Dove $\sigma_0 = Rt_s$.

Per questo motivo si noti che le curve di tempo di vita del creep a rottura differiscono dal tempo di vita in condizioni CSR di una sola costante. Inoltre entrambe le curve possono essere sovrapposte effettuando uno shifting di un certo valore costante nella scala logaritmica del tempo.

MECCANISMO DI FRATTURA ESTESO A MATERIALI VISCOELASTICI

L'analisi del meccanismo di frattura può essere esteso al caso viscoelastico per predire le modalità di crescita di difetti o cricche in funzione del tempo. Si consideri una piastra in materiale viscoelastico avente una cricca in posizione centrale, avente un modulo a creep dato dall'equazione (74).

$$C(t) = C_0 + C_1 \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n$$

Equazione 74

Dove C_0, C_1 e n sono dei parametri caratteristici del materiale aventi valore positivo e in questo caso assunti costanti. Inoltre τ_0 è unità di tempo (che può essere pari a 1 s o 1 ora o 1 giorno, ecc.). Secondo l'autore Schapery, dopo aver fatto diverse semplificazioni, è possibile ricavare un'espressione semplice per determinare la velocità di propagazione delle cricche e il tempo necessario per arrivare a cedimento in caso di carico applicato costante. La formula ricavata è la seguente:

$$\frac{da}{dt} = [\alpha \sigma(t)]^{2(1+1/n)},$$

Equazione 75

dove α è un parametro dipendente dalla geometria e dalle proprietà del materiale, n è l'esponente del modulo di creep basato sulla legge di potenza. Assumendo costante il carico $\sigma(t) = \sigma_0$ e integrando l'espressione per la velocità di propagazione della cricca tra la lunghezza iniziale della cricca a_0 e la lunghezza finale a_f , si ottiene:

$$\int_{a_0}^{a_f} da = \int_0^{t_f/\tau_0} (\alpha \sigma_0)^{2(1+1/n)} dt \Leftrightarrow a_f - a_0 = (\alpha \sigma_0)^{2(1+1/n)} t_f,$$

Equazione 76

e infine

$$\left(\frac{t_f}{\tau_0} \right) = (\beta \sigma_0)^{-2(1+1/n)}, \beta = \frac{1}{\alpha} (a_f - a_0)^{1/2(1+1/n)},$$

Equazione 77

dove t_f è il lifetime.

Se ora si assume costante la velocità di applicazione del carico ($\sigma = Rt$), e assumendo la stessa procedura e le stesse semplificazioni proposte precedentemente, è possibile ottenere la seguente formula per il tempo di vita:

$$\int_{a_0}^{a_f} da = \int_0^{t_f} (\alpha R t)^{2(1+1/n)} dt \Leftrightarrow a_f - a_0 = (\alpha R)^{2(1+1/n)} \frac{t_f^{2(1+1/n)+1}}{2(1+1/n)+1},$$

Equazione 78

e infine

$$\left(\frac{t_f}{\tau_0} \right)^{2(1+1/n)+1} = [2(1+1/n)+1] (\beta R \tau_0)^{-2(1+1/n)}$$

Equazione 79

Oppure

$$\left(\frac{t_f}{\tau_0}\right) = [2(1 + 1/n) + 1](\beta\sigma_0)^{-2(1+1/n)}$$

Equazione 80

Essendo $\sigma_0 = R t_f$.

PROVE DI TRAZIONE PIBITER® HI A1301 - PROVINI RITAGLIATI

Per poter determinare il comportamento a creep e ricavarne una curva utile è necessario sapere entro quale livello di carico è necessario rimanere affinché non si abbia un cedimento statico. Per questo motivo, se non si dovessero conoscere i dati del materiale, prima di eseguire delle prove a creep è necessario eseguire delle prove di trazione per individuare la tensione di snervamento e la tensione di rottura. Per l'obiettivo del lavoro di tesi il valore più rilevante è quello della tensione di snervamento. Infatti si può supporre che nel momento in cui si raggiunge lo snervamento del materiale il componente si può ritenere compromesso. Le prime prove sono effettuate su provini ricavati da dei componenti finiti: cioè dei feltri di selle da ciclismo. Queste selle sono in lega di PBT e PC: Il materiale usato è denominato PIBITER® HI A1301 ed è prodotto dall'azienda So.F.Ter. - P.Group. Successivamente si eseguiranno dei test di trazione anche su dei provini ottenuti per stampaggio ad iniezione con lo scopo di confrontare i risultati ottenuti.

Per ottenere questi dati è necessario eseguire una prova di trazione classica basandosi sulle normative ISO 527-1 e ISO 527-2. Si proceda nel seguente modo:

1. Definire tutti i parametri inerenti ai test da eseguire.
2. Analizzare la normativa per determinare le modalità operative.
3. Analizzare il componente di partenza (feltro della sella) per individuare le aree utili per ricavare i provini.
4. Determinare la dimensione più adeguata per i provini in base alle dimensioni dell'area utile dei feltri.
5. Ricavare manualmente i provini dai feltri.
6. Determinare le caratteristiche della macchina e l'apparato sperimentale in generale.
7. Determinare un programma prove dopo aver conosciuto le caratteristiche della macchina per eseguire i test.
8. Eseguire le prove annotando i dati relativi alle dimensioni di ogni provino e commentando l'andamento delle prove.
9. Eseguire un'analisi statistica per ricavare dei valori significativi delle proprietà dei materiali, presentando i risultati e le conclusioni.

1. PARAMETRI E DEFINIZIONI

Una prova di trazione consiste nell'estensione lungo l'asse longitudinale maggiore di un provino alla velocità costante finché il provino giunge a rottura o finché viene raggiunto un certo livello di tensione o deformazione. Durante la procedura vengono misurati il carico e l'allungamento.

Il parametro che più interessa in questo caso è il valore della tensione di snervamento. Superato questo valore infatti il componente mostra una deformazione plastica macroscopica che compromette la stabilità strutturale del pezzo. La normativa la definisce nel seguente modo:

Tensione di snervamento: σ_s , la tensione a cui il provino mostra un allungamento senza che aumenti anche la tensione. Espressa in megaPascal.

Un altro parametro rappresentativo del materiale che può essere ricavato da questa tipologia di prova è la tensione di rottura.

Tensione di rottura: σ_R , la tensione a cui il provino si rompe. Espressa in megaPascal.

Altri parametri importanti sono quelli relativi alla deformazione del provino:

Deformazione a snervamento: ε_s , esprime l'aumento della lunghezza del tratto utile rapportato alla lunghezza iniziale per il livello di carico corrispondente a quello di snervamento. È espresso in forma adimensionale o in percentuale.

Deformazione a rottura: ε_R , esprime l'aumento della lunghezza del tratto utile del provino rapportato alla lunghezza iniziale per il livello di carico corrispondente a quello di rottura. È in forma adimensionale o espresso in percentuale e si considera quando è stato superato lo snervamento.

Se non c'è la possibilità di misurare direttamente la lunghezza e l'allungamento del tratto utile, la normativa suggerisce di fare riferimento alla distanza tra le morse del sistema di serraggio del provino. Per questo motivo si riportano le seguenti definizioni.

Deformazione a snervamento nominale: ε_{tS} , esprime l'aumento della distanza tra le morse rapportato alla distanza iniziale per il livello di carico corrispondente a quello di snervamento. È in forma adimensionale o espresso in percentuale.

Deformazione a rottura nominale: ε_{tR} , esprime l'aumento della distanza tra le morse rapportato alla distanza iniziale per il livello di carico corrispondente a quello di rottura. È in forma adimensionale o espresso in percentuale e si considera quando è stato superato lo snervamento.

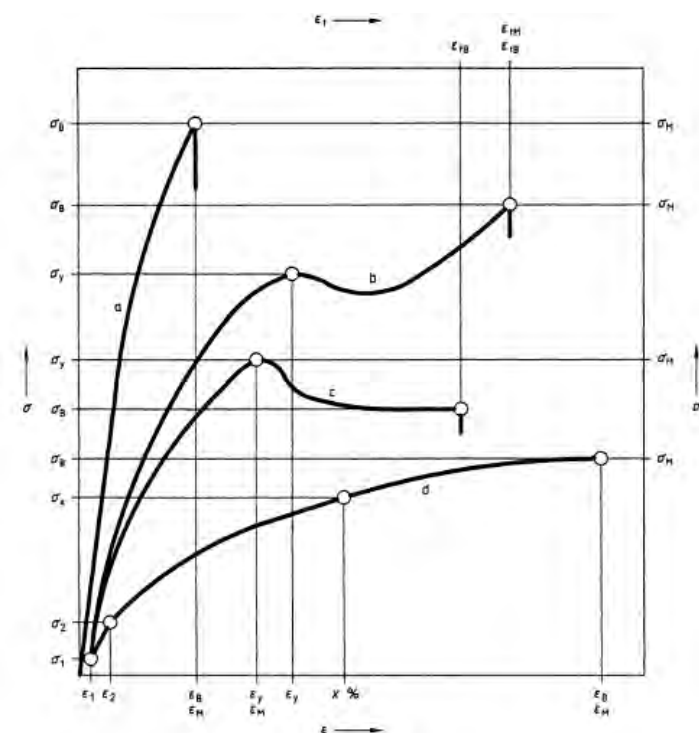


Figura 1 - esempi di curve da test di trazione su provini in materiale polimerico

Un parametro importantissimo da impostare per eseguire il test di trazione per i materiali polimerici è la velocità del test. Infatti al variare della velocità varia anche il comportamento del materiale. Una velocità eccessivamente alta porta ad una risposta fragile, mentre una velocità troppo bassa permette al materiale di manifestare il creep, portando a valori non veritieri per una determinazione statica del materiale. Il parametro è quindi così definito:

Velocità del test: v , velocità di allontanamento delle morse durante il test. Espressa in millimetri al minuto.

Si vedano nella figura (1) le possibili curve ottenibili con un test di trazione. Nella figura sono presenti anche i parametri citati precedentemente: si noti che per indicare lo snervamento si utilizza la lettera y (yielding) e per la rottura la lettera b (breaking).

Inoltre un parametro caratteristico del materiale è il modulo di elasticità, o modulo di Young, che viene definito nel modo seguente:

Modulo di Young: E_t , esprime il rapporto tra la differenza di tensioni σ_2 e σ_1 e la differenza delle corrispondenti deformazioni $\varepsilon_2 = 0,0025$ e $\varepsilon_1 = 0,0005$. Si esprime in megaPascal (MPa).

2. MODALITÀ OPERATIVE E ACCORGIMENTI PROPOSTI DA NORMATIVA

La normativa propone le modalità con cui eseguire i test per determinare le caratteristiche tensili di un materiale polimerico. Per far fronte a diverse esigenze inoltre vengono proposte diverse dimensioni e geometrie per i provini.

Il metodo è adeguato per le seguenti tipologie di materiale:

- Polimeri termoplastici rigidi e semirigidi ottenuti attraverso stampaggio ad iniezione o per estrusione, includendo lamine e film sottili.
- Polimeri termoindurenti ottenuti da stampaggio ad iniezione, includendo laminati.
- Polimeri termoplastici o termoindurenti rinforzati con fibre.

Inoltre la normativa sostiene che questa metodologia può essere applicata sia a provini ottenuti direttamente da un processo di stampaggio ad iniezione sia a provini ottenuti manualmente da un pezzo finito (da stampaggio a iniezione, da laminati, da estrusi) attraverso opportune lavorazioni meccaniche.

A parità di materiale ci sono diversi fattori che possono portare a risultati non compatibili. I risultati possono variare nel caso in cui vengano condotti dei test:

- su provini di dimensioni differenti;
- su provini preparati in diverse condizioni;
- a diverse velocità;
- a differenti livelli di temperatura e umidità.

3. ANALISI FELTRO - INDIVIDUAZIONE AREE UTILI

Secondo la norma, qualora si ricavino i provini direttamente da un pezzo finito, è necessario individuare delle aree in cui le superfici siano sufficientemente parallele tra loro e il più possibile planari. Inoltre non devono essere presenti delle torsioni sul componente, non devono esserci delle graffiature, intagli, protuberanze o bave. Se di dovessero notare tali anomalie ad occhio nudo

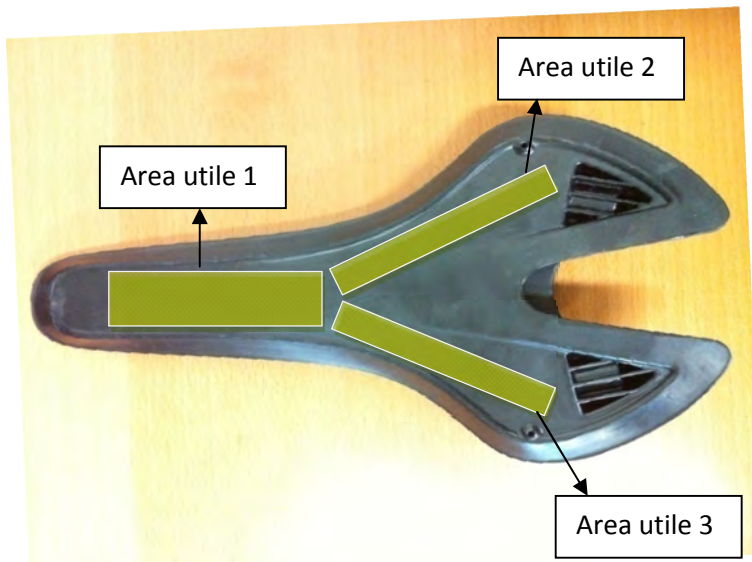


Figura 2 - Individuazione delle aree utili per ricavare i provini dal componente

In figura (2) si evidenzino le aree utili.

Le misure delle aree utili massime sono:

- Area utile 1 = $80 \times 20 \text{ mm}$
- Area utile 2 = Area utile 3 = $90 \times 15 \text{ mm}$

È necessario basarsi su questi dati per determinare le dimensioni dei provini ricavabili.

4. SCELTA PROVINI

Come è già stato detto per scegliere le dimensioni dei provini è necessario fare riferimento alla norma ISO. La normativa suggerirebbe l'utilizzo di provini a forma di manubrio della tipologia 1A o 1B, così come rappresentati nella figura (3).

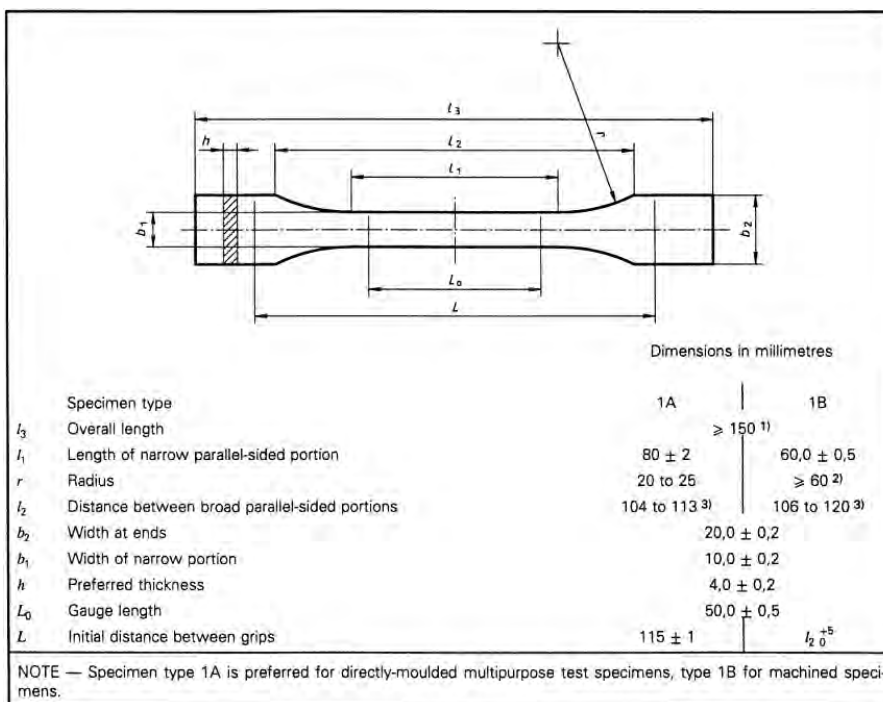


Figura 32 - tipologia provino 1A e 1B secondo normativa ISO 527-2

Purtroppo però con le dimensioni di area utile a disposizione non è possibile ricavare provini di queste dimensioni. La normativa viene incontro a queste problematiche proponendo dei provini di dimensioni ridotte denominati 1BA, 1BB, 5A o 5B. Per questo caso è adeguato fare riferimento al modello di provino a forma di manubrio del tipo 1AB. Si faccia riferimento alla figura (4) come riferimento per determinare poi le dimensioni effettive del provino.

La scelta di provino della tipologia 1BA sembra la più adeguata. Basandosi su quel modello e seguendo i suggerimenti della norma si desidera ottenere dei provini aventi le seguenti dimensioni:

- $l_3 = 80mm$
- $l_1 = 30 \pm 0,5mm$
- $r = 50mm$
- $l_2 = 60mm$
- $b_2 = 10 \pm 0,5mm$
- $b_1 = 5 \pm 0,5mm$
- $h = 2,5 \pm 0,5mm$
- $L = 62mm$

Si consideri che l'incertezza sullo spessore del provino è data dalla variabilità dello spessore lungo il pezzo: essendo un componente finito lo spessore non può essere gestito in maniera ottimale.

La normativa inoltre suggerisce che per ottenere dei valori sufficientemente affidabili dei parametri del materiale è necessario eseguire la stessa prova su almeno 5 provini.

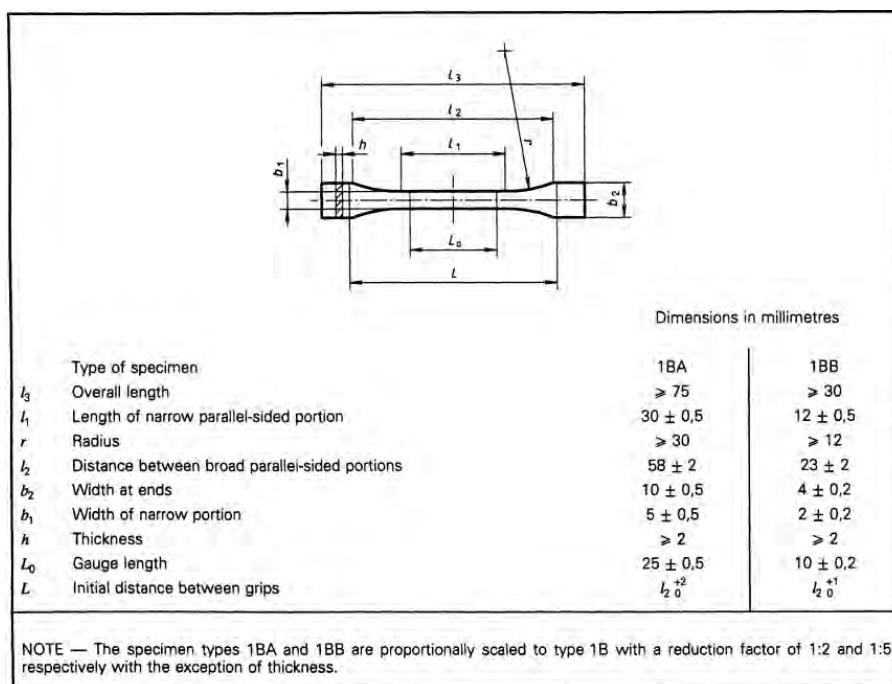


Figura 43 - tipologia provino 1BA e 1BB secondo normativa ISO 527-2

Considerando che le selle fornite sono 13 (8 solo feltri e 5 feltro+forchetta), posso impiegare 3 selle dalle quali ricavarli in totale 9 provini per eseguire le prove di trazione.

5. REALIZZAZIONE DEI PROVINI

Per ricavare i provini è stato necessario innanzitutto disegnare con un software CAD (Solidworks) la geometria degli stessi. Successivamente ne sono stati stampati 9 in scala 1:1 su uno stesso foglio. Questi provini sono stati poi tagliati per poter essere successivamente incollati sui feltri.

Una volta stampati e ritagliati è stata verificata l'accuratezza dimensionale in quanto un problema di taratura della stampante o un errore in fase di ritaglio, avrebbe potuto generare dei campioni di riferimento non delle dimensioni volute. Per verificare le dimensioni è stato utilizzato un calibro centesimale.

Prima di incollare i campioni sulle selle è stato necessario rimuovere le estremità dei feltri così da rendere più semplice l'incollaggio, la manipolazione e le lavorazioni meccaniche sul componente.

La sequenza di operazioni è stata la seguente:

- Fissata la punta del feltro alla morsa è stata rimossa quest'ultima utilizzando una sega dentata. Figura (5a).
- Successivamente è stata ancorato il feltro alla morsa in prossimità dell'estremità di un'ala, così da procedere alla rimozione parziale della prima ala. Figura (5b).
- Dopodiché analogamente al punto precedente è stata tagliata parte dell'altra ala. Figura (5c).
- In questo modo è stato rimosso il ponte inferiore che collegava le ali e irrigidiva la struttura del feltro. In questo modo il pezzo rimanente risulta più facile da manipolare e lavorare nel dettaglio.
- A lavorazione effettuata ha portato al risultato visibile in figura (5d).



Figura 4 - prima sequenza di operazioni per ricavare i provini dal feltro (a, b, c, d)

A questo punto è necessario ricavare i provini dal pezzo ritagliato. Per eseguire questa operazione è stato necessario innanzitutto identificare precisamente le sagome delle aree dei provini da ricavare:

- è stato disegnato in CAD il provino ed è stato stampato 9 volte sempre in scala 1:1.
- Dopo aver verificato le dimensioni della sagoma stampata usufruendo di un calibro centesimale, sono state ritagliate le sagome.
- Successivamente queste sagome sono state applicate con del nastro adesivo in prossimità delle aree utili del pezzo di feltro ricavato dalle precedenti lavorazioni, come si può vedere dalla figura (6).

- A questo punto con l'ausilio di un taglierino industriale è stata tracciata la sagoma dei provini sulla superficie del pezzo: questa operazione è necessaria per poter avere una guida da seguire nel momento in cui si andrà a tagliare i provini dal pezzo.
- Una volta tracciato il contorno dei provini, si rimuovano le sagome precedentemente applicate.



Figura 5 - Applicazione sagome di provini mediante nastro adesivo

A questo punto si ha il componente con la superficie intagliata. Ora è possibile procedere con le operazioni per tagliare il provino:

- Si vincoli nuovamente il componente alla morsa;
- Con la sega utilizzata precedentemente si ottengano tre pezzi da quello di partenza, così da isolare le tre aree utili: in questo modo si avranno dei pezzi più piccoli da lavorare e una volta fissati risulteranno più rigidi rispetto al componente intero. In questo modo si otterrà una lavorazione più precisa.
- Si ancori alla morsa il primo pezzo del componente e da questo, operando con un seghetto di precisione, si ricavi il primo provino tagliando il componente lungo il perimetro ottenuto precedentemente sulla superficie. Per eseguire una lavorazione il più possibile precisa è stato necessario l'ausilio di una lampada che illuminasse la superficie da tagliare.
- Si compiano le stesse operazioni per gli altri due provini.

Ora abbiamo ricavato i primi 3 provini dal primo feltro. In maniera del tutto analoga si ricavano gli altri 6 provini dai rimanenti 2 feltri, così da ottenere un numero sufficiente di campioni per effettuare delle prove di trazione che diano risultati significativi. Quindi abbiamo così 9 provini a forma di osso pronti per essere testati.

Bisogna fare però delle osservazioni. La forma dei provini alla fine non risulta essere molto regolare; questo fatto è dovuto a diversi fattori che hanno influenzato negativamente la ripetibilità del metodo appena descritto. Innanzitutto è probabile che l'inesperienza dell'operatore non abbia permesso di eseguire delle lavorazioni di taglio adeguatamente precise. In secondo luogo il risultato può essere stato

influenzato dalla scarsa precisione degli strumenti utilizzati. In particolare si noti che la fase più problematica e che ha prodotto il maggior numero di differenze tra un provino e l'altro è quella relativa al taglio con seghetto. Per quanto riguarda invece le fasi precedenti il perimetro dei provini risultava essere segnato con più precisione.

La maggior parte degli errori rilevabili sono relativi alla sezione del tratto utile. La sezione dovrebbe essere costante lungo tutta la lunghezza del tratto utile, in realtà con le misurazioni effettuate dopo le

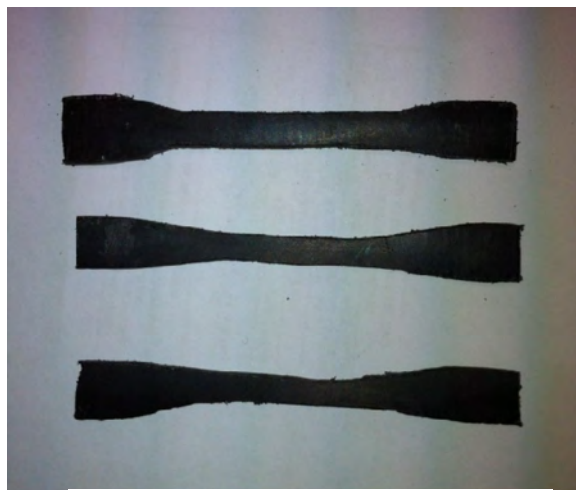


Figura 6 - Primi tre provini ricavati

lavorazioni si noti che le dimensioni non sono costanti e c'è sempre un punto in cui la sezione risulta essere minima. Si prevede che la rottura giungerà proprio in prossimità di questa sezione.

6. APPARATO SPERIMENTALE

L'apparato sperimentale utilizzato per eseguire le prove di trazione è costituito da una macchina di trazione costruita da STEP ENGINEERING, una centralina deputata alla raccolta dati e che mette in comunicazione la macchina con un computer che ha il compito di elaborare i dati.

La macchina utilizzata per eseguire i test a trazione è una macchina UTM (Universal Testing Machine) in grado di effettuare sia prove di trazione sia prove di compressione oltre a diversi test standard. Questo modello è stato concepito e sviluppato internamente alla Step Engineering ed è caratterizzata da un controllo elettro-meccanico. Gli elementi che costituiscono questa tipologia di macchine sono i seguenti:

- Struttura portante: in questo caso sono presenti due elementi verticali che si sviluppano nella direzione di applicazione del carico e da un elemento trasversale fisso. Hanno il compito di irrigidire il più possibile la struttura. Inoltre i due elementi verticali hanno il compito di fare da guida all'elemento che trasla nella direzione del carico.
- Traversa mobile: è l'elemento disposto trasversalmente rispetto alla direzione di carico e ha il compito di imprimere lo spostamento ad un'estremità del provino sfruttando un meccanismo elettromeccanico o servo-idraulico.
- Cella di carico: trasduttore di forza che ha il compito di percepire il carico applicato al provino e di trasmetterlo meccanicamente ad un sensore.
- Elementi di serraggio: hanno il compito di ancorare saldamente entrambe le estremità del provino sia alla traversa mobile sia a quella fissa, in modo tale che non ci siano scorrimenti del provino rispetto alla struttura.

Sarebbe stato necessario l'impiego di altri due elementi per completare la struttura della macchina UTM. Infatti per misurare la deformazione in questo caso si fa riferimento allo spostamento relativo delle due morse deputate al serraggio dei provini. In realtà sarebbe stato meglio utilizzare un estensometro, così da poter determinare anche il modulo di Young del materiale. Un altro elemento molto utile per poter ridurre i tempi di test sarebbe stata la cella climatica. Con questa si potrebbe regolare la temperatura a cui viene eseguita ogni prova ottenendo una risposta a creep molto più rapida.

La macchina utilizzata inoltre è comandata da un sistema elettromeccanico, il quale governa il moto della traversa mobile attraverso la rotazione di una vite. Il motore elettrico permette di impostare spostamenti di 1/9600-esimo di millimetro. Il carico massimo supportato dalla macchina è di 5 tonnellate.

Si proponga lo schema dell'apparato sperimentale nella figura (8).

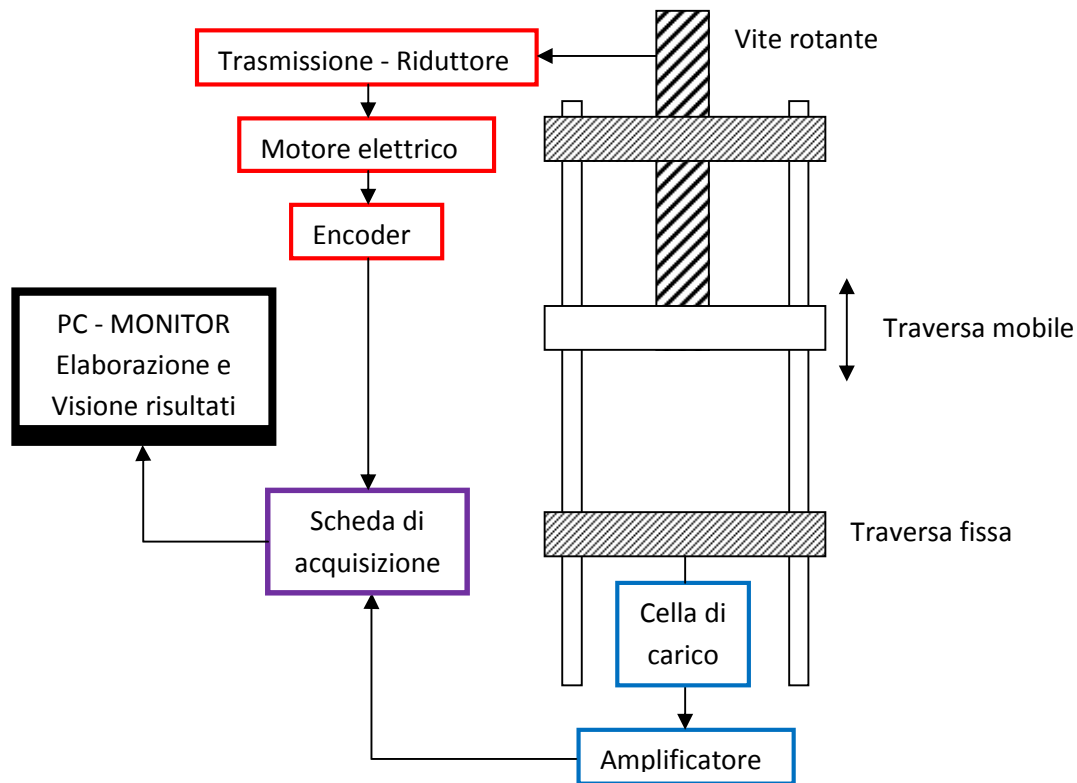


Figura 7 - schema dell'apparato sperimentale

L'elaborazione dei dati viene svolta da un eseguibile in LabView sviluppato dall'ing. Zonato Alberto di Step Engineering. Questo software ha il compito di gestire la posizione della staffa mobile e di tradurre il segnale proveniente dalla cella di carico in forza/tensione. Grazie a questo programma è possibile gestire la prova di trazione impostando la velocità di allungamento del provino e tarare i valori di forza e allungamento. L'interfaccia di questo software è visibile in figura (9).

Come si può notare è possibile switchare le scale del diagramma da forza/spostamento a tensione/deformazione. Per fare questo è prima necessario fornire come dati di input sia l'area della sezione del provino sia la lunghezza del tratto utile del provino.

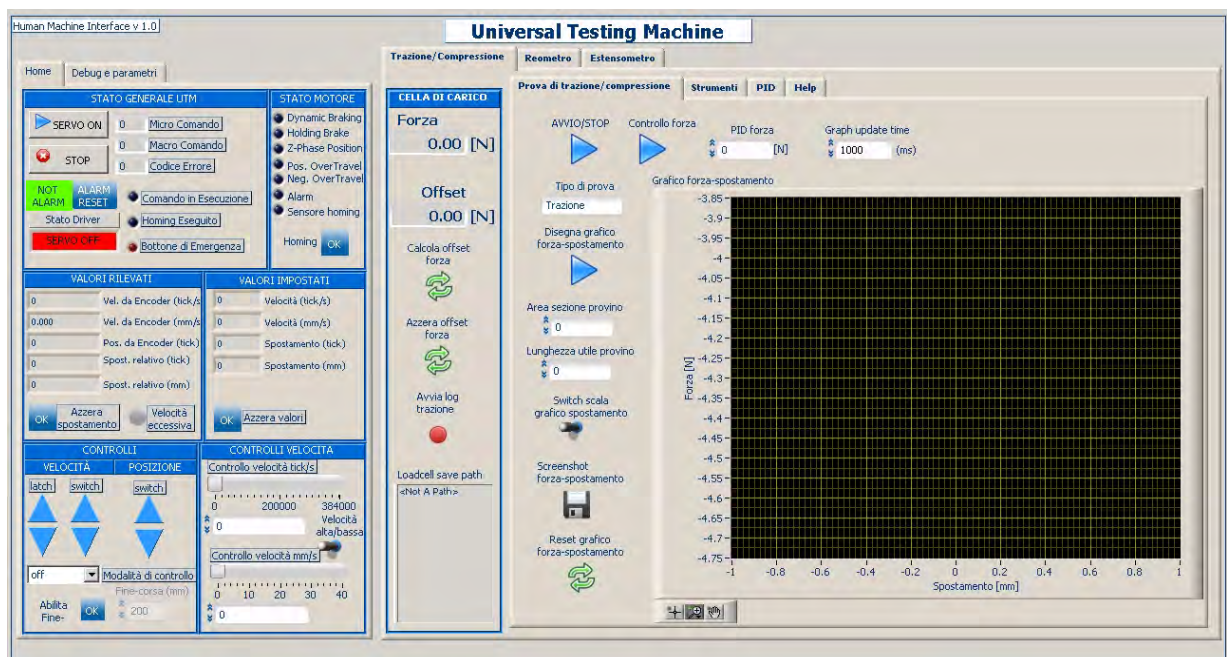


Figura 9 - Interfaccia grafica del software UTM per la gestione del test di trazione

7. PROGRAMMA PROVE

Prima di iniziare a fare i test di trazione è bene preparare una scaletta di quelle che saranno le operazioni da eseguire passo passo. La sequenza di operazioni è identificata come programma prove e ha lo scopo di conferire ripetibilità alle operazioni e un rigore scientifico ai risultati. Considerando il numero di provini disponibili e le caratteristiche dell'apparato sperimentale, è stato concepito il seguente programma prove:

- I. Una volta avviata la macchina UTM, acceso il computer e avviato il software LabView UTM regolo la distanza delle morse in modo tale che possa essere inserito e fissato agevolmente il provino.
- II. Si misurino le dimensioni del provino ricavando la larghezza e lo spessore in 3 punti differenti (alto, centro, basso) del tratto utile, come si può vedere dalla figura (9a).
- III. Innanzitutto è necessario settare il "calcolo Offset forza" a macchina scarica, così da tarare la macchina nelle condizioni iniziali: senza nessun carico applicato il valore della forza deve essere in un intorno di zero.
- IV. Posiziono il provino e con l'ausilio di una chiave inglese e di una brugola stringo leggermente le morse, così da fissarne la posizione.
- V. Avvio il "controllo forza" del software, che ha il compito di assicurarsi che in fase di serraggio delle morse il carico percepito dalla cella di carico sia il più possibile prossimo a zero. Per garantire questa condizione il software genera degli spostamenti infinitesimi della vite.
- VI. A questo punto è possibile passare al serraggio completo del provino sempre utilizzando la chiave inglese e la brugola, vedi figura (9b). Inoltre per fissare le morse rispetto al grado di libertà di rotazione è necessario stringere opportune viti poste sulle basi delle morse con un'altra chiave inglese.
- VII. Una volta ancorato il provino è possibile rimuovere il "controllo forza", verificando che il valore della forza sia prossimo allo zero.
- VIII. Si imposti nel software la velocità di allontanamento delle morse, impostando il valore del "controllo velocità mm/s" desiderato.
- IX. Si azzeri la posizione, attraverso il comando "azzerà spostamento", così da avere come riferimento il valore 0 all'inizio del test.
- X. Si imposti la frequenza di acquisizione dati attraverso il valore "graph update time", che indica il tempo che intercorre tra l'acquisizione di un dato e quello successivo.
- XI. È ora possibile avviare la prova di trazione.
- XII. Si monitori l'andamento della prova e si arresti il test nel momento in cui si giunge alla rottura del provino.
- XIII. Salvare i dati della prova ed elaborarli opportunamente con un altro programma dedicato proprio all'analisi di prove di trazione, che permette di estrapolare i dati in formato .xls. Il software si chiama trazione.exe.
- XIV. Si ripeta la procedura per tutti e 9 i provini.

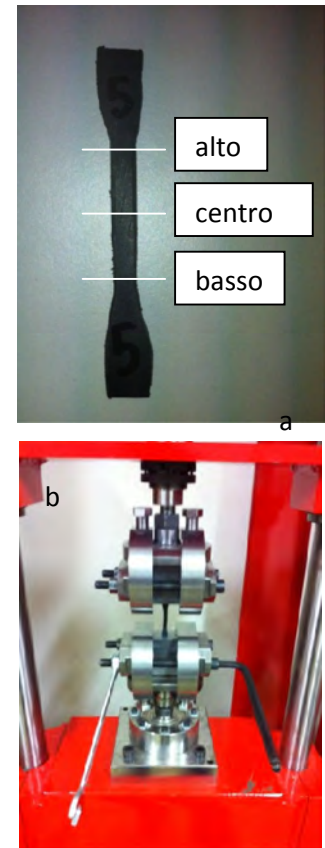


Figura 8 - Identificazione sezioni misurabili (a); serraggio provino (b).

Nel programma prove proposto si consideri che tutte le voci virgolettate sono riferite a quelle dell'interfaccia del software UTM rappresentata in figura (9).

8. ESECUZIONE DELLE PROVE

Si eseguano le prove di trazione sui nove provini in PBT/PC, riportando di seguito le dimensioni rilevate e i risultati ottenuti per ogni test seguendo la flow chart proposta nel programma prove.

Provino PBT/PC - 1

Le dimensioni relative al provino sono riportate nella tabella (1):

DIMENSIONE	VALORE	u. m.
tratto utile=	30	mm
spessore1=	3.05	mm
spessore2=	2.95	mm
spessore3=	2.9	mm
larghezza 1 (alto)=	5.05	mm
larghezza2 (metà)=	5	mm
larghezza3 (basso)=	4.95	mm
sezione1 =	15.4025	mm ²
sezione2 =	14.75	mm ²
sezione3 =	14.355	mm ²

Tabella 1 - Dimensioni del primo provino in PBT/PC

Si evidenzi la sezione minima, che è quella da prendere come riferimento per determinare la tensione applicata al componente. Infatti la cella di carico rileva la forza e per conoscere la tensione massima sul provino è necessario rapportarla alla sezione minima.

Si faccia attenzione in questo particolare caso alla presenza di un leggero intaglio in prossimità della sezione minima ottenuto erroneamente durante le lavorazioni per ricavare il provino. La sua presenza potrebbe portare ad un cedimento molto rapido e senza propagazione del collo di strizione lungo tutto il tratto utile del provino.

La prova è stata eseguita impostando i valori della tabella (1):

	VALORE	U. M.
Velocità di spostamento	5	mm/min
	0.0833	mm/s
Frequenza di campionamento	1/500	1/ms
	2	Hz

Tabella 2 - valori di input della prova sul primo provino in PBT/PC

Una volta eseguita la prova sono stati elaborati i dati raccolti dalla scheda di acquisizione mediante il software Trazione.exe.

Si veda ora come opera e quali sono le funzioni del software appena citato. Come si può vedere dalla figura (11), è necessario innanzitutto caricare il file di dati generato precedentemente dal software UTM (e nominato "trazione ANNO-MESE-GIORNO_ORE-MINUTI-SECONDI.tdms"), inserendo i valori dell'area utile e della lunghezza utile. Ovviamente è doveroso inserire il valore dell'area di sezione minima, dato che la sezione è variabile, e la lunghezza del tratto utile per poter ottenere il grafico tensione/deformazione.

Una volta inserito il file e gli input necessari è possibile cliccare "ANALIZZA" per ottenere il grafico.

A questo punto si ha a disposizione un grafico visibile in figura (12) con un numero molto elevato di dati, la maggior parte dei quali sono inutili. Per questo motivo, come si può eseguire un'interpolazione dei dati e ottenere un grafico equivalente con un numero molto minore di punti. Il numero di punti può essere scelto dall'utente impostando il valore di "nodi interpolanti". Prima di eseguire questa operazione si imposti il filtro "Average" ponendo un "average time" pari a 10, in modo tale da ridurre un'eccessiva variabilità della curva dovuta ad effetti di rumore o di disturbo. Una volta eseguita questa operazione si salvi il grafico così ottenuto in formato Excel cliccando sull'apposito pulsante "esporta nodi interpolanti" visibile in figura (13).

Un'altra importante funzione offerta dal programma è quella di determinare il modulo di Young. Per farlo interpola un certo numero di nodi consecutivi (in questo caso 7) nel tratto elastico della curva. In questo modo si ricava un modulo di elasticità secante la curva di trazione, così come si può vedere in figura (14).

In questo test purtroppo non è possibile ricavare in maniera adeguata il modulo di Young perché sarebbe necessario monitorare l'allungamento del tratto utile e non l'allontanamento delle due morse, in quanto quest'ultima misura include altri fenomeni di deformazione oltre a quelli derivanti dal fenomeno di trazione. Per questo motivo si tralasci la determinazione del modulo di Young in quanto non darebbe un valore ripetibile e significativo. Se ne monitori comunque l'andamento nelle diverse prove per poter poi giustificare l'affermazione appena fatta.

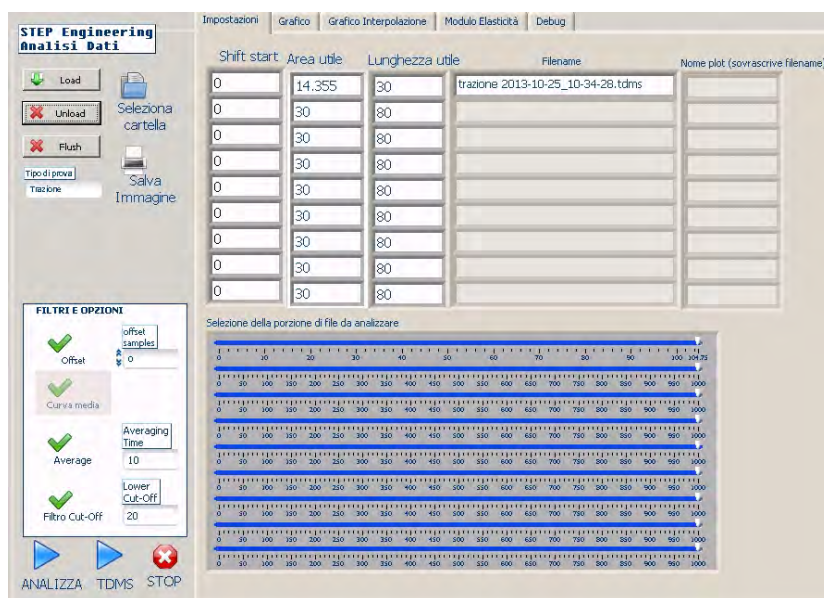


Figura 9 - primo step di utilizzo del software Trazione.exe

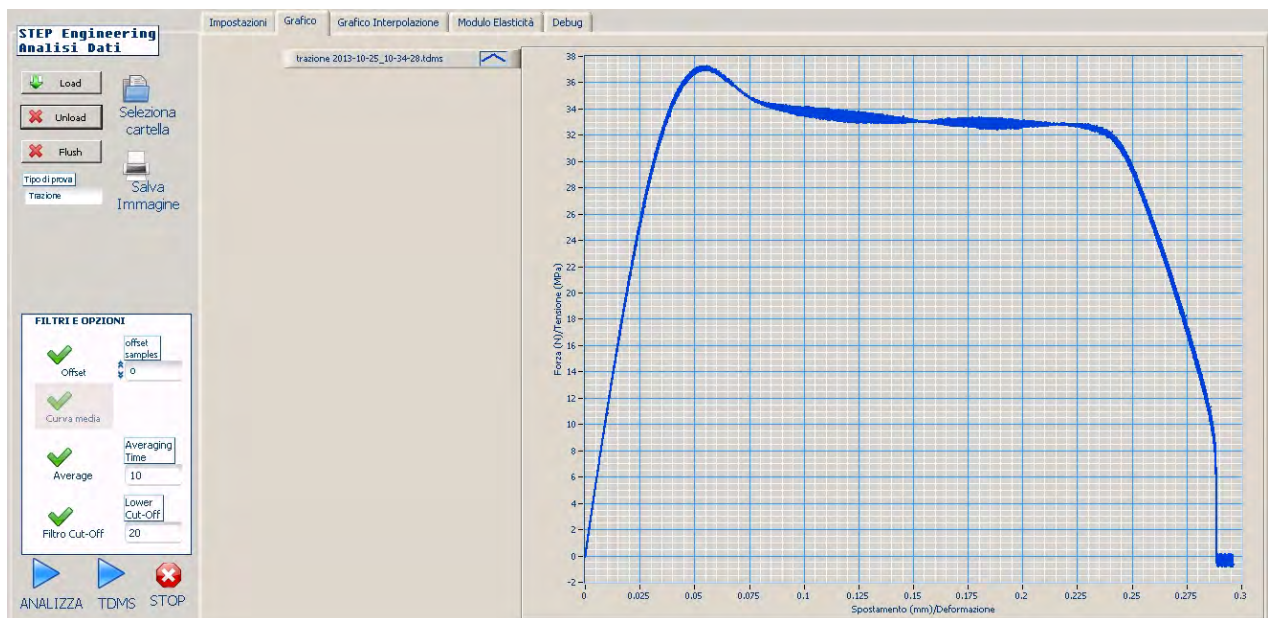


Figura 12 - secondo step: grafico sforzo-deformazione

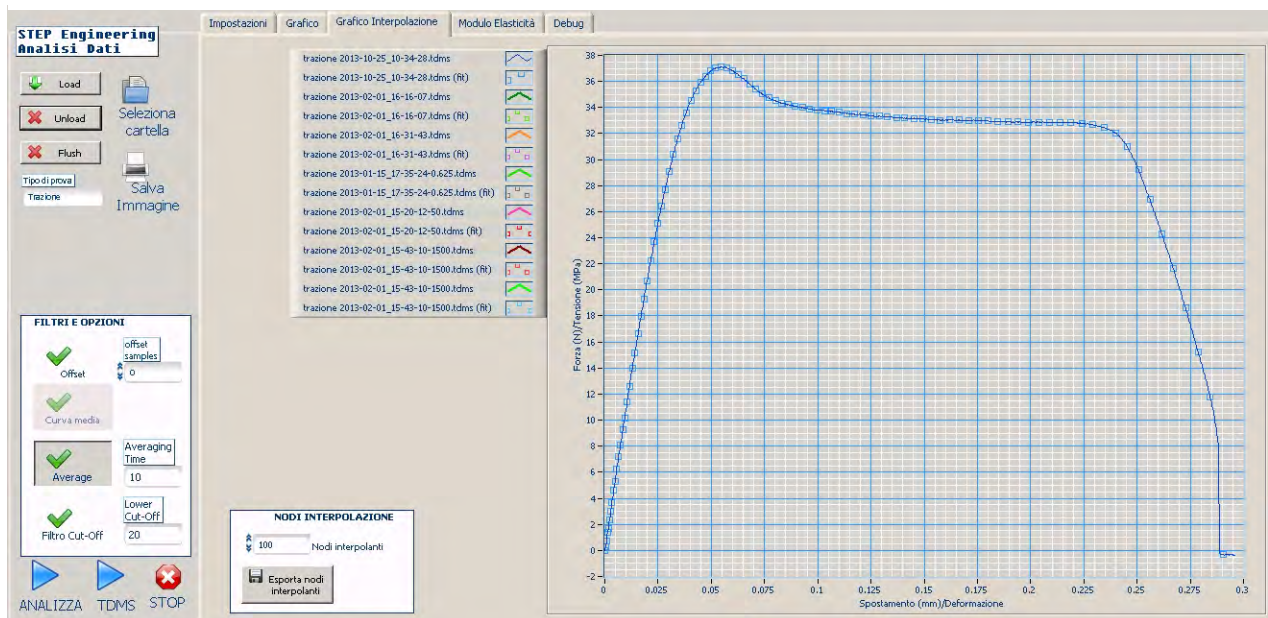


Figura 10 - terzo step: grafico sforzo-deformazione interpolato

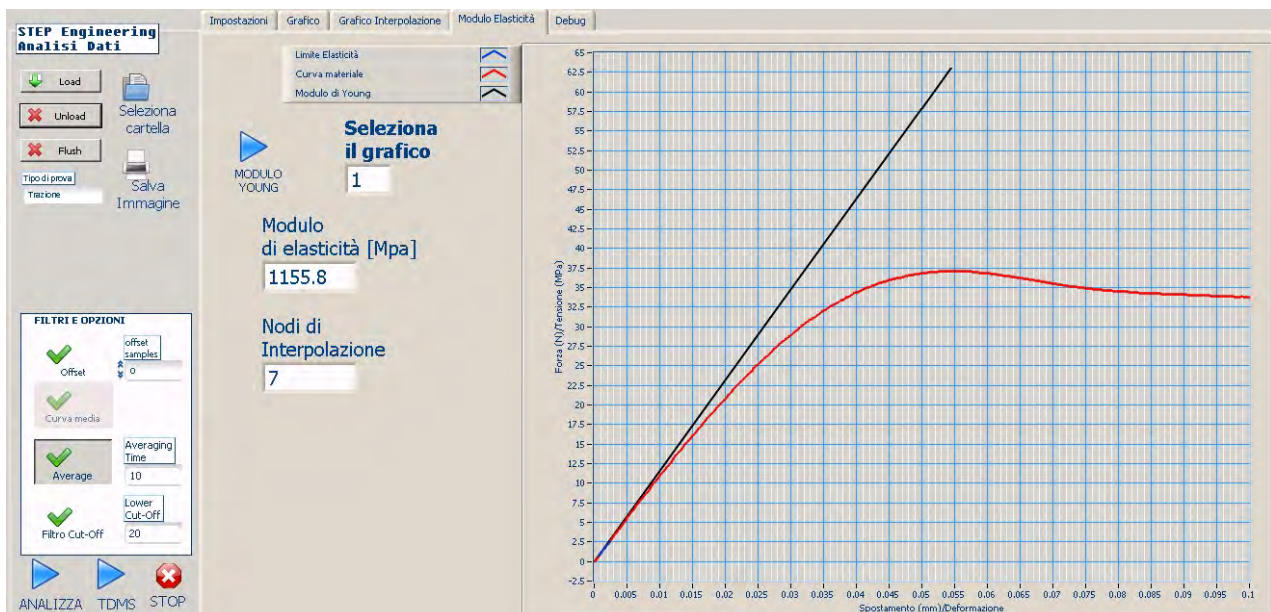


Figura 11 - quarto step: calcolo del modulo di Young

Si riporti in figura (15) la curva sforzo-deformazione ottenuta per il primo provino in PBT, ottenuta dall'interpolazione del grafico del test per 100 punti.

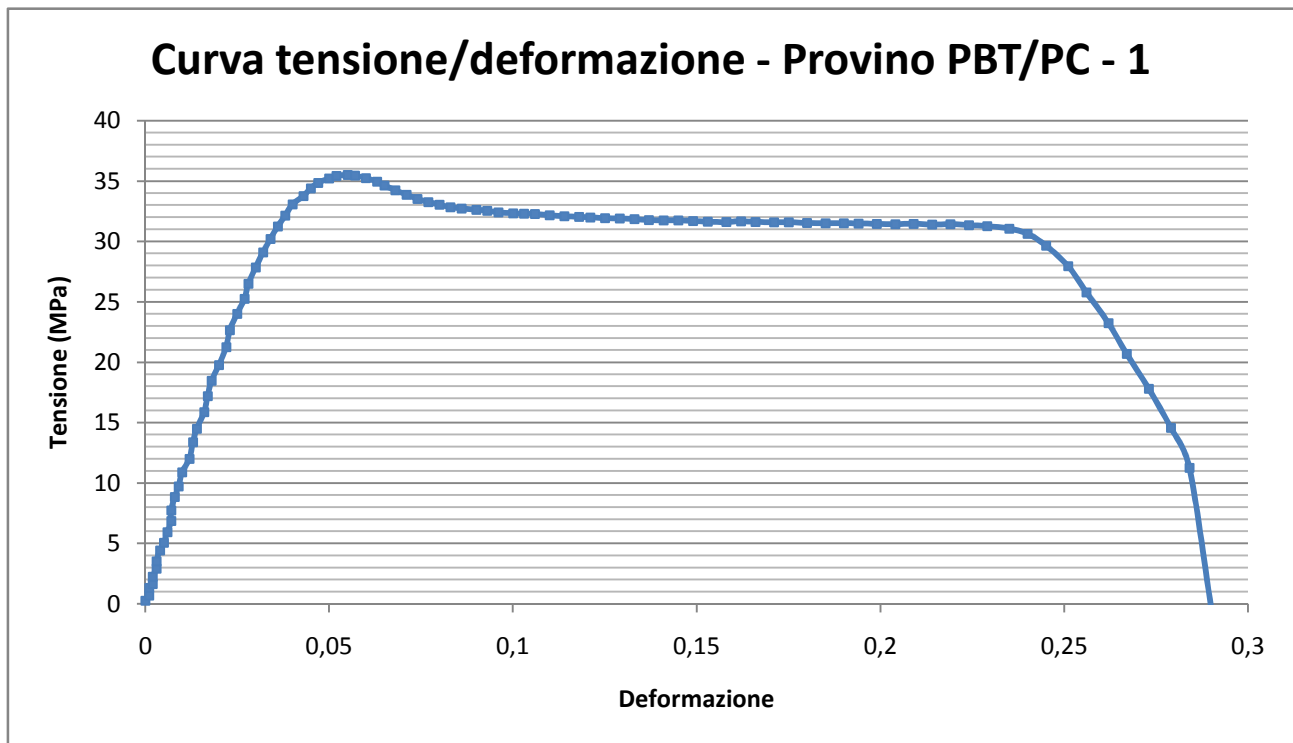


Figura 12 - Curva tensione-deformazione del primo provino in PBT/PC a 100 punti d'interpolazione

Ricordando le definizioni fornite dalla norma è possibile individuare dai dati del test i valori di tensione di snervamento, di deformazione a snervamento, di tensione di rottura, di deformazione a rottura e del modulo di elasticità. Si riportino in tabella (2) i valori dei parametri sopracitati. Inoltre è possibile determinare la durata del test a posteriori conoscendo l'allungamento percentuale e la velocità di test.

Infatti a rottura si giunge ad una deformazione massima

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta L_{finale}}{L_0}$$

Eseguendo il test alla velocità

$$v = \frac{Spazio}{Tempo} = \frac{\Delta L_{finale}}{tempo\ test}$$

Determinando l'allungamento ΔL_{finale} dalla prima equazione, inserendolo nella seconda, da quest'ultima posso riavere la durata della prova con la seguente equazione:

$$tempo\ test = t = \frac{\Delta L_{finale}}{v} = \frac{\varepsilon_{max} \cdot L_0}{v}$$

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Tensione di snervamento=	35.514	MPa
Deformazione a snervamento=	0.055	
Tensione di rottura=	31.436	MPa
Deformazione a rottura=	0.219	
Modulo di elasticità=	1155.9	MPa
Durata della prova=	104.4	secondi

Tabella 3 - parametri rappresentativi del materiale PBT/PC e durata test (primo provino)

Si noti che dopo lo snervamento la curva decresce e poco prima della rottura assume un comportamento asintotico in cui i valori di tensione oscillano intorno ad un valore che può essere considerato come la tensione di rottura. Per determinare la tensione di rottura si consideri il valore della serie di dati che deve soddisfare le seguenti due condizioni: deve essere maggiore del precedente e deve essere seguito da una serie decrescente di valori fino alla rottura del pezzo.

OSSERVAZIONI CRITICHE:

- si noti che la geometria del tratto utile non era per nulla regolare, in particolare era presente un intaglio lungo esso che potrebbe aver falsato la prova dando risultati non veritieri riguardo la rottura (tensione e deformazione). Mentre per quanto riguarda lo snervamento i risultati potrebbero essere corretti entro un errore ragionevole.

PROVINO PBT/PC - 2

Si proceda seguendo la stessa metodologia presentata per il primo provino.

Le dimensioni del provino sono riportate in tabella (4).

DIMENSIONE	VALORE	u. m.
tratto utile=	30	mm
spessore1=	2.55	mm
spessore2=	2.6	mm
spessore3=	2.5	mm
larghezza 1 (alto)=	5.05	mm
larghezza2 (metà)=	5.15	mm
larghezza3 (basso)=	4.95	mm
sezione1 =	12.8775	mm ²
sezione2 =	13.39	mm ²
sezione3 =	12.375	mm ²

Tabella 4 - Dimensioni del secondo provino in PBT/PC

L'area della sezione minima è stata evidenziata.

I parametri settati per eseguire la prova sono riportati in tabella (5).

	VALORE	U. M.
Velocità di spostamento	5	mm/min
	0.0833	mm/s
Frequenza di campionamento	1/500	1/ms
	2	Hz

Tabella 5 - valori di input della prova sul secondo provino in PBT/PC

Eseguendo le stesse operazioni fatte per il primo test ottengo la curva sforzo-deformazione del secondo provino rappresentata nel grafico di figura (16) e i risultati dei parametri caratteristici riportati nella tabella (6).

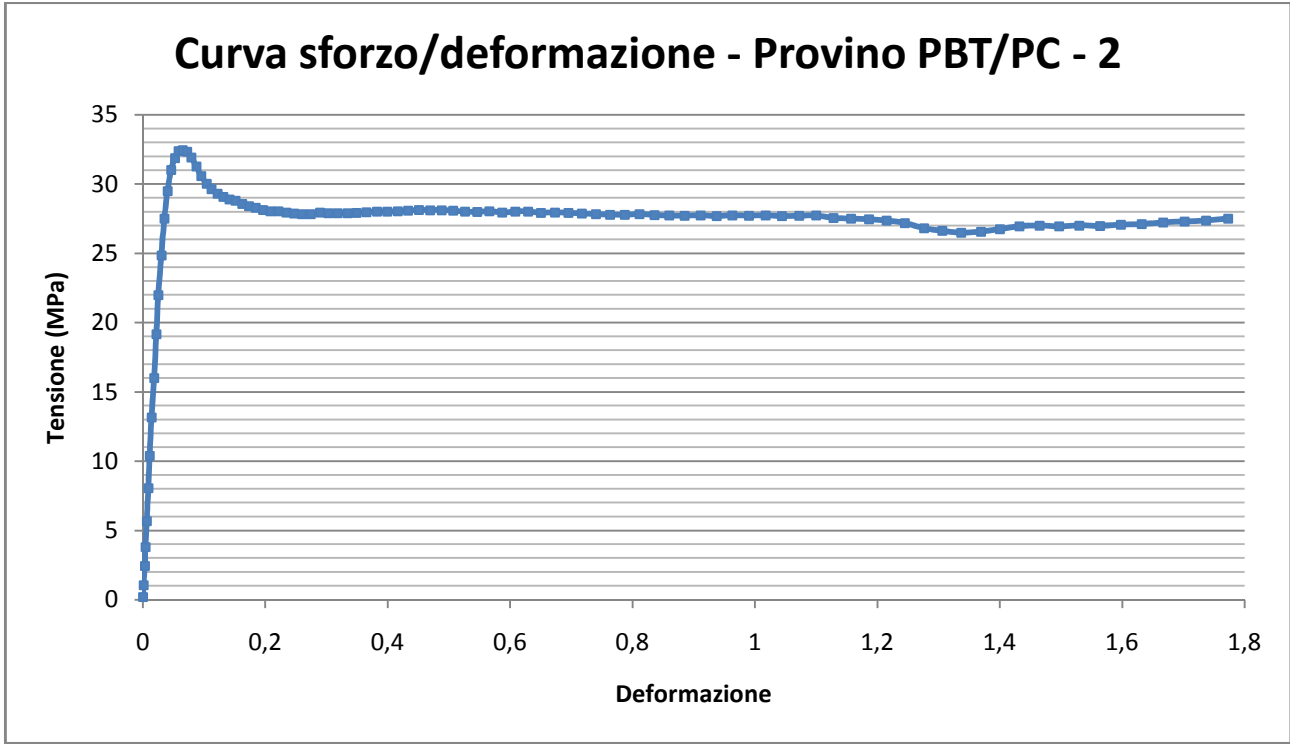


Figura 1613 - Curva tensione-deformazione del secondo provino in PBT/PC a 100 punti d'interpolazione

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Tensione di snervamento=	32.452	MPa
Deformazione a snervamento=	0.065	
Tensione di rottura=	27.51	MPa
Deformazione a rottura=	1.773	
Modulo di elasticità=	981.13	MPa
Durata del test=	638.28	secondi

Tabella 6 - parametri rappresentativi del materiale PBT/PC e durata test (secondo provino)

Osservazioni:

- La sezione del tratto utile risultava alla vista più regolare e priva di intagli. Infatti in questo caso la tensione massima lungo il tratto utile del provino è risultata costante entro un errore accettabile, in quanto, a differenza del test precedente, il collo di strizione si è propagato su quasi tutto il tratto utile. Il confronto tra i due risultati è visibile in figura (17).
- Infatti la deformazione ad allungamento è risultata circa 9 volte superiore.
- La NORMA ISO 527-1 suggerisce di eseguire delle prove che impieghino tra 30 secondi e 5 minuti (300 secondi) per arrivare a rottura, affinché diano risultati veritieri per materiali polimerici (senza che entrino in gioco fenomeni di creep o rilassamento delle tensioni). In questo caso però la prova è durata più di 5 minuti. Per la prossima prova si aumenti la velocità di allontanamento delle morse per assicurarsi di rimanere entro questo tempo limite suggerito.



Figura 14 - Confronto tra provini 1 e 2 dopo rottura

PROVINO PBT/PC - 3

Le dimensioni del provino sono riportate in tabella (7).

DIMENSIONE	VALORE	u. m.
tratto utile=	30	mm
spessore1=	2.45	mm
spessore2=	2.5	mm
spessore3=	2.5	mm
larghezza 1 (alto)=	5	mm
larghezza2 (metà)=	5	mm
larghezza3 (basso)=	5.1	mm
sezione1 =	12.25	mm ²
sezione2 =	12.5	mm ²
sezione3 =	12.75	mm ²

Tabella 7 - Dimensioni del terzo provino in PBT/PC

L'area della sezione minima è evidenziata.

In questo caso si assume una velocità doppia rispetto ai casi precedenti per valutare se la durata del test sia effettivamente più breve dei 5 minuti limite. Inoltre si verificherà in questo modo se questo cambiamento di velocità influisce significativamente o meno sui risultati. La velocità scelta ha un valore di 10 mm/min suggerito dalla normativa. I parametri settati per eseguire la prova sono riportati in tabella (8).

	VALORE	U. M.
Velocità di spostamento	10	mm/min
	0.1667	mm/s
Frequenza di campionamento	1/500	1/ms
	2	Hz

Tabella 8 - valori di input della prova sul terzo provino in PBT/PC

Eseguendo le stesse operazioni fatte per il primo test ottengo la curva sforzo-deformazione del secondo provino rappresentata nel grafico di figura (18) e i risultati dei parametri caratteristici riportati nella tabella (9).

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Tensione di snervamento=	31.866	MPa
Deformazione a snervamento=	0.058	
Tensione di rottura=	26.291	MPa
Deformazione a rottura=	0.408	
Modulo di elasticità=	844.3	MPa
Durata del test=	89.1	secondi

Tabella 9 - parametri rappresentativi del materiale PBT/PC e durata test (terzo provino)

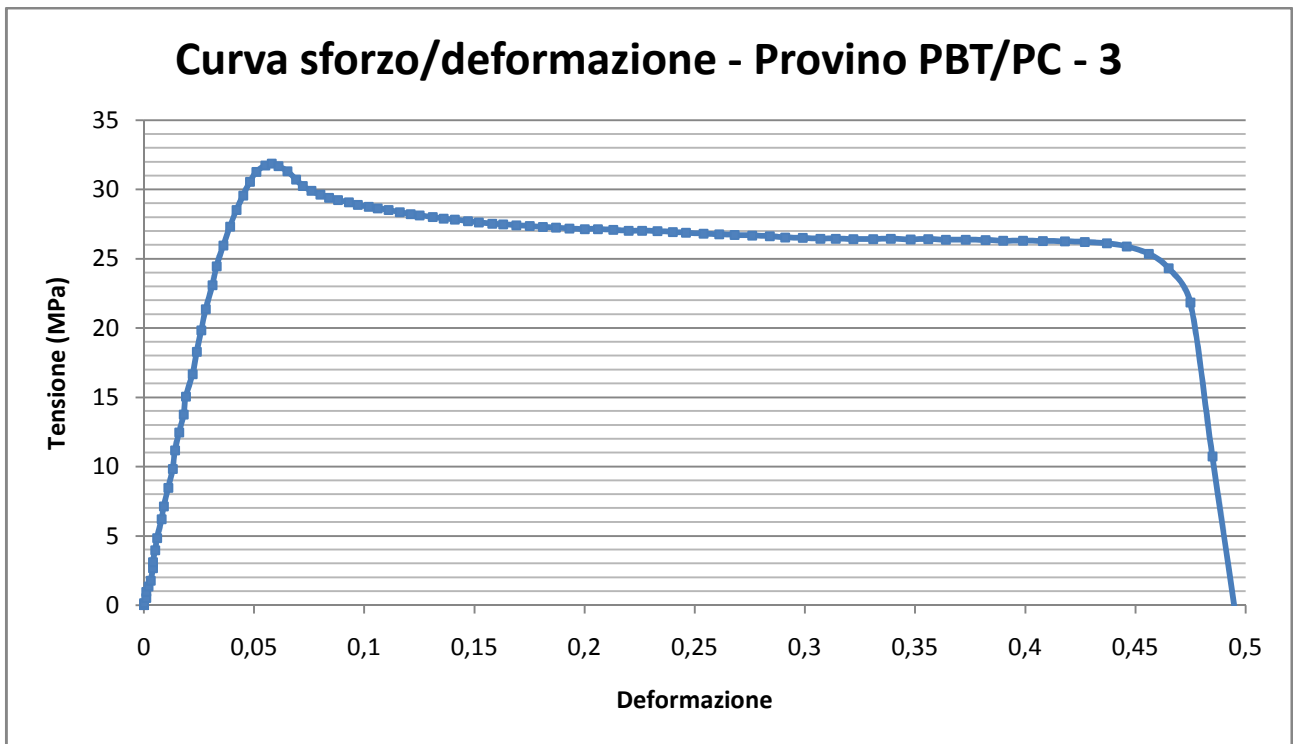


Figura 1815 - Curva tensione-deformazione del terzo provino in PBT/PC a 100 punti d'interpolazione

OSSERVAZIONI:

- Avendo preso una velocità di allungamento doppia rispetto alle prove precedenti il tempo necessario per portare a termine la prova è stato di 1 minuto e 29 secondi. Il tempo indicato dalla norma per ottenere risultati significativi è stato perfettamente rispettato.
- Si noti che il provino non aveva una forma perfettamente rettilinea, ma mostrava un leggero andamento ad "S", come si può vedere in figura (19). Probabilmente a causa di questo fatto il collo di strizione non si è propagato lungo tutto il tratto utile.
- Ad ogni modo, nonostante i problemi legati alla geometria e impostando una velocità di test doppia, i risultati risultano ragionevolmente compatibili con quelli delle prove precedenti.

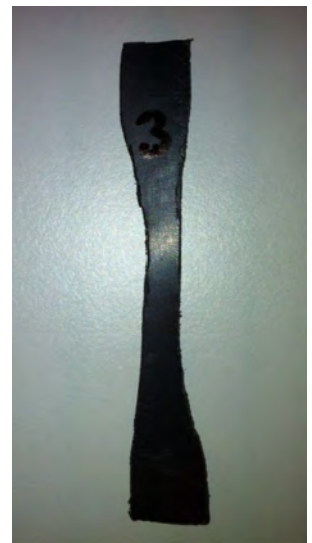


Figura 16 - terzo provino in PBT/PC: caratterizzato da una forma a "S"

PROVINO PBT/PC - 4

Le dimensioni del provino sono riportate in tabella (10).

DIMENSIONE	VALORE	u. m.
tratto utile=	30	mm
spessore1=	3.65	mm
spessore2=	3.05	mm
spessore3=	3.05	mm
larghezza 1 (alto)=	6.35	mm
larghezza2 (metà)=	6.3	mm
larghezza3 (basso)=	6.25	mm
sezione1 =	23.1775	mm ²
sezione2 =	19.215	mm ²
sezione3 =	19.0625	mm ²

Tabella 10 - Dimensioni del quarto provino in PBT/PC

Si noti che le dimensioni di questo provino (ricavato in prossimità della punta del feltro) sono sensibilmente maggiori rispetto agli altri, ma la sua geometria risulta essere più regolare alla vista rispetto ai casi precedenti.

I parametri impostati per questo test sono riportati in tabella (11), mentre la curva sforzo-deformazione ottenuta è rappresentata in figura (20).

	VALORE	U. M.
Velocità di spostamento	10	mm/min
	0.1667	mm/s
Frequenza di campionamento	1/500	1/ms
	2	Hz

Tabella 11 - valori di input della prova sul quarto provino in PBT/PC

I parametri rappresentativi del materiale e la durata del test invece sono riportati in tabella (12).

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Tensione di snervamento=	31.014	MPa
Deformazione a snervamento=	0.06	
Tensione di rottura=	25.824	MPa
Deformazione a rottura=	0.404	
Modulo di elasticità=	854.23	MPa
Durata del test=	82.44	secondi

Tabella 12 - parametri rappresentativi del materiale PBT/PC e durata test (quarto provino)

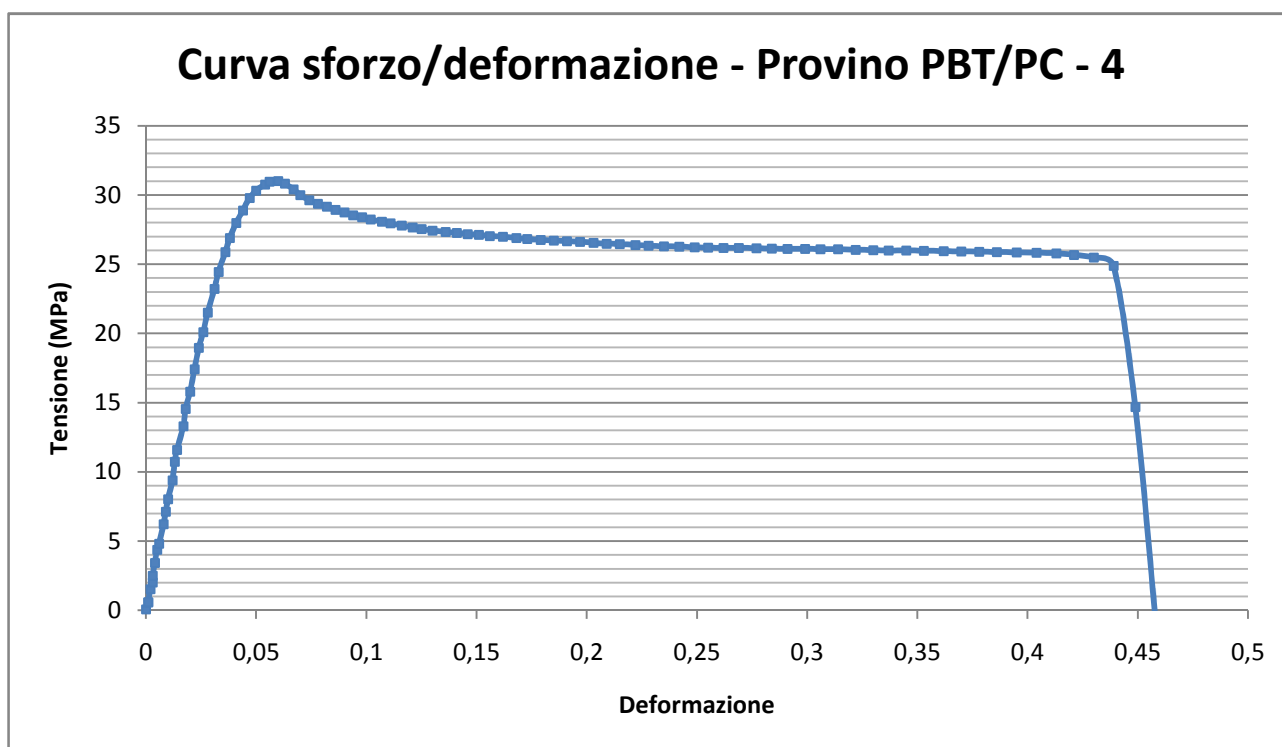


Figura 19 - Curva tensione-deformazione del quarto provino in PBT/PC a 100 punti d'interpolazione

OSSERVAZIONI:

- Anche in questa prova lo snervamento non si è propagato lungo tutto il tratto utile.
- La rottura si è manifestata in 1 minuto e 22 secondi ed è avvenuta, come previsto, in prossimità della sezione minima dove ha avuto origine il collo di strizione.
- I risultati ottenuti sono del tutto simili a quelli ottenuti per la prova precedente, sia per quanto riguarda lo snervamento sia per quanto riguarda la rottura, nonostante le differenze geometriche e dimensionali.

PROVINO PBT/PC - 5

Le dimensioni del provino sono riportate in tabella (13).

DIMENSIONE	VALORE	u. m.
tratto utile=	30	mm
spessore1=	2.65	mm
spessore2=	3.1	mm
spessore3=	3.4	mm
larghezza 1 (alto)=	5.55	mm
larghezza2 (metà)=	5.6	mm
larghezza3 (basso)=	4.75	mm
sezione1 =	14.7075	mm ²
sezione2 =	17.36	mm ²
sezione3 =	16.15	mm ²

Tabella 13 - Dimensioni del quinto provino in PBT/PC

Si riportino i parametri impostati per la prova in tabella (14), mentre i risultati e la curva sforzo-deformazione sono visibili rispettivamente in tabella (15) e in figura (21).

	VALORE	U. M.
Velocità di spostamento	10	mm/min
	0.1667	mm/s
Frequenza di campionamento	1/500	1/ms
	2	Hz

Tabella 14 - valori di input della prova sul quinto provino in PBT/PC

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Tensione di snervamento=	34.49	MPa
Deformazione a snervamento=	0.053	
Tensione di rottura=	29.01	MPa
Deformazione a rottura=	0.192	
Modulo di elasticità=	1022	MPa
Durata del test=	42.66	secondi

Tabella 15 - parametri rappresentativi del materiale PBT/PC e durata test (quinto provino)

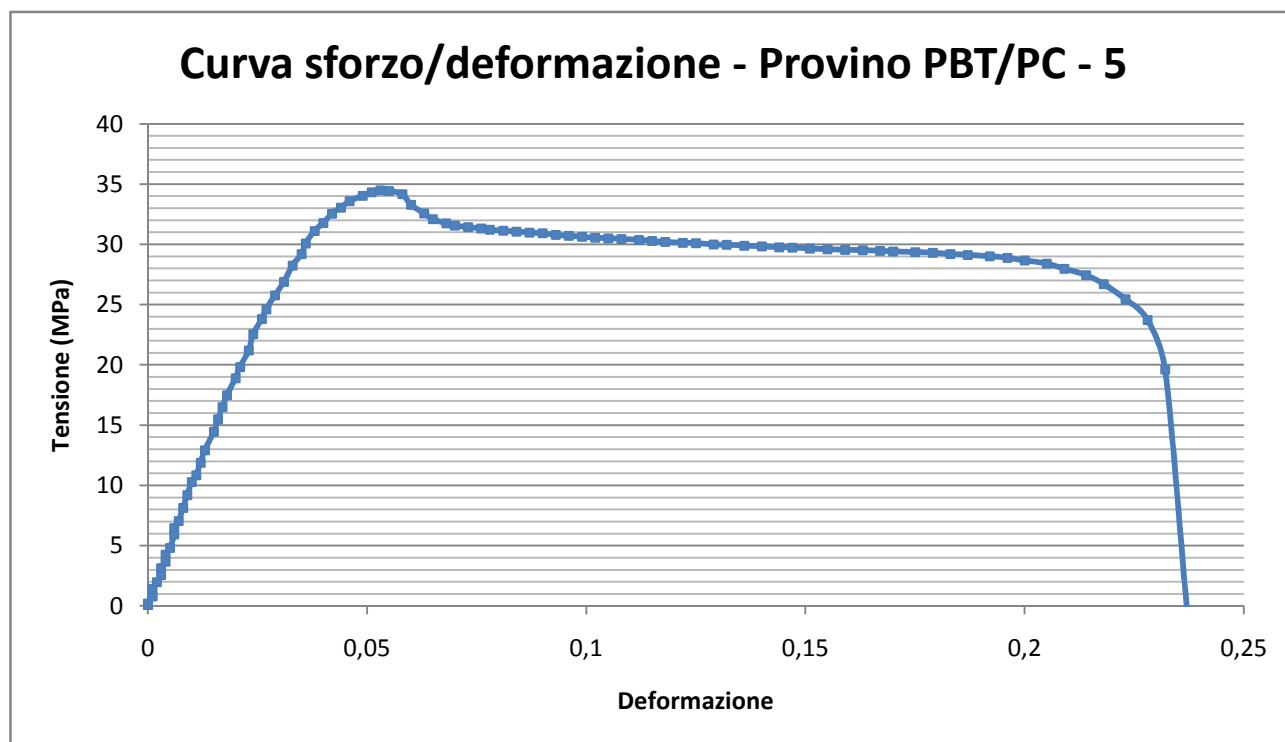


Figura 17 - Curva tensione-deformazione del quinto provino in PBT/PC a 100 punti d'interpolazione

OSSERVAZIONI:

- La sezione risulta essere regolare alla vista e quindi ci si sarebbe aspettati una propagazione del collo di strizione lungo tutto il provino. In realtà così non è stato: si è giunti a rottura in prossimità della sezione minima.
- La prova ha avuto una durata di 43 secondi, entro i valori raccomandati dalla norma.

PROVINO PBT/PC - 6

Le dimensioni del provino sono riportate in tabella (16).

DIMENSIONE	VALORE	u. m.
tratto utile=	30	mm
spessore1=	2.45	mm
spessore2=	2.45	mm
spessore3=	2.5	mm
larghezza 1 (alto)=	4.45	mm
larghezza2 (metà)=	4.8	mm
larghezza3 (basso)=	5.15	mm
sezione1 =	10.9025	mm ²
sezione2 =	11.76	mm ²
sezione3 =	12.875	mm ²

Tabella 16 - Dimensioni del sesto provino in PBT/PC

Si riportino di seguito i parametri di input al software (tabella(17)), i risultati dei parametri caratterizzanti il materiale e la durata della prova in tabella (18) e in figura (22) si riporti la curva sforzo-deformazione.

	VALORE	U. M.
Velocità di spostamento	10	mm/min
	0.1667	mm/s
Frequenza di campionamento	1/500	1/ms
	2	Hz

Tabella 17 - valori di input della prova sul sesto provino in PBT/PC

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Tensione di snervamento=	34.113	MPa
Deformazione a snervamento=	0.06	
Tensione di rottura=	29.53	MPa
Deformazione a rottura=	0.212	
Modulo di elasticità=	914.05	MPa
Durata del test=	50.58	secondi

Tabella 18 - parametri rappresentativi del materiale PBT/PC e durata test (sesto provino)

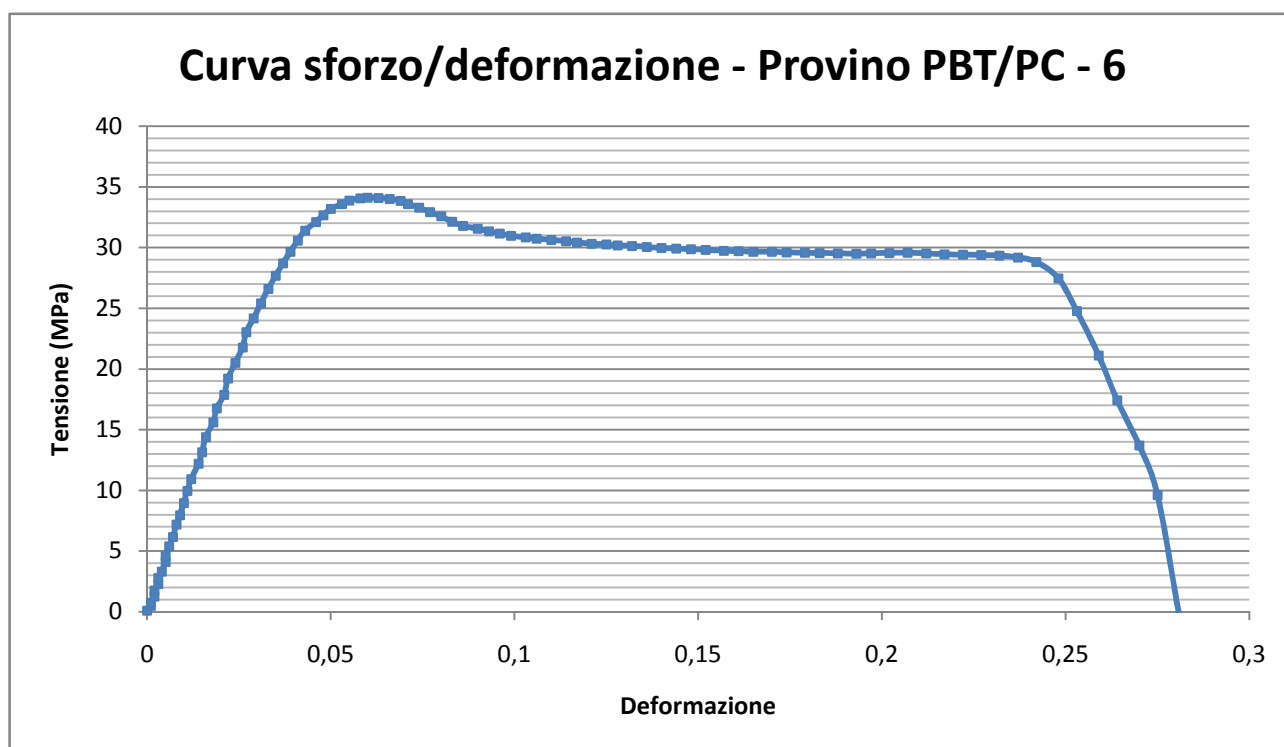


Figura 18 - Curva tensione-deformazione del sesto provino in PBT/PC a 100 punti d'interpolazione

OSSERVAZIONI:

- Anche in questo caso non è stata propagata la strizione lungo tutto il tratto utile. Questo probabilmente a causa della presenza di una sezione minima prevalente, e forse anche a causa di una velocità troppo alta di test: nel prossimo test si provi a dimezzare nuovamente la velocità per verificare se questo fattore influisce sulla propagazione del collo di strizione.

PROVINO PBT/PC - 7

Le dimensioni del provino sono riportate in tabella (16).

DIMENSIONE	VALORE	u. m.
tratto utile=	30	mm
spessore1=	2.5	mm
spessore2=	2.55	mm
spessore3=	2.65	mm
larghezza 1 (alto)=	4.55	mm
larghezza2 (metà)=	4.65	mm
larghezza3 (basso)=	4.9	mm
sezione1 =	11.375	mm ²
sezione2 =	11.8575	mm ²
sezione3 =	12.985	mm ²

Tabella 19 - Dimensioni del settimo provino in PBT/PC

Si riportino di seguito i parametri di input al software (tabella(20)), i risultati dei parametri caratterizzanti il materiale e la durata della prova in tabella (21) e in figura (23) si riporti la curva sforzo-deformazione.

Come già accennato precedentemente si esegua ora un test con velocità di 5mm/min per verificare se in questo caso si ha una propagazione dl collo di strizione o meno.

	VALORE	U. M.
Velocità di spostamento	5	mm/min
	0.08667	mm/s
Frequenza di campionamento	1/500	1/ms
	2	Hz

Tabella 20 - valori di input della prova sul settimo provino in PBT/PC

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Tensione di snervamento=	31.878	MPa
Deformazione a snervamento=	0.054	
Tensione di rottura=	26.877	MPa
Deformazione a rottura=	0.203	
Modulo di elasticità=	978.69	MPa
Durata del test=	86.4	secondi

Tabella 21 - parametri rappresentativi del materiale PBT/PC e durata test (settimo provino)

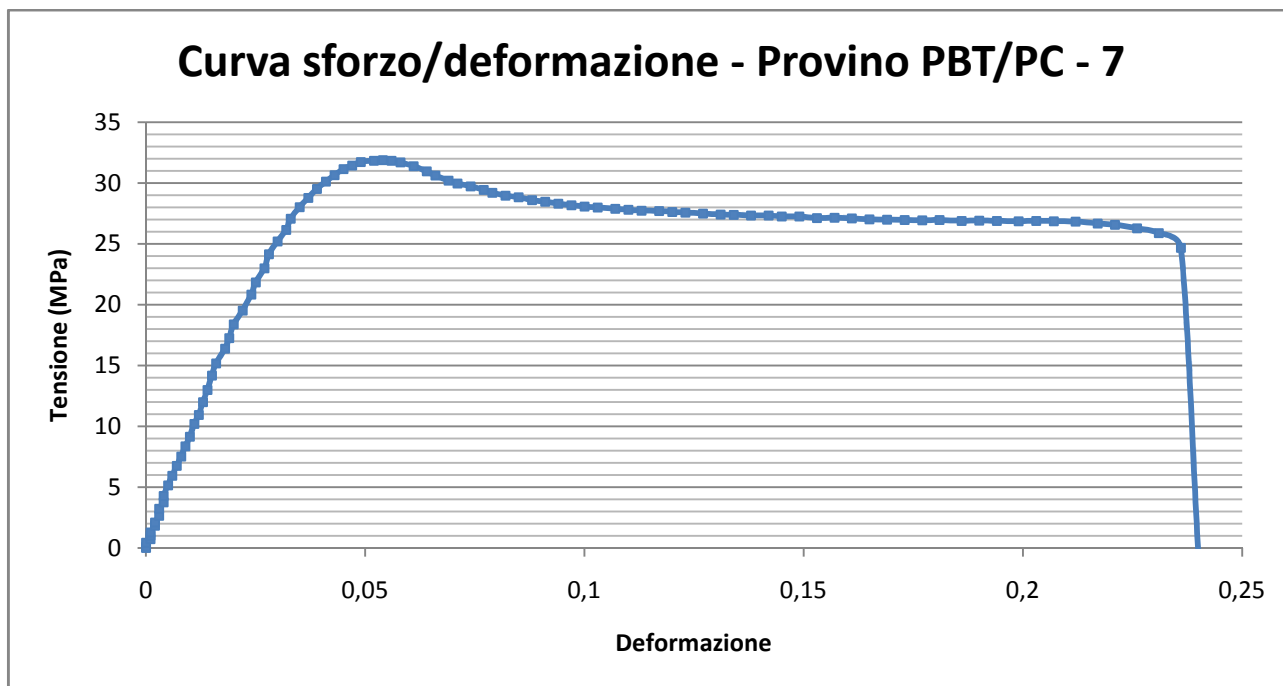


Figura 2219 - Curva tensione-deformazione del settimo provino in PBT/PC a 100 punti d'interpolazione

OSSERVAZIONI:

- Il test ha avuto una durata di 1 minuto e 26 secondi.
- Anche in questo caso non si è manifestata la strizione su tutto il tratto utile, dimostrando che non è la velocità di test che ne determina la formazione. A questo punto si può dire che il fattore più influente è la regolarità della geometria. Sarebbe interessante eseguire delle prove su dei provini stampati e verificare la ripetibilità del loro comportamento.

PROVINO PBT/PC - 8

Le dimensioni del provino sono riportate in tabella (16).

DIMENSIONE	VALORE	u. m.
tratto utile=	30	mm
spessore1=	2.55	mm
spessore2=	2.5	mm
spessore3=	2.55	mm
larghezza 1 (alto)=	5.25	mm
larghezza2 (metà)=	5.25	mm
larghezza3 (basso)=	5.1	mm
sezione1 =	13.3875	mm ²
sezione2 =	13.125	mm ²
sezione3 =	13.005	mm ²

Tabella 22 - Dimensioni dell'ottavo provino in PBT/PC

Si noti che la sezione lungo il tratto utile è particolarmente costante per questo provino. Infatti la differenza tra la sezione massima e minima è inferiore al 3%.

Si riportino di seguito i parametri di input al software (tabella(20)), i risultati dei parametri caratterizzanti il materiale e la durata della prova in tabella (21) e in figura (23) si riporti la curva sforzo-deformazione.

Anche in questo caso si esegua un test con velocità di 5mm/min per verificare se in questo caso si ha una propagazione del collo di strizione o meno, avendo una geometria molto regolare.

	VALORE	U. M.
Velocità di spostamento	5	mm/min
	0.08667	mm/s
Frequenza di campionamento	1/500	1/ms
	2	Hz

Tabella 23 - valori di input della prova sull'ottavo provino in PBT/PC

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Tensione di snervamento=	29.115	MPa
Deformazione a snervamento=	0.088	
Tensione di rottura=	26.822	MPa
Deformazione a rottura=	0.33	
Modulo di elasticità=	763.87	MPa
Durata del test=	134.64	secondi

Tabella 24 - parametri rappresentativi del materiale PBT/PC e durata test (ottavo provino)

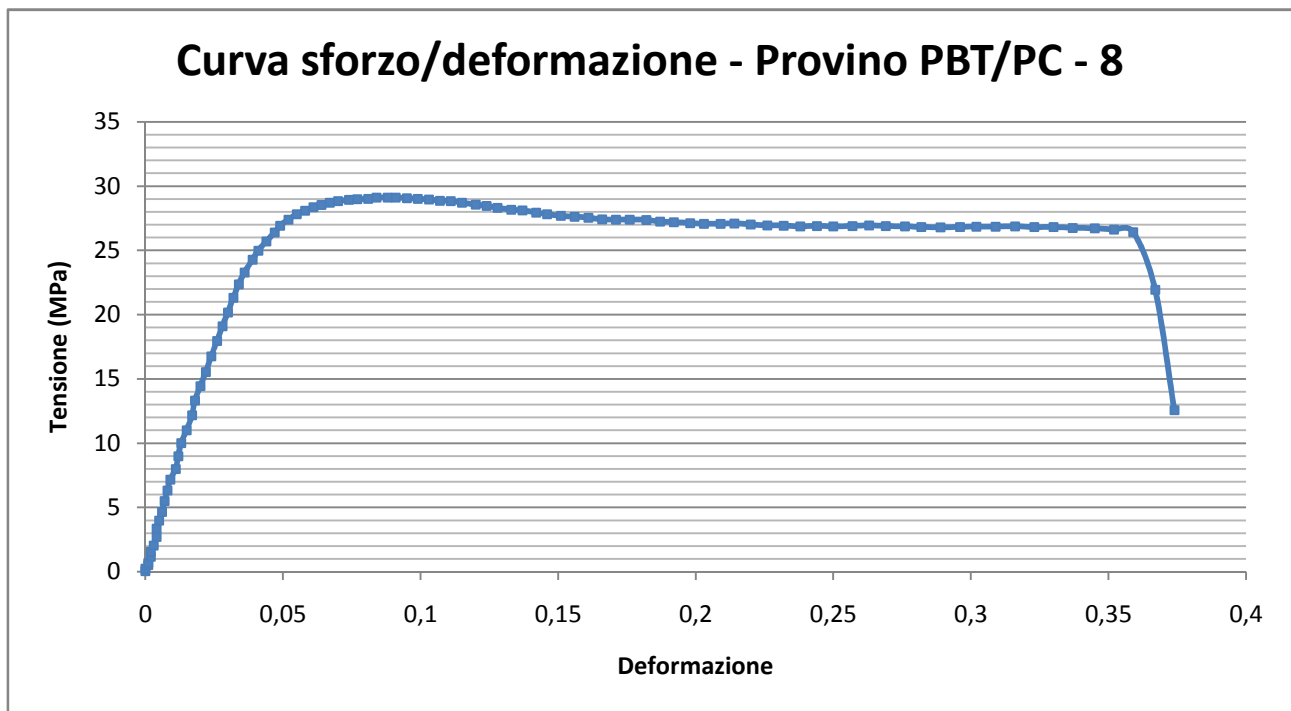


Figura 23 - Curva tensione-deformazione dell'ottavo provino in PBT/PC a 100 punti d'interpolazione

OSSERVAZIONI:

- Si noti che in questo caso la tensione di snervamento è risultata significativamente più bassa rispetto alle altre prove. Come pure la deformazione a snervamento è risultata diversa dai risultati solitamente ottenuti.
- Inoltre, nonostante la regolarità della sezione e la lentezza della prova, non si è ottenuta la propagazione della strizione lungo tutto il tratto utile. Questo è accaduto probabilmente a qualche micro intaglio generato in fase di lavorazione.

PROVINO PBT/PC - 9

Le dimensioni del provino sono riportate in tabella (25).

DIMENSIONE	VALORE	u. m.
tratto utile=	30	mm
spessore1=	2.55	mm
spessore2=	2.5	mm
spessore3=	2.5	mm
larghezza 1 (alto)=	5.65	mm
larghezza2 (metà)=	5.6	mm
larghezza3 (basso)=	5.6	mm
sezione1 =	14.4045	mm ²
sezione2 =	14	mm ²
sezione3 =	14	mm ²

Tabella 25 - Dimensioni dell'ottavo provino in PBT/PC

Anche in questo caso la sezione risulta essere costante lungo il tratto utile. Inoltre, rispetto al caso precedente, anche alla vista appare molto regolare e senza la presenza di intagli. Si esegua la prova alla velocità di 5 mm/min.

Si riportino di seguito i dati di input forniti al software nella tabella (26).

	VALORE	U. M.
Velocità di spostamento	5	mm/min
	0.08667	mm/s
Frequenza di campionamento	1/500	1/ms
	2	Hz

Tabella 26 - valori di input della prova sul nono provino in PBT/PC

Per quanto riguarda i risultati c'è stato un problema a livello di software. La finestra di acquisizione di dati ottenuta è troppo estesa (sia prima sia dopo l'inizio e la fine della prova), probabilmente a causa di una distrazione dell'operatore. Per questo motivo è stato necessario eseguire un'elaborazione dei dati partendo dal file TDMS generato dal software che gestisce la prova con la macchina UTM. Da questo file aperto in Excel, grazie ad un opportuno plugin di LabView, sono stati eliminati i dati non significativi per la valutazione della prova. In questo modo, partendo da un numero iniziale di dati pari a 557818, ne sono stati selezionati 110329, ritenuti inerenti alla prova.

Il numero di dati è ancora eccessivamente grande, per questo motivo sono stati applicati dei filtri media per ridurne il numero.

Alla fine, cercando di infittire la frequenza di dati in prossimità dello snervamento, rispetto al resto della prova, sono stati ottenuti 167 dati, che hanno fornito i risultati in tabella (27) e il grafico presente in figura (25).

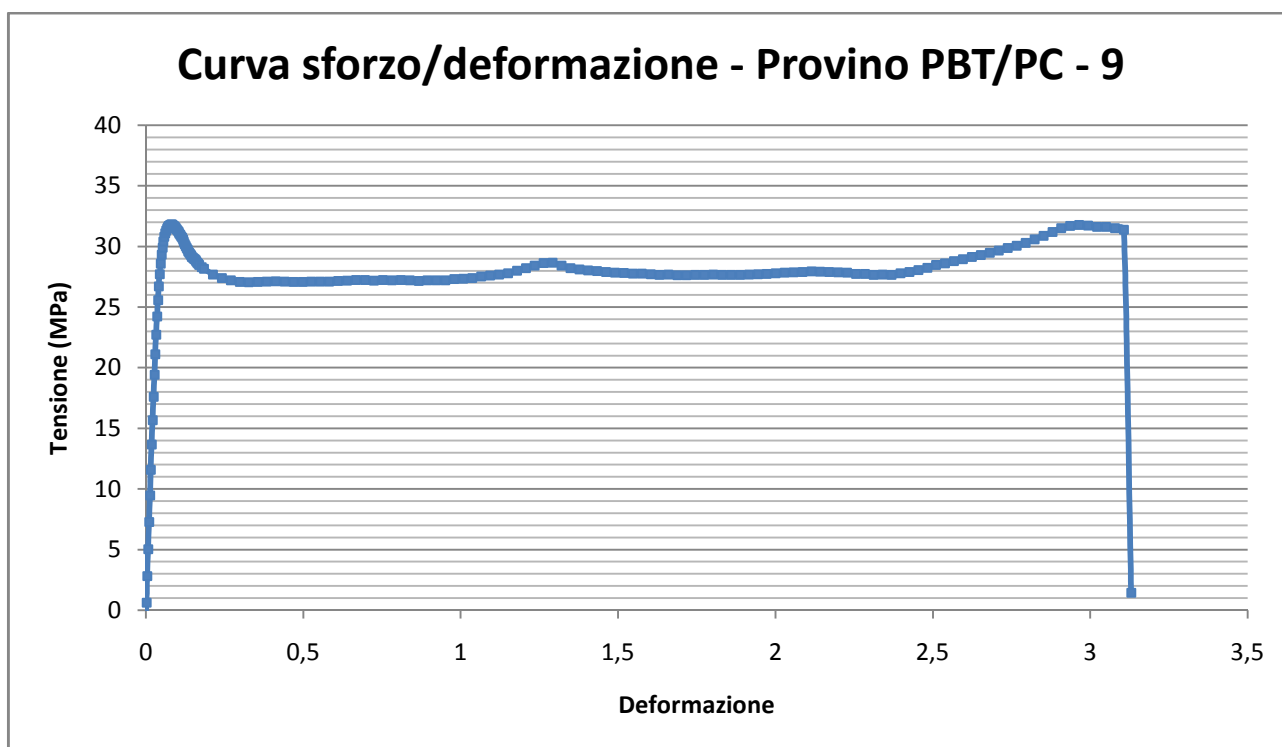


Figura 24 - Curva tensione-deformazione del nono provino in PBT/PC ricavata da 167 dati significativi

PARAMETRO	VALORE	U.M.
Tensione di snervamento=	31.82	MPa
Deformazione a snervamento=	0.080	
Tensione di rottura=	31.77	MPa
Deformazione a rottura=	2.96	
Modulo di elasticità=	793.11	MPa
Durata del test=	1126.8	secondi

Tabella 27 - parametri rappresentativi del materiale PBT/PC e durata test (nono provino)

OSSERVAZIONI:

- Si noti che questa prova è quella che più si distingue da tutte le altre per diversi motivi che elencheremo di seguito.
- Si noti che il provino questa volta ha subito una strizione lungo tutto il tratto utile arrivando ad una deformazione superiore al 300%. Questo è avvenuto grazie ad una sezione molto regolare e priva di intagli o microintagli.
- La durata della prova (18 minuti e 46 secondi) è stata eccessiva e quindi non si può ritenere accettabile secondo la norma. Questa durata probabilmente è imputabile anche al fatto che è avvenuta la propagazione totale del collo di strizione.
- Un'altra conseguenza di questo fatto è che in prossimità della rottura si assiste ad un innalzamento della tensione. Questo fatto può essere spiegato da un punto di vista molecolare: in condizione di strizione totalmente propagata le catene polimeriche sono state distese e

allineate lungo la direzione di applicazione del carico sciogliendo tutti i legami secondari. A questo punto per poter rompere il provino è necessario rompere i legami covalenti (che sono più forti) innalzando così la tensione applicata al materiale.

9. ANALISI DEI RISULTATI e CONCLUSIONI

Si esegua una semplice analisi statistica per determinare i valori medi delle tensioni e delle deformazioni caratteristiche del materiale. Inoltre si provi a stimare un valore medio del modulo elastico, pur sapendo che il metodo con cui è stato ricavato è concettualmente errato.

Innanzitutto si determinino i valori medi della tensione di snervamento, della deformazione a snervamento, della tensione di rottura, della deformazione a rottura e del modulo elastico, sfruttando la generica formula:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Dove x_i sono gli n valori del parametro e $\bar{x}$ è il valore medio del parametro.

Si riportino i valori medi ottenuti in tabella (28).

		σ_{snerv}	ϵ_{snerv}	σ_{rott}	ϵ_{rott}	E	Durata test
1° FELTRO	PROVINO1	35.514	0.055	31.436	0.219	1155.9	104.4
	PROVINO2	32.452	0.065	27.51	1.773	981.13	638.28
	PROVINO3	31.866	0.058	26.291	0.408	844.3	89.1
2° FELTRO	PROVINO4	31.014	0.06	25.824	0.404	854.23	82.44
	PROVINO5	34.49	0.053	29.01	0.192	1022	42.66
	PROVINO6	34.113	0.06	29.53	0.212	914.05	50.58
3° FELTRO	PROVINO7	31.878	0.054	26.877	0.203	978.69	86.4
	PROVINO8	29.115	0.088	26.822	0.33	763.87	134.64
	PROVINO9	31.82	0.08	31.77	2.96	793.11	1126.8
MEDIA		32.4736	0.06367	28.34111	0.744556	923.0311	261.7

Tabella 28 - valori medi dei parametri rappresentativi e della durata del test

Si esegua ora un confronto tra le 9 prove di trazione riportando in un unico grafico l'andamento delle curve di trazione di ciascun test. Per questo si osservi la figura (26).

Da questo grafico si possono evidenziare principalmente le differenze di comportamento tra i provini che hanno mostrato una propagazione del collo di strizione e provini che invece hanno ceduto prima di propagare la strizione. Ora è interessante valutare l'andamento delle curve di quei provini che hanno avuto un comportamento simile, giungendo a rottura in breve tempo e con deformazioni inferiori al 100%. Questo confronto, escludendo le curve dei provini 2 e 9, è visibile in figura (27).

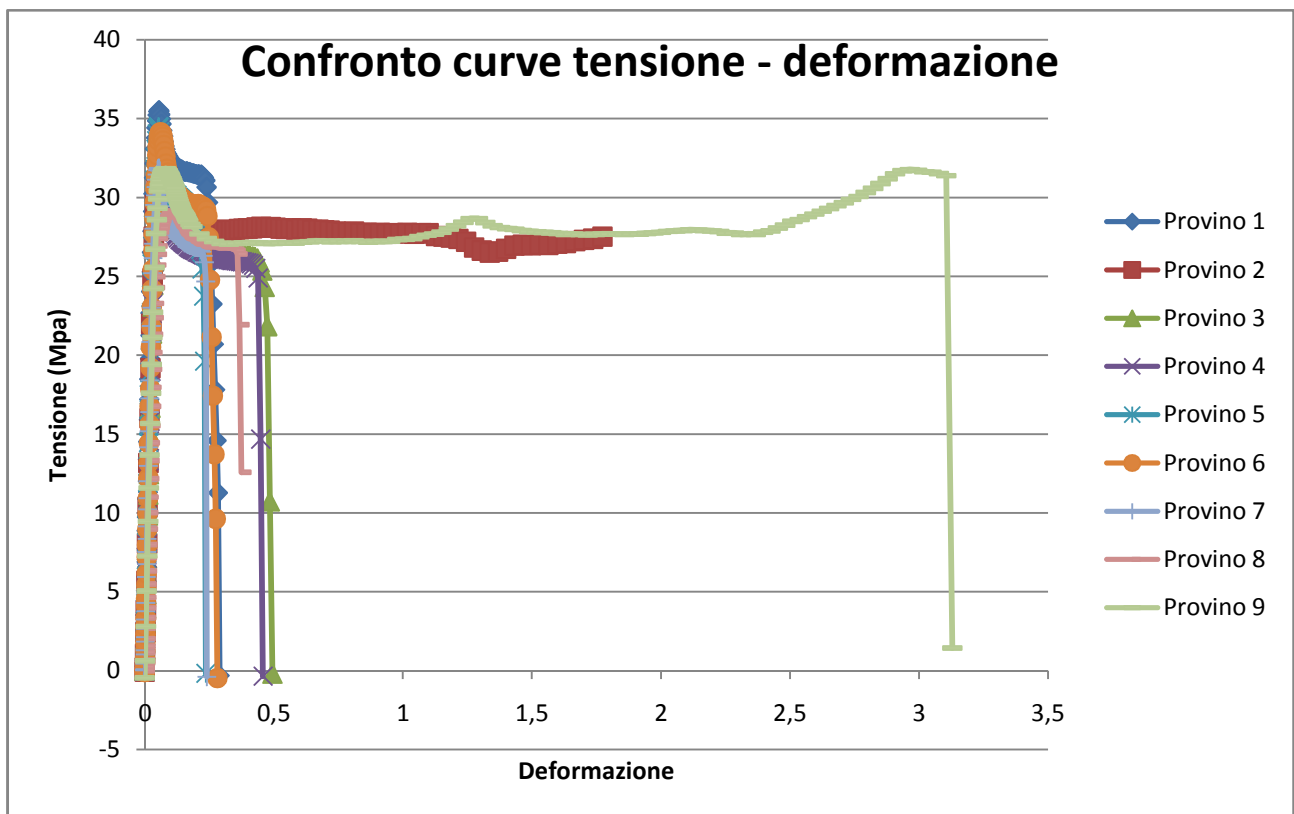


Figura 25 - Confronto curve tensione - deformazione tra i 9 provini

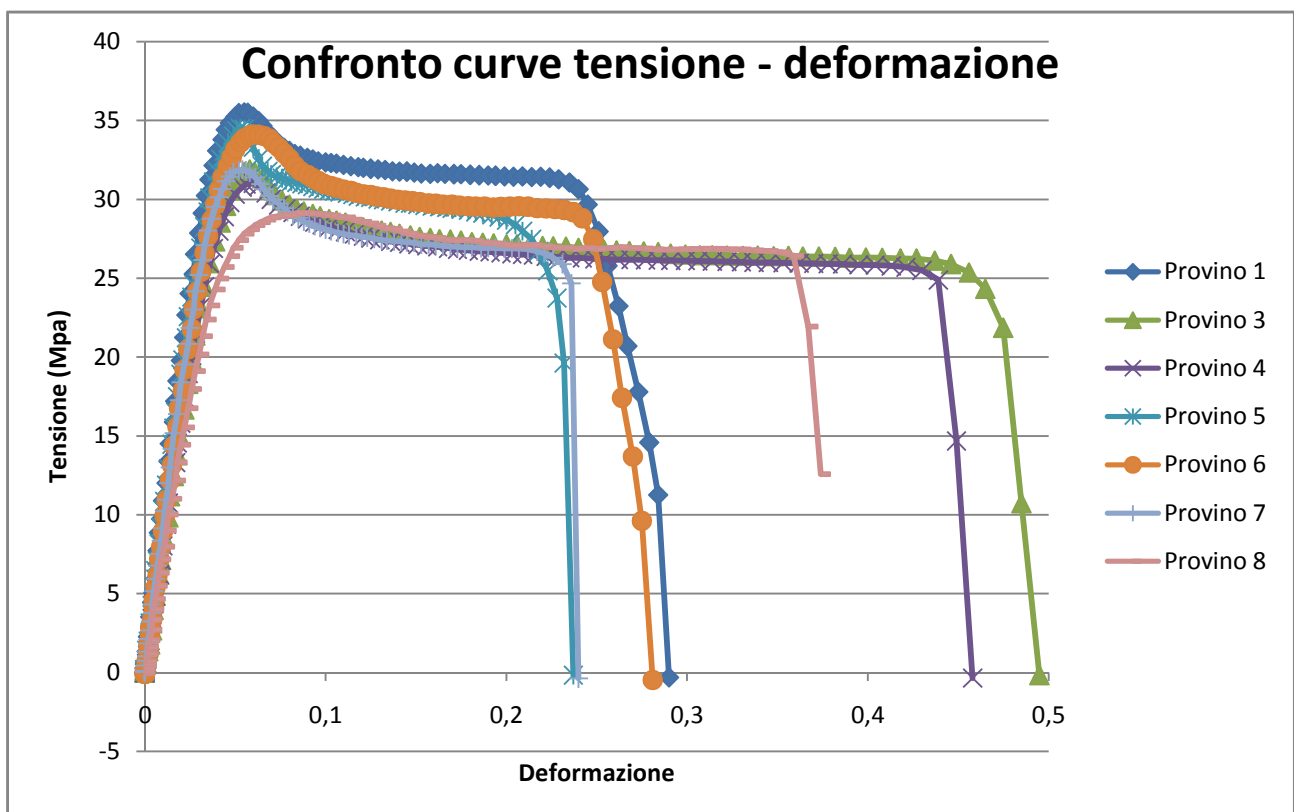


Figura 26 - confronto curve tensione - deformazione per provini che non hanno mostrato propagazione della strizione

Si noti inoltre che i valori variano in maniera arbitraria senza un particolare criterio. Infatti non è stato evidenziato un comportamento differente per ogni feltro e per una particolare posizione dell'area da cui è stato ricavato il provino. Le differenze sono imputabili principalmente alla scarsa ripetibilità della geometria dei provini. Per questo motivo si suggerisce di eseguire delle prove con altri provini ricavati da un opportuno processo di stampaggio ad iniezione, con cui confrontare ed eventualmente convalidare i risultati ottenuti con la procedura seguita.

In figura (28) si può apprezzare la grande diversità di allungamenti in seguito ai test di trazione tra i vari provini.

Per verificare la bontà delle prove finora eseguite è necessario confrontare i risultati ottenuti con i dati contenuti nella scheda tecnica del materiale. Selle Royal s.p.a ha fornito la scheda tecnica del materiale, dalla quale è stato possibile ricavare i dati forniti dal produttore relativi ai parametri di interesse ottenuti dalle prove sperimentali.



Figura 27 - Confronto visivo tra i provini dopo rottura

I dati riportati nel data sheet del PBT/PC sono visibili in tabella (29).

PIBITER® HI A1301		
σ_{snerv}	35	MPa
σ_{rott}	32	MPa
ϵ_{rott}	>200	%
E	1550	MPa

Tabella 29 - parametri del materiale da scheda tecnica

Il materiale fornito, come riportato in scheda tecnica, è una lega PBT/PC avente caratteristiche di elevata resistenza e bassa fluidità. Inoltre è importante segnalare che i dati di questo materiale relativi alle caratteristiche meccaniche sono stati ricavati attraverso dei test basati sulla normativa ASTM e non sulla ISO.

I dati finali ottenuti dall'analisi statistica dei risultati delle prove sono riportati e confrontati in tabella (30).

	PIBITER® HI A1301 (data sheet)		PIBITER® HI A1301 (test)	
σ_{snerv}	35	MPa	32.47356	MPa
ϵ_{snerv}			0.063667	
σ_{rott}	32	MPa	28.34111	MPa
ϵ_{rott}	>200	%	74.45556	%
E	1550	MPa	923.0311	

Tabella 30 - Confronto tra i parametri caratteristici forniti dalla scheda tecnica e quelli ottenuti sperimentalmente

Osservando i risultati messi a confronto con i dati del materiale si possono trarre le seguenti conclusioni:

- I risultati ottenuti sperimentalmente non sono esatti se confrontati con i dati forniti dal produttore. Questo fatto può essere imputabile a diversi fattori: innanzitutto la scarsa precisione nel tagliare i provini può aver permesso la formazione di intagli lungo il tratto utile che hanno fatto calare le caratteristiche del materiale. Inoltre nel datasheet non sono indicate le condizioni ambientali in cui sono stati ricavati i dati (temperatura e umidità). Probabilmente diversi valori di temperatura e umidità presenti in laboratorio di STEP ENGINEERING, rispetto a quelli presenti nel laboratorio dell'azienda produttrice, hanno portato ad ottenere diversi valori
- L'andamento delle curve ad ogni modo sembra in linea con dati della scheda tecnica del materiale con una riduzione di circa il 7% per entrambi i valori di tensione caratteristici. Per quanto riguarda l'allungamento a rottura invece la deformazione è molto inferiore rispetto a quanto riportato nel data sheet: anche in questo caso la causa principale è l'irregolarità geometrico-dimensionale del provino.
- Si suggerisce dunque di eseguire delle prove di trazione con dei provini dello stesso materiale, prodotti appositamente per questo scopo, attraverso la tecnologia di stampaggio ad iniezione. Si confronteranno poi i risultati ottenuti da questi prossimi test con i dati della scheda tecnica e i risultati ottenuti precedentemente con i provini ottenuti direttamente dalle selle. Ci si attende di ottenere una maggiore regolarità di risultati soprattutto per quanto riguarda le deformazioni, le quali nelle prove eseguite finora dimostrano un'eccessiva variabilità tra un test e l'altro.

PROVE DI TRAZIONE PIBITHER® HI A1301 - PROVINI STAMPATI

Per verificare la bontà dei risultati ottenuti dalle prove di trazione sui provini ritagliati dai feltri delle selle si è deciso di stampare dei provini dello stesso materiale in modo tale da ottenere una geometria costante e ripetibile. Lo scopo è verificare che i risultati ottenuti dalle prove con i provini ritagliati siano simili a quelli ottenuti con provini stampati (quindi normati e idonei a questo tipo di test). In caso di verifica negativa è necessario operare una scelta sulla tipologia di provini da adoperare per eseguire le prove di rottura a creep.

Innanzitutto è necessario determinare la geometria e le dimensioni del provino da stampare. Le dimensioni sono state stabilite basandosi sempre sulla normativa ISO 527 come per il caso dei provini ritagliati. In questo caso però, avendo la possibilità di stampare i provini, è stata scelta una tipologia di provino di dimensioni maggiori.

La tipologia di provini è la 1B, riportata in figura (1).

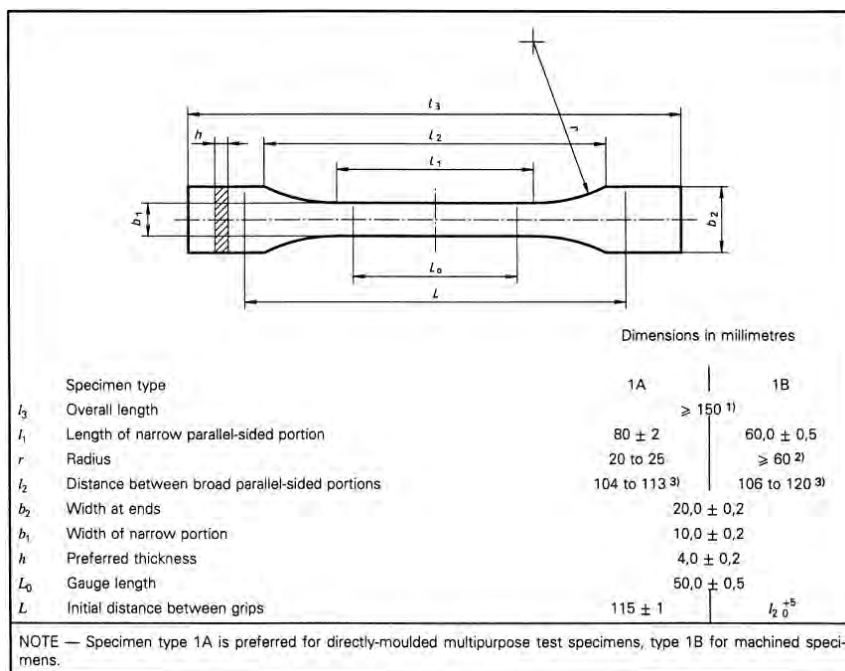


Figura 1 - Dimensioni provino da normativa ISO 527

Seguendo le indicazioni della norma è stato fatto stampare un provino avente le seguenti dimensioni:

- $l_3 = 140 \text{ mm}$
- $l_1 = 50 \text{ mm}$
- $l_2 = 90 \text{ mm}$
- $b_1 = 10 \text{ mm}$
- $b_2 = 20 \text{ mm}$
- $h = 4 \text{ mm}$

Si noti che non tutte le dimensioni rispettano i suggerimenti della normativa in quanto la cavità dello stampo aveva delle limitazioni dimensionali che ponevano delle restrizioni sulla lunghezza del provino ottenibile. Si ritenga trascurabile questa differenza ai fini dei risultati.

STAMPAGGIO PROVINI

Lo stampaggio dei provini è stato eseguito da un'azienda che ha seguito la progettazione dello stampo e la lavorazione stessa scegliendo anche i parametri di lavorazione. Sarebbe interessante eseguire una breve analisi Moldflow per confrontare i risultati reali con quelli della simulazione, valutando se alcuni parametri avrebbero potuto essere stati scelti diversamente.

Lo stampaggio dei provini è stato fatto con una macchina NEGRI-BOSSI VE 70-240, dove VE indica l'alimentazione elettrica e il valore 70 la forza di chiusura espressa in tonnellate.

TEMPERATURA D'ESSICAZIONE	(110 ÷ 135) °C
TEMPO D'ESSICAZIONE	4 ore
TEMPERATURA DEL FUSO	(220 ÷ 280) °C
TEMPERATURA DELLO STAMPO	(40 ÷ 85) °C

Tabella 1 - parametri di processo suggeriti per PBT/PC

Sapendo che i dati tipici per il processo di stampaggio di un blend PBT/PC sono quelli riportati in tabella (1), i dati della macchina e i parametri impostati per lo stampaggio del provino in PBT/PC sono riportati in tabella (2).

STAMPAGGIO PROVINI PBT/PC		
Macchina		
Produttore	Modello	
Negri-Bossi	VE 70-240	
Forza di chiusura =	70	tonnellate
Parametri di processo impostati		
Velocità corsa pistone =	20	mm/s
Corsa di dosaggio =	35	mm
Commutazione in post-pressione =	16	mm
Post-pressione (impaccamento) =	500	bar
Corsa di risucchio =	6	mm
Temperatura fuso polimerico =	262	°C
Temperatura H2O raffreddamento =	16	°C
Tempo iniezione =	1,3	s
Tempo di ricircolo =	2,55	s
Tempo raffreddamento =	25	s
Tempo ciclo totale =	39	s

Tabella 2 - dati macchina e parametri impostati per il processo di stampaggio dei provini in PBT/PC

Si osservi che i canali di raffreddamento dello stampo sono stati posizionati proprio dietro la cavità. Questo accorgimento ha permesso di raffreddare più rapidamente lo stampo, ma non ha permesso la creazione di un sistema di estrazione: per questo motivo l'estrazione dei pezzi è stata eseguita manualmente, portando ad un ulteriore allungamento del tempo ciclo. Inoltre lo stampo era composto da una sola cavità. La presenza di più cavità avrebbe concesso una riduzione dei tempi ciclo.

Si noti però che le dimensioni suggerite sono quelle relative alla cavità dello stampo. In realtà bisogna considerare un eventuale ritiro del materiale che comporta una diminuzione delle dimensioni del provino. Per questo motivo è stato necessario misurare le dimensioni dei provini dopo lo stampaggio.

Sono stati stampati circa 90 provini e sono stati misurati tutti i provini utilizzati per eseguire i test di trazione. Si è potuto notare che le dimensioni erano particolarmente ripetibili e le differenze tra un provino e l'altro non erano apprezzabili utilizzando un calibro centesimale.

Le dimensioni rilevate sono le seguenti:

- $l_3 = 139.25 \text{ mm}$
- $l_1 = 59.6 \text{ mm}$
- $l_2 = 89.65 \text{ mm}$
- $b_1 = 9.9 \text{ mm}$
- $b_2 = 19.85 \text{ mm}$
- $h = 4.15 \text{ mm}$

Si consideri però che, a causa dei bordi arrotondati, non è possibile determinare precisamente le dimensioni l_1 e l_2 .

Per determinare le proprietà tensili del materiale sono stati eseguiti i test di trazione su 6 provini in PBT/PC. Di ciascun provino è stata misurata la larghezza e lo spessore in 3 punti differenti del tratto utile, al fine di verificare la costanza della sezione ed eventualmente individuare la sezione minima. È stato verificato che la sezione è costante lungo il tratto utile per ciascun provino e che il suo valore è costante anche tra un provino e l'altro. Le dimensioni della sezione utile sono riportate in tabella (3).

Lunghezza	59.6	mm
Larghezza	9.9	mm
Spessore	4.15	mm
Area utile	41.085	mm ²

Tabella 3 - dimensioni della sezione utile e del tratto utile

Le prove di trazione sono state eseguite tutte alla velocità di 5 mm/min in quanto prove preliminari avevano mostrato uno scarso allungamento a rottura (nell'ordine di qualche millimetro). Infatti alla velocità di 5 mm/min si ottiene la rottura nell'intervallo di tempo compreso tra 30 secondi e 5 minuti, proprio come suggerisce la normativa per evitare problematiche legate al coinvolgimento del fenomeno del creep o del rilassamento delle tensioni che potrebbero influenzare i risultati.

La procedura seguita per il fissaggio del provino è la stessa che si è utilizzata nel caso dei provini ritagliati.

A questo punto è possibile quindi riportare i risultati ottenuti seguiti poi da commenti.

RISULTATI PROVINI STAMPATI

Si riportino di seguito le curve di trazione ottenute per ogni provino stampato.

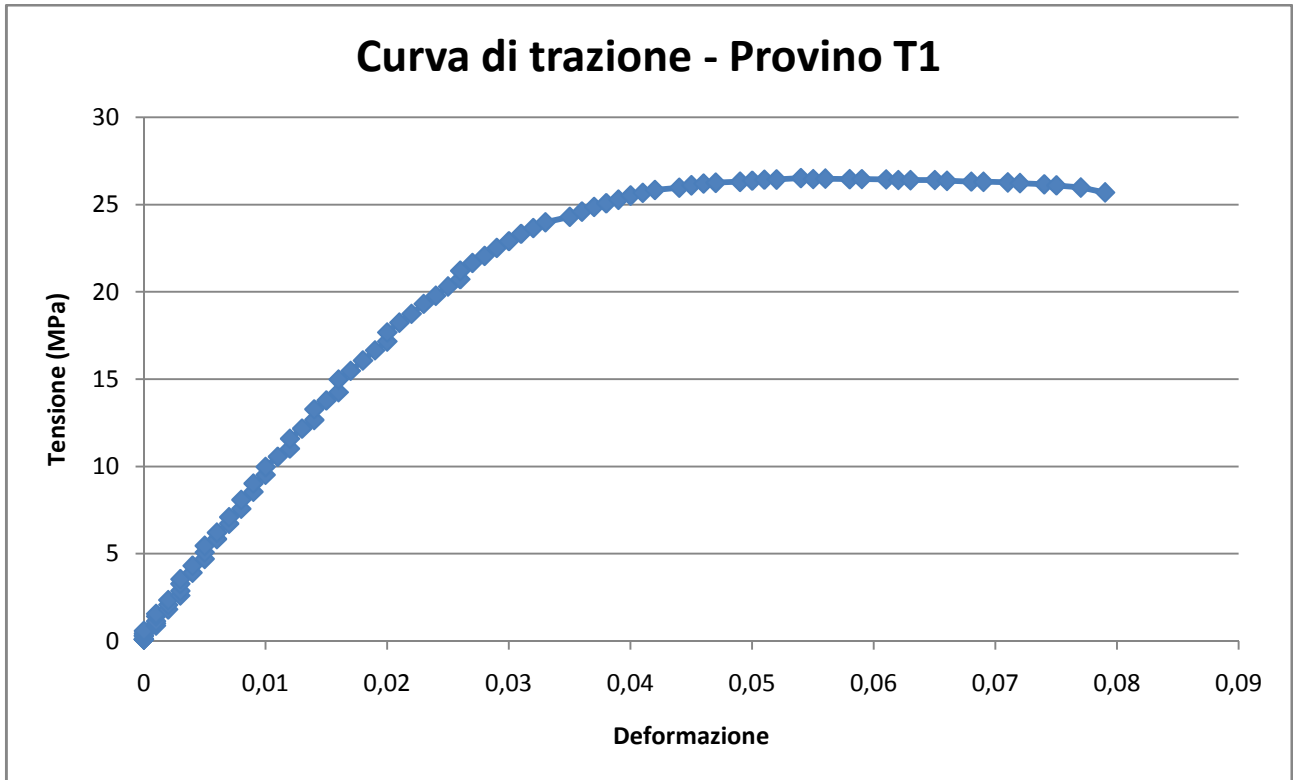


Figura 2 - curva sforzo deformazione provino stampato T1 in PBT/PC

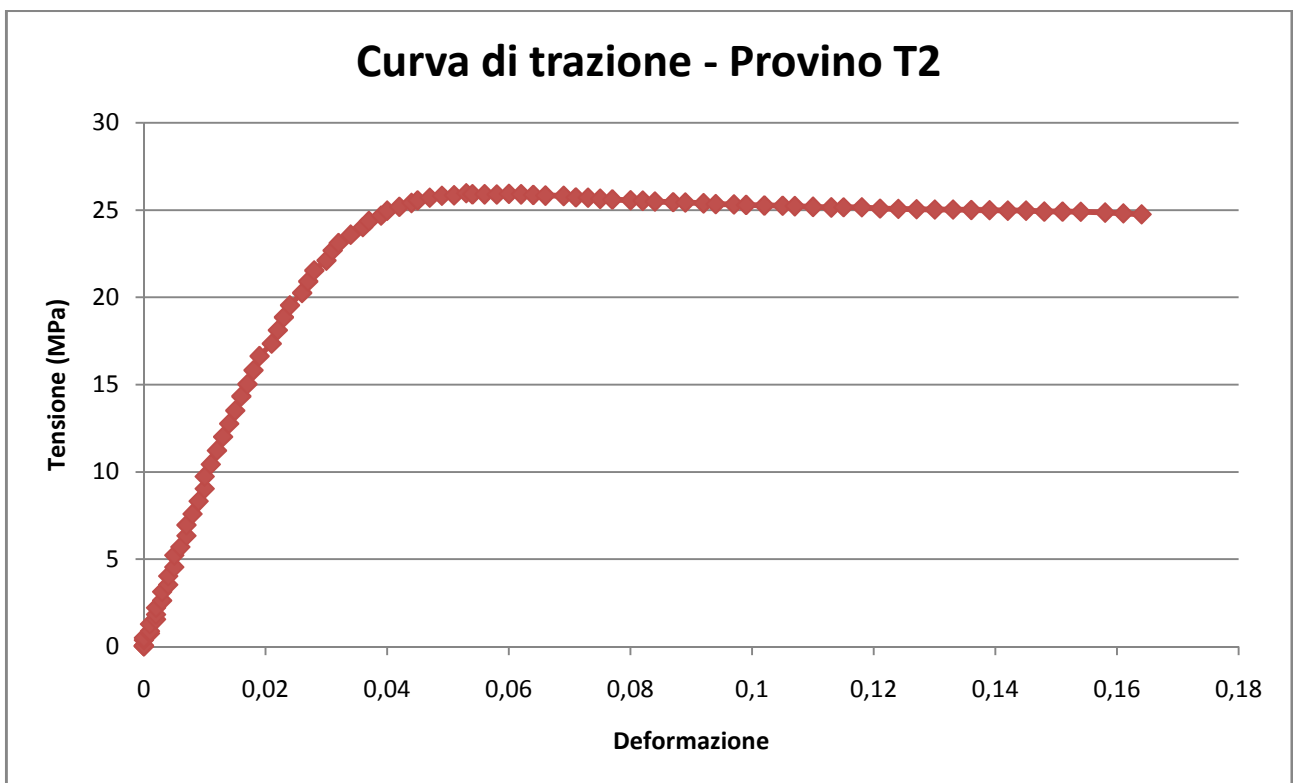


Figura 3 - curva sforzo deformazione provino stampato T2 in PBT/PC

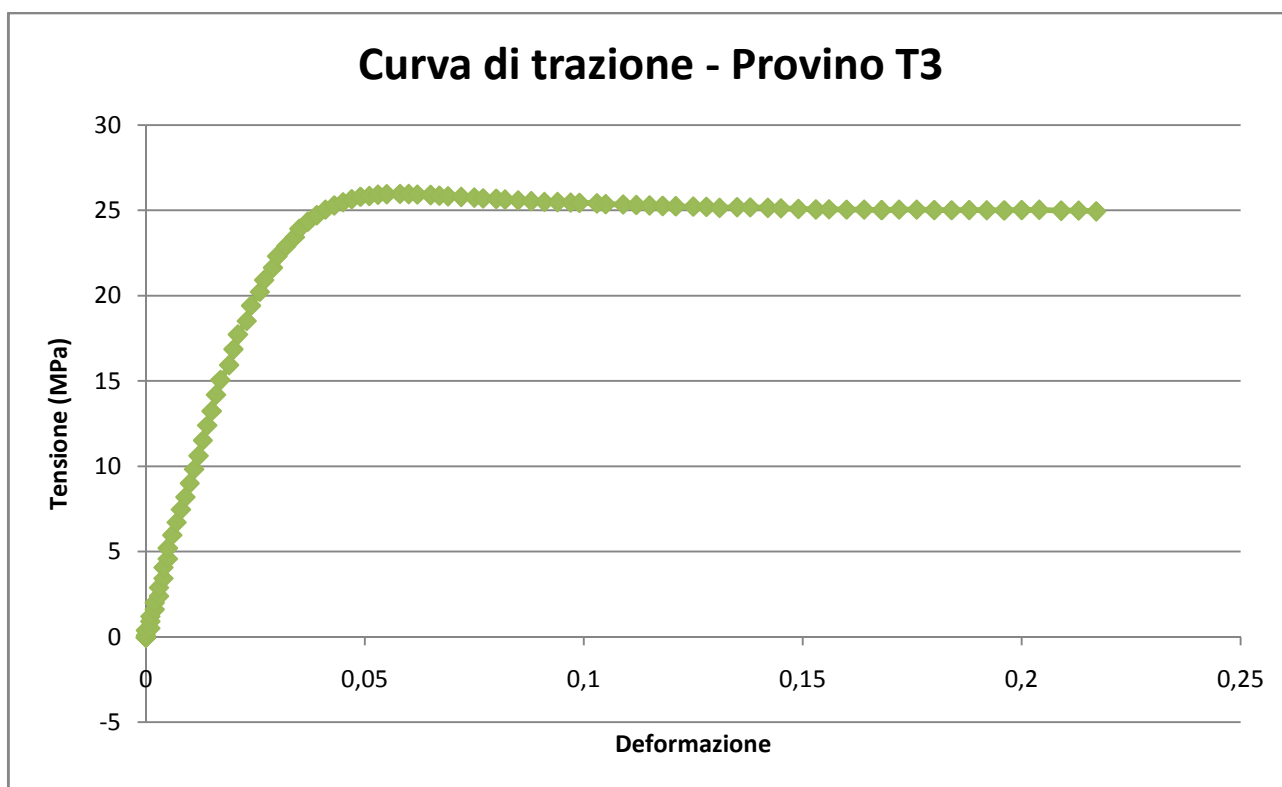


Figura 4 - curva sforzo deformazione provino stampato T3 in PBT/PC

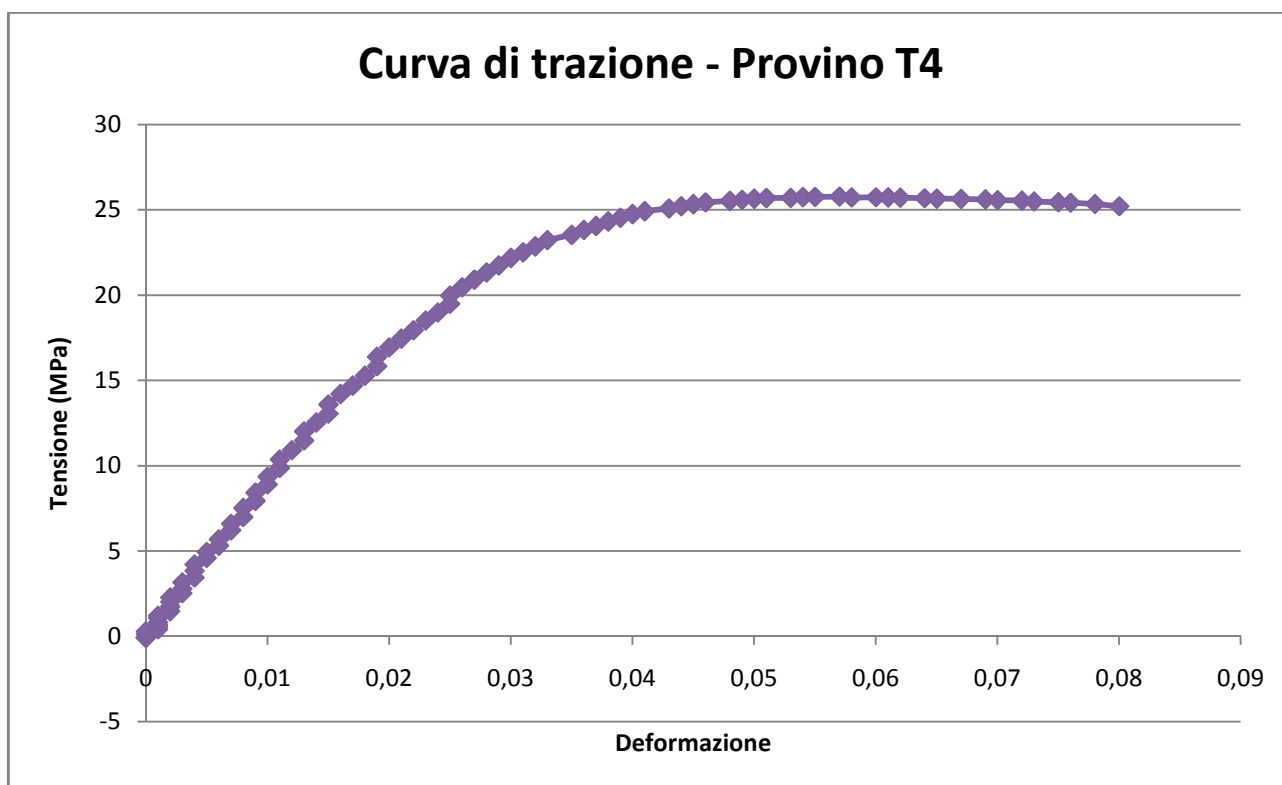


Figura 5 - curva sforzo deformazione provino stampato T4 in PBT/PC

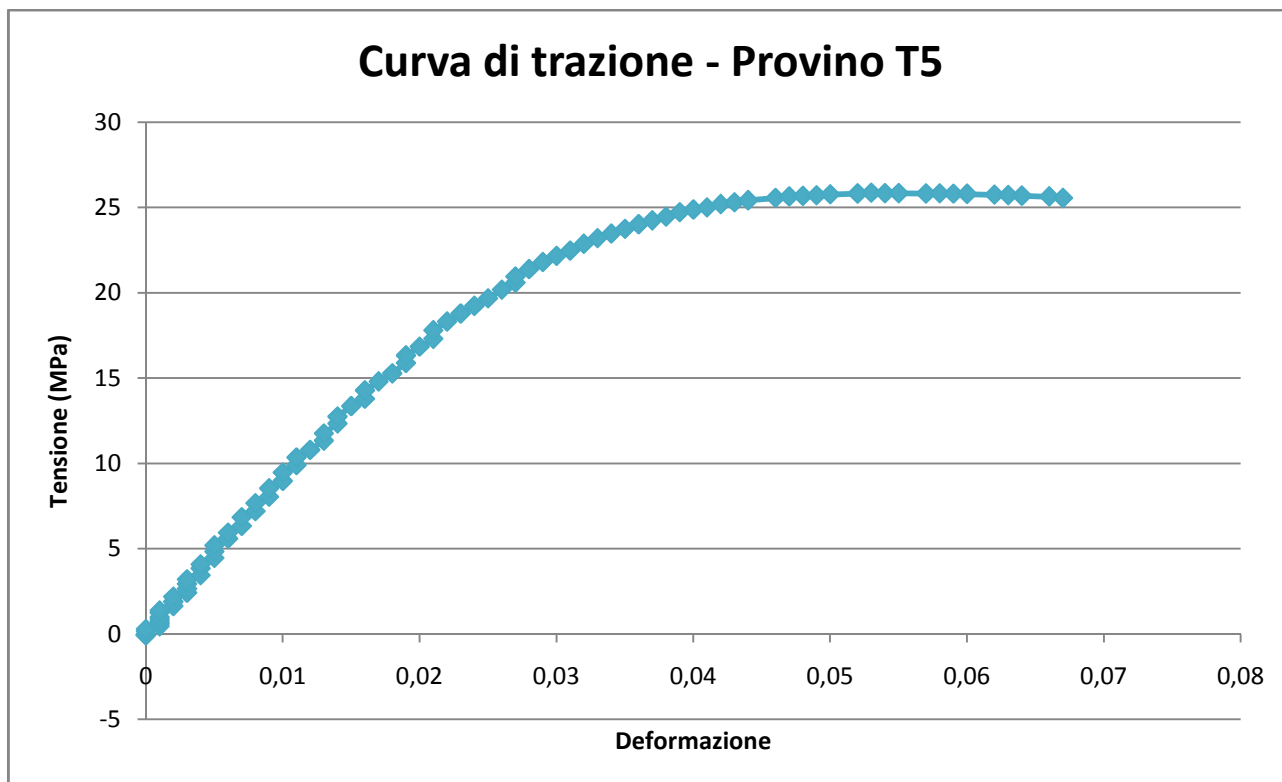


Figura 6 - curva sforzo deformazione provino stampato T5 in PBT/PC

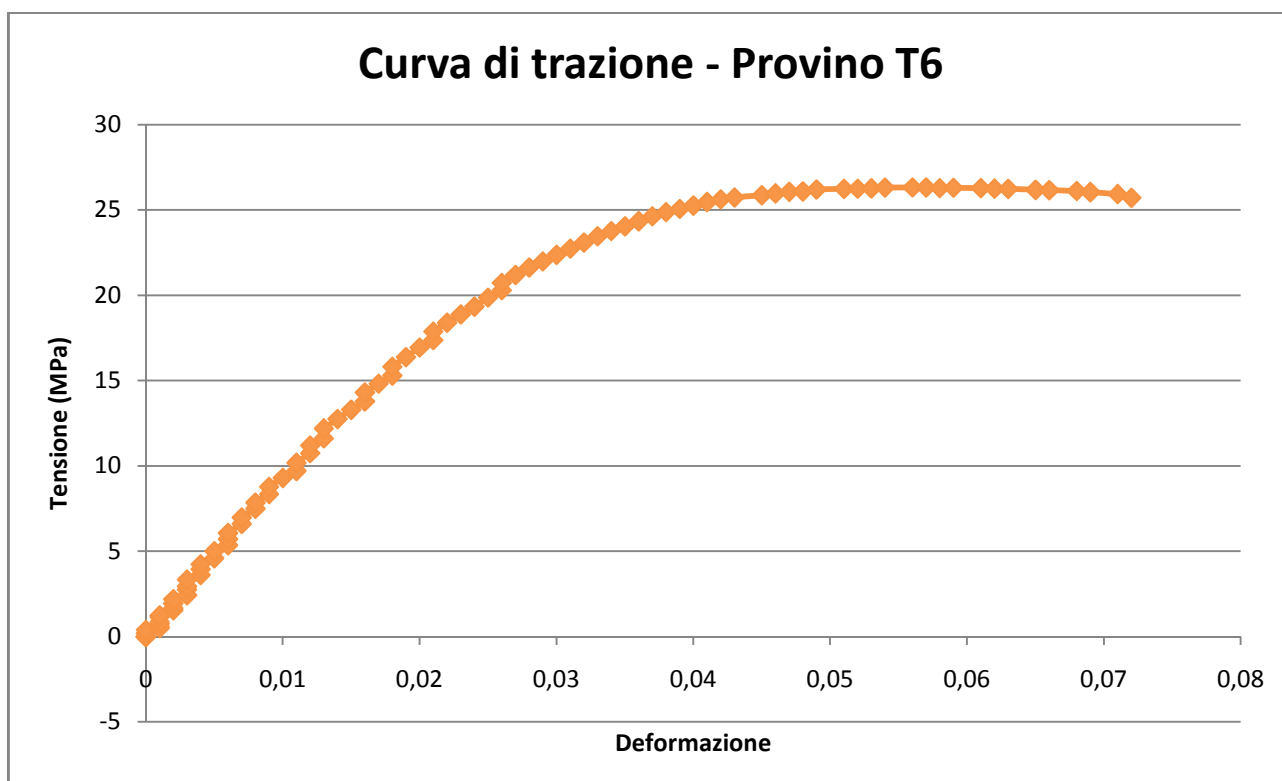


Figura 7 - curva sforzo deformazione provino stampato T6 in PBT/PC

Si ricavino ora dei valori medi dei parametri caratteristici ottenuti dalle prove di trazione. Questi parametri sono il carico e l'allungamento di snervamento, il carico e l'allungamento a rottura e il modulo di Young. Quest'ultimo è stato rilevato per verificarne il valore medio, ma il suo valore non si

può ritenere attendibile a causa dell'errata misurazione dell' allungamento: infatti per avere una misurazione adeguata dell'allungamento sarebbe necessario utilizzare un estensometro. In questo modo verrebbe valutato l'allungamento del solo tratto utile, senza coinvolgere altri contributi di allungamento che potrebbero verificarsi in prossimità delle estremità del provino.

I valori medi sono riportati in tabella (4).

	SNERVAMENTO		ROTTURA		Modulo elastico (MPa)
	Deformazione	Tensione (MPa)	Deformazione	Tensione (MPa)	
Provino T1	0.054	26.508	0.079	25.692	997
Provino T2	0.053	25.962	0.164	24.753	983
Provino T3	0.058	25.952	0.217	24.937	983.46
Provino T4	0.057	25.763	0.08	25.204	988
Provino T5	0.053	25.855	0.067	25.55	993
Provino T6	0.056	26.308	0.072	25.707	967
Valori medi	0.055167	26.058	0.113167	25.30717	985.2433
Deviazione standard	0.002137	0.287641	0.062384	0.405388	10.4596
Deviaz. Stand. Percentuale	3.873	1.103	55.18	1.601	1.061

Tabella 4 - valori dei parametri caratteristici delle prove di trazione eseguite sui provini stampati.

COMMENTI e OSSERVAZIONI

Si noti innanzitutto che sulla superficie di rottura di ogni provino è presente una cavità. Queste cavità differiscono l'una dall'altra per dimensioni e geometria. Potrebbe essere interessante analizzare l'influenza di queste caratteristiche sui risultati ottenuti dalle prove di trazione. Inoltre per osservare meglio le cavità e valutarne le caratteristiche si utilizzi un microscopio ottico OPTIKA MICROSCOPES dotato di una videocamera USB MOTICOM 1000 da 1.3 Megapixel per fotografare l'ingrandimento della superficie di rottura.

Analizzando i dati riportati in tabella (4), si può osservare che la dispersione dei dati è particolarmente bassa per tutti i parametri tranne che per l'allungamento a rottura. Probabilmente è questo il parametro che più viene influenzato dalla presenza e dalla forma delle cavità. Infatti sia la tensione di snervamento sia l'allungamento a snervamento mostrano dei valori molto ripetibili (deviazione standard piccola), come pure la tensione di rottura. L'allungamento a rottura ha una deviazione standard percentuale pari al 55% circa.

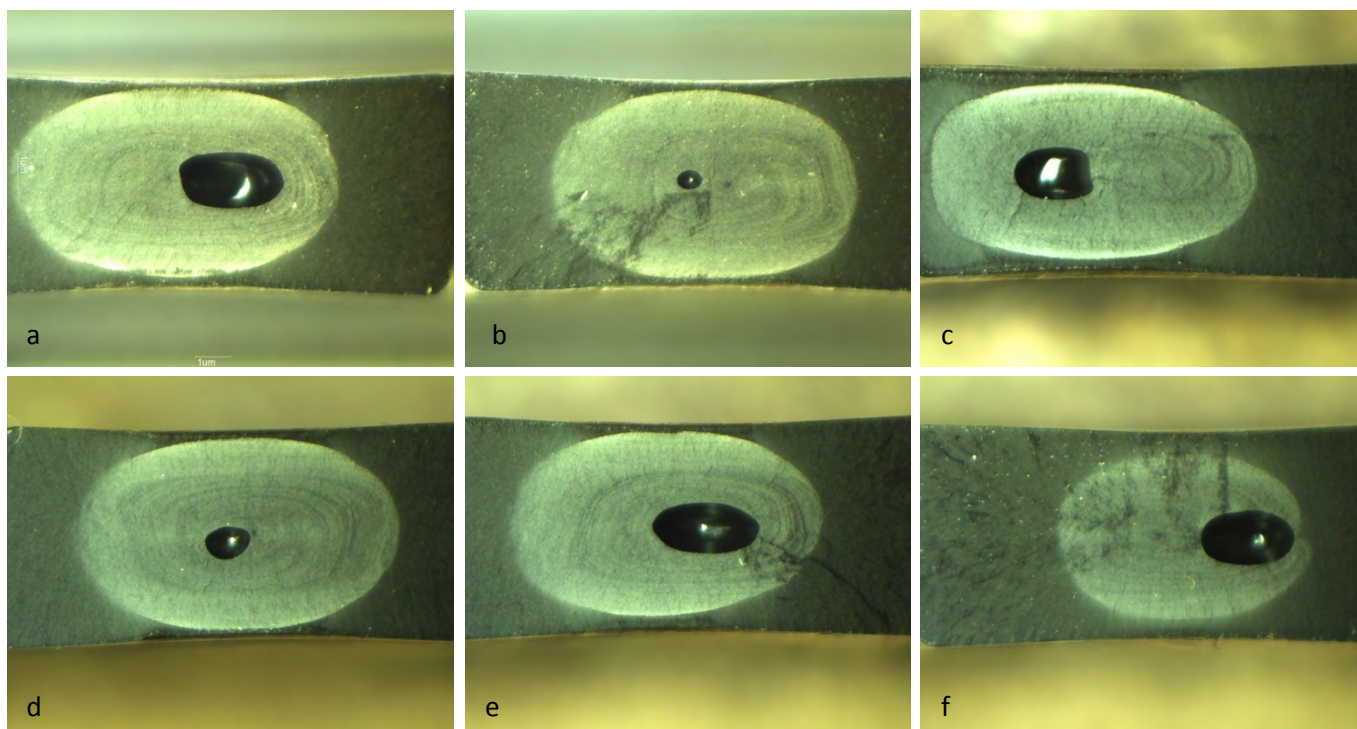


Figura 8 - fotografia a 35X ingrandimenti con microscopio ottico equipaggiato con videocamera USB. Si riportino le immagini delle superfici di frattura dei provini T1 (a), T2 (b), T3 (c), T4 (d), T5 (e) e T6 (f).

Inoltre è possibile determinare l'area occupata da ciascuna cavità sulla sezione utile. Per fare questo si sfrutta il software "Motic Images Plus 2.0" fornito insieme al sistema microscopio-videocamera. Si consideri l'immagine acquisita e si eseguano le seguenti operazioni:

1. si tracci un primo segmento per individuare lo spessore centrale del provino dopo frattura. Questo valore virtuale viene espresso in u.m. (unità di misura), e il valore reale è noto in quanto è stato misurato con un calibro. In questo modo è possibile determinare il coefficiente

di conversione $u.m. \rightarrow mm$. Per fare questo si osservi la figura (9), e sapendo che il valore reale dello spessore è s ,

$$1 u.m. = \frac{s}{L_1} mm$$

Equazione 81 - conversione u.m. in mm.

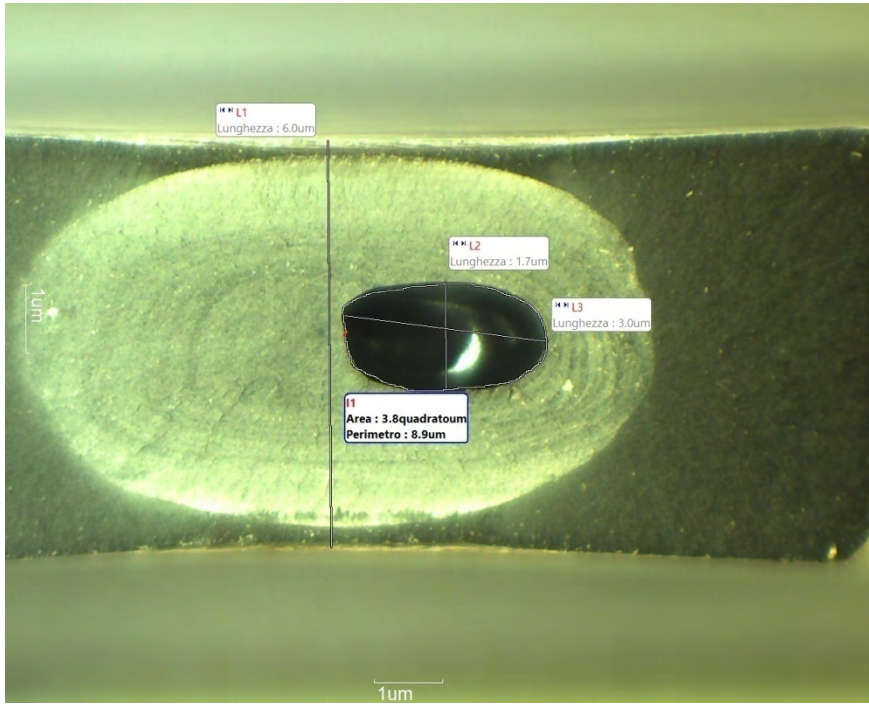


Figura 9 - Misure: spessore provino, lunghezza, larghezza e area della cavità.

2. a questo punto, essendo noto il coefficiente di conversione è possibile determinare il valore dell'area della sezione della cavità, così da valutare la diminuzione di sezione dovuta alla sua presenza.

Questo procedimento può essere interessante per verificare l'effetto delle cavità nel comportamento del creep a rottura.

In base a quanto visto dalle foto delle superfici di frattura è possibile trarre delle conclusioni, cercando di correlare qualitativamente i risultati sperimentali con le conformazioni delle cavità.

Una verifica importante da fare è quella di determinare se la cavità è presente prima della prova di trazione oppure se essa si genera proprio durante la prova. Per dare una risposta a questo quesito si è sezionata una serie di provini longitudinalmente per determinarne la presenza. Su 4 provini esaminati la cavità è stata individuata solamente su uno, come si può vedere in figura (10). In figura la cavità si riconosce in quanto la mancanza di fuoco all'interno della cavità indica la presenza di profondità di

fondo cavità. Questo perché nel procedimento di taglio del provino probabilmente, per effetto della plasticità del materiale, esso si deforma non permettendo di riconoscere le cavità più piccole.

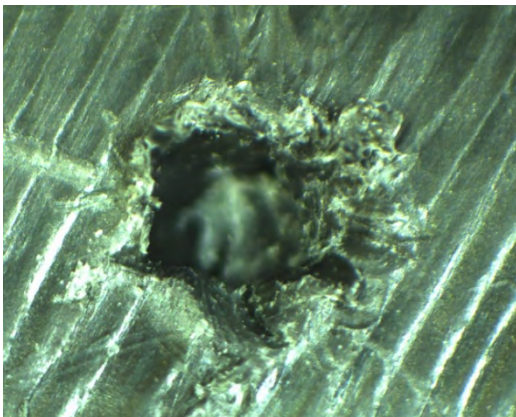


Figura 10 - cavità in provino sezionato (ingrandimento 200X)

Si riportino in figura (11), in un unico diagramma, le curve di trazione ottenute.

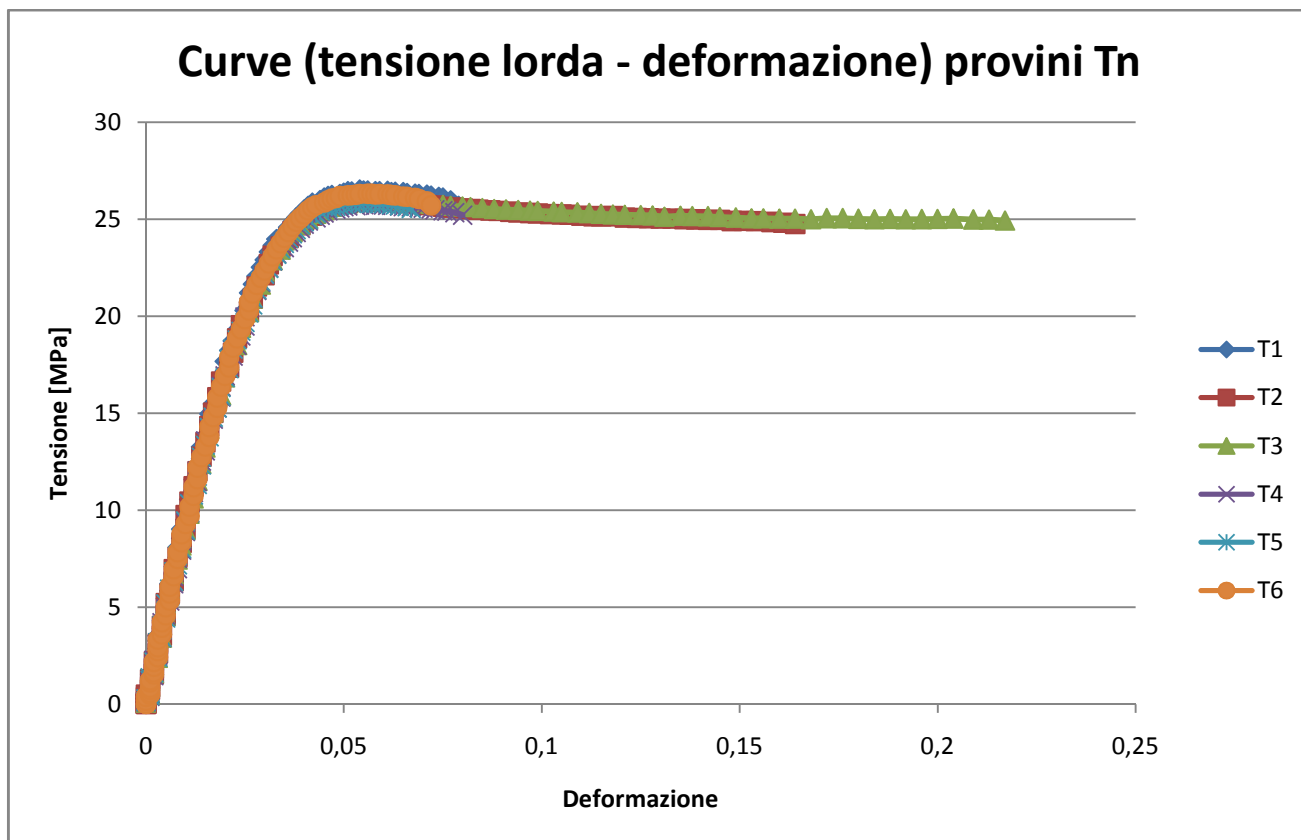


Figura 11 - Diagramma tensione deformazione di confronto tra le prove di trazione di tutti i provini della serie Tn stampati con tensioni lorde.

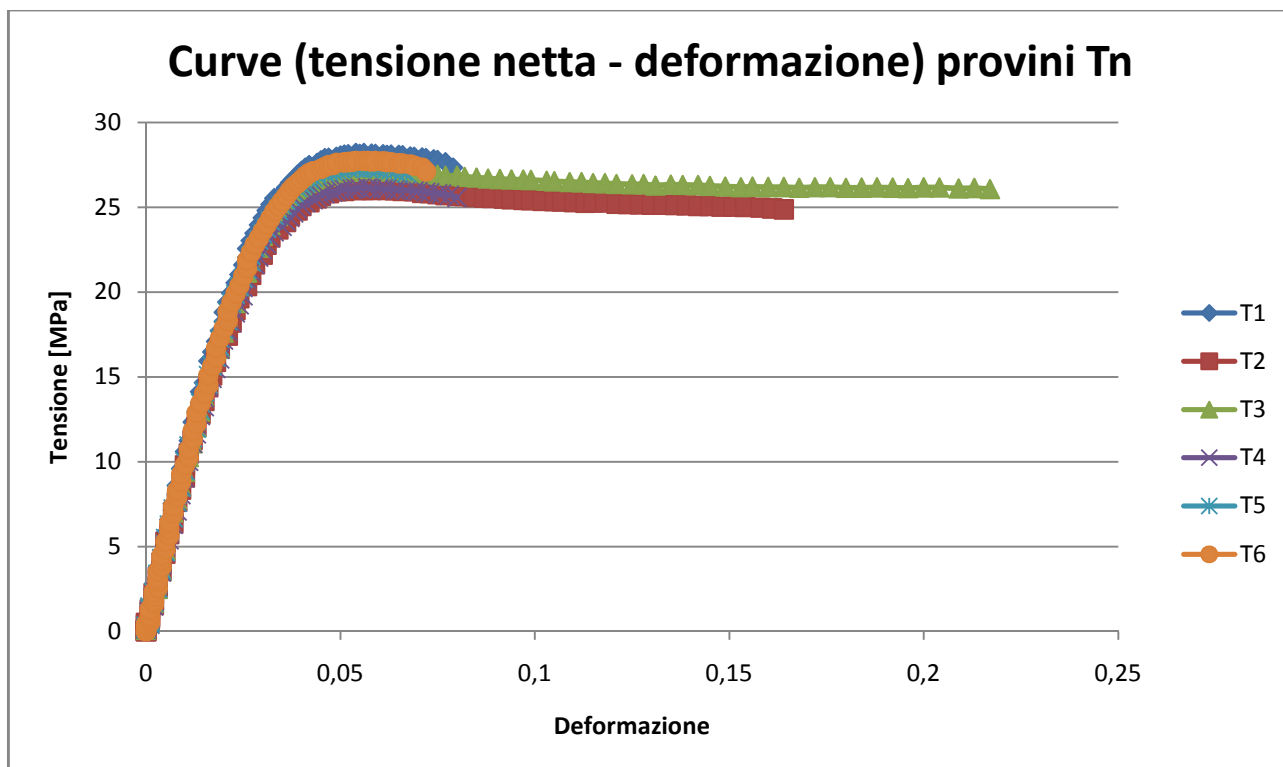


Figura 12 - Diagramma tensione deformazione di confronto tra le prove di trazione di tutti i provini della serie Tn stampati con tensioni al netto della cavità presente sulla superficie.

Mentre in figura (12) si riportino le curve tensione deformazione, considerando la presenza della cavità sulla superficie della sezione di frattura del provino. Si noti che sono presenti delle differenze sostanziali riguardo la tensione di snervamento. Per questo motivo si decida di considerare i dati dei test considerando la presenza della cavità, in quanto la sua presenza non è trascurabile. Si riportino di seguito i risultati aggiornati al netto della sezione.

	SNERVAMENTO		ROTTURA		Modulo elastico (MPa)
	Deformazione	Tensione (MPa)	Deformazione	Tensione (MPa)	
Provino T1	0.054	28.204	0.079	27.336	997
Provino T2	0.053	26.086	0.164	24.872	983
Provino T3	0.058	27.136	0.217	26.074	983.46
Provino T4	0.057	26.137	0.08	25.569	988
Provino T5	0.053	27.35	0.067	27.35	993
Provino T6	0.056	27.738	0.072	27.104	967
Valori medi	0.055167	27.10831	0.113167	26.3304	985.2433
Deviazione standard	0.002137	0.85364	0.062384	0.98661	10.4596
Deviaz. Stand. Percentuale	3.873	3.149	55.18	3.74704	1.061

Tabella 5 - valori dei parametri caratteristici delle prove di trazione eseguite sui provini stampati al netto della cavità presente nella sezione di frattura.

I fattori che possono influenzare l'allungamento a rottura sono i seguenti:

- la presenza di una cavità;
- la dimensione della cavità;
- la geometria e la forma della cavità.

Si noti innanzitutto che i provini che hanno raggiunto un allungamento a rottura maggiore sono stati il T2 e il T3. Mentre per il T2 l'allungamento è da imputare principalmente alla dimensione ridotta della cavità, per il T3 la questione è più complessa da interpretare. Questo risultato, date le dimensioni generose della cavità è da attribuire più alla forma della cavità. Infatti in questo caso la cavità ha una forma a "D" e probabilmente a causa del lato verticale il coefficiente di intaglio generato è piccolo e la frattura non viene incentivata.

Osservando il provino T4 ci si sarebbe aspettati un allungamento a rottura maggiore. Questo probabilmente non è potuto accadere a causa della forma "schacciata" in direzione trasversale: si è generato un coefficiente di intaglio elevato che ha favorito la frattura del pezzo. Infine si osservi che la cavità del provino T5 è di dimensioni generose e soprattutto che ha una forma schiacciata. In base a queste caratteristiche ci si aspetta un allungamento a rottura particolarmente limitato. Infatti guardando il diagramma di figura (11) si può apprezzare che questo provino è stato quello caratterizzato dal minore allungamento a rottura.

Riassumendo dunque la resistenza a rottura è influenzata dalla cavità e dalla sua forma e dimensione, mentre i parametri di snervamento non sembrano essere intaccati dalla cavità.

Generazione della cavità - Possibili cause

La causa più probabile è quella relativa all'utilizzo di parametri di stampaggio non adeguati al tipo di materiale, oppure ad un disegno di un gate eccessivamente stretto.

È possibile che la pressione di impaccamento all'interno dello stampo non fosse adeguata per il processo eseguito, lasciando così la possibilità di formare una cavità di ritiro nel cuore del provino. Un altro problema potrebbe essere quello legato alle dimensioni del gate. Infatti un gate eccessivamente ristretto potrebbe portare ad un congelamento prematuro del materiale non permettendo un adeguato sovrimpaccamento.

Un altro parametro errato potrebbe essere stata la temperatura: una temperatura non adatta potrebbe infragilire il materiale.

CONFRONTO: PROVINI RITAGLIATI vs PROVINI STAMPATI vs DATA SHEET

Si riportino di seguito in tabelle (6, 7, 8) i valori significativi ottenuti con i provini tagliati, quelli ottenuti dai provini stampati e i valori presenti nella scheda tecnica del materiale.

	SNERVAMENTO		ROTTURA		Modulo elastico (MPa)
	Deformazione	Tensione (MPa)	Deformazione	Tensione (MPa)	
Provino 1	0.055	35.514	0.219	31.436	1155.9
Provino 2	0.065	32.452	1.773	27.51	981.13
Provino 3	0.058	31.866	0.408	26.291	844.3
Provino 4	0.06	31.014	0.404	25.824	854.23
Provino 5	0.053	34.49	0.192	29.01	1022
Provino 6	0.06	34.113	0.212	29.53	914.05
Provino 7	0.054	31.878	0.203	26.877	978.69
Provino 8	0.088	29.115	0.33	26.822	763.87
Provino 9	0.08	31.82	2.96	31.77	793.11
Valori medi	0.063	32.473	0.744	28.341	923.031
Deviazione standard	0.012	1.954	0.969	2.204	124.358
Deviaz. Stand. Percentuale	19.252	6.018	130.263	7.778	13.472

Tabella 6 - parametri tensili dei provini ritagliati in PBT/PC

	SNERVAMENTO		ROTTURA		Modulo elastico (MPa)
	Deformazione	Tensione (MPa)	Deformazione	Tensione (MPa)	
Provino T1	0.054	28.204	0.079	27.336	997
Provino T2	0.053	26.086	0.164	24.872	983
Provino T3	0.058	27.136	0.217	26.074	983.46
Provino T4	0.057	26.137	0.08	25.569	988
Provino T5	0.053	26.35	0.067	27.35	993
Provino T6	0.056	27.738	0.072	27.104	967
Valori medi	0.055167	27.10831	0.113167	26.3304	985.2433
Deviazione standard	0.002137	0.85364	0.062384	0.98661	10.4596
Deviaz. Stand. Percentuale	3.873	3.149	55.18	3.74704	1.061

Tabella 7 - parametri tensili dei provini stampati in PBT/PC

PIBITER HI A1301		
Tensione di snervamento	35	MPa
Tensione di rottura	32	Mpa
Deformazione a rottura	>200	%

Tabella 8 - parametri tensili della scheda tecnica in PBT/PC

Osservando attentamente i risultati ottenuti nelle diverse prove e confrontandoli con i valori suggeriti dal data sheet bisogna fare delle considerazioni per poter scegliere se eseguire i test a creep sui provini stampati o sui provini ritagliati.

I fattori che ne influenzano la scelta sono i seguenti:

1. coerenza dei risultati sperimentali con i valori proposti dalla scheda tecnica;
2. buona ripetibilità dei risultati tra una prova e l'altra;
3. numero di provini a disposizione per eseguire i test.

Fattore 1: In base a questo fattore si noti che i risultati ottenuti con i provini ritagliati forniscono dei risultati molto vicini a quelli riportati nella scheda tecnica del materiale. Per quanto riguarda i provini stampati invece i valori sono sensibilmente diversi da quelli proposti nella scheda tecnica. La causa principale di questo problema è da ricercare probabilmente in un processo di stampaggio eseguito con parametri non adeguati al tipo di materiale. Infatti, nel caso in cui la pressione di impaccamento oppure la temperatura del materiale non fossero corrette, c'è il rischio che si siano generate delle tensioni interne nel pezzo che abbiano portato a raggiungere livelli di carico di snervamento sensibilmente inferiori a quelli attesi.

Fattore 2: Da questo punto di vista sono sicuramente apprezzabili i risultati ottenuti dai test sui provini stampati. In questo caso infatti la deviazione standard, a parte quella dell'allungamento a rottura, negli altri casi i valori sono molto bassi dimostrando un'elevata ripetibilità. Invece nel caso di provini ritagliati la ripetibilità non è assolutamente garantita in quanto i valori di deviazione standard percentuale è troppo elevata: questo indica una grande variabilità dei risultati, che implica una scarsa affidabilità nella replicazione delle prove.

Fattore 3: Nel caso di provini stampati se ne hanno a disposizione all'incirca 60, mentre nel caso di provini ritagliati se ne possono ricavare al massimo 24 provini. In questo caso sono sicuramente favoriti i provini stampati.

Alla luce delle considerazioni appena fatte si decide di proseguire l'analisi a creep con i provini stampati in quanto un comportamento ripetibile come quello garantito da questa tipologia permette di ottenere dei risultati meno inquinati da variabili. Inoltre si è visto che la presenza delle cavità non influenza il comportamento del materiale al di sotto della tensione di snervamento, valore al di sotto del quale si rimarrà per studiare il creep. Successivamente si cercherà di determinare l'influenza delle cavità sul comportamento del creep a rottura.

CREEP A ROTTURA - TEST

Si eseguano ora delle prove di rottura a creep. L'obiettivo di questi test è quello di raccogliere dati sul tempo necessario affinché il materiale arrivi a cedimento durante una prova di creep. Lo scopo del lavoro è indagare il comportamento a creep per carichi molto elevati e quindi per tempi di cedimento relativamente brevi.

Il carico di snervamento per i provini è stato determinato precedentemente con una serie di prove di trazione. E per ottenere dei risultati corretti si eseguano più prove per ogni livello di carico. Una complicazione si ha però a causa della presenza della cavità all'interno del provino. Infatti la sua presenza, dimensione e forma può influenzare sensibilmente i risultati. Sarà quindi necessario valutare queste differenze e cercare di trovare una correlazione tra il cedimento a creep e le caratteristiche delle cavità.

Per eseguire le prove di rottura a creep si faccia riferimento ai suggerimenti dati dalla normativa ASTM D-2990.

SCELTA DEL PROVINO

La tipologia del provino scelta alla fine è quella dei provini stampati e caratterizzati dalla forma e dalla dimensione suggerita dalla norma ISO 527-1. Questi provini, rispetto a quelli ritagliati direttamente dal feltro, hanno dimostrato una maggiore ripetibilità dei risultati e se ne ha a disposizione un numero adeguato per eseguire tutte le prove e fare dei test preliminari per determinare il setting corretto della macchina UTM per l'esecuzione di creep test a rottura.

Sulla base dei test di trazione eseguiti sono stati individuati i seguenti valori relativi allo snervamento e alla rottura:

	SNERVAMENTO		ROTTURA		Modulo elastico (MPa)
	Deformazione	Tensione (MPa)	Deformazione	Tensione (MPa)	
Valori medi	0.055167	27.10831	0.113167	26.3304	985.2433
Deviazione standard	0.002137	0.85364	0.062384	0.98661	10.4596
Deviaz. Stand. Percentuale	3.873	3.149	55.18	3.74704	1.061

Tabella 1 - Valori medi ricavati da prove di trazione su sei provini in PBT/PC.

In base a questi valori, e conoscendo la sezione del provino, posso determinare la forza per portare a snervamento il provino. Questo valore viene preso come riferimento per i test di rottura a creep: infatti si parte da questo valore e si scende finché la durata del test non arriva ad essere intorno alle 10 ore.

Il valore della forza di snervamento ottenuto è quindi:

$$F_s = \sigma_s \cdot A_{sez}$$

Equazione 1 - forza di snervamento in funzione della sezione utile

Quindi, sapendo che:

- $\sigma_s = 26,058 \text{ MPa}$
- $A_{sez} = 41,085 \text{ mm}^2$

La forza massima applicabile è:

$$F_s = \sigma_s \cdot A_{sez} = 1070,59 \text{ N}.$$

APPARATO SPERIMENTALE

L'apparato sperimentale dal punto di vista fisico-hardware, è del tutto uguale a quello utilizzato per i test di trazione. L'unica variante è dal punto di vista software: infatti per l'acquisizione dei dati e il comando della macchina UTM si utilizza il software Labview, ma con una sequenza di operazioni differente da quella proposta per i test precedenti. Inoltre c'è una sostanziale differenza nell'analisi dei risultati; in questo caso infatti viene utilizzato un altro software sviluppato sempre dall'ing. Zonato Alberto. Questo applicativo si chiama appunto "Creep.exe" e permette di ricavare, dato il file .tdms, le curve della forza e dell'allungamento in funzione del tempo della prova.

A differenza dei test eseguiti precedentemente in cui si avviava una prova automatica di trazione, in questo caso è stata seguita una metodologia differente. Ora si imposti un valore di controllo PID (Proportional - Integrative - Derivative) per il carico percepito dalla cella di carico. Assumendo un controllo di forza diverso di zero, l'elaboratore genererà degli spostamenti della vite in modo tale che la cella di carico percepisca sempre un valore di carico prossimo a quello assunto. Dopo diverse prove preliminari si è giunti ad un setting dei valori di PID idoneo al nostro scopo. Nella fase iniziale del test di rottura a creep si utilizzino dati di PID differenti rispetto alla seconda fase in quanto nella fase iniziale si desidera che la forza obbiettivo venga raggiunta il più velocemente possibile, mentre le variazioni intorno al valore obbiettivo, una volta raggiunto (inizio seconda fase), non devono essere eccessivamente ampie. I valori di PID scelti sono riportati nella seguente tabella.

PRIMA FASE - Carico crescente			
PID gain		Output range	
Proportional gain (Kc)	20.0	Output high	2000 tick/s
Integral time (Ti)	0.0 min	Output low	-2000 tick/s
Derivative time (Td)	0.0 min		
SECONDA FASE - Carico costante			
PID gain		Output range	
Proportional gain (Kc)	0.7	Output high	2000 tick/s
Integral time (Ti)	0.0 min	Output low	-2000 tick/s
Derivative time (Td)	0.0 min		

Tabella 2 - valori di PID impostati per le diverse fasi di un test di rottura a creep

Un valore elevato del fattore Kc permette di raggiungere molto velocemente la forza obbiettivo, così da ridurre al minimo il transitorio. È però necessario dare un limite alla velocità con cui si allunga il

provino: un allungamento troppo rapido potrebbe portare al cedimento prematuro del materiale. Per controllare la velocità quindi si imposti il valore "output range high" a 2000 tick/s, il quale, in seguito a prove di verifica, si è dimostrato essere un buon compromesso. Mantenere un valore elevato del Kc una volta raggiunta la forza obbiettivo è una scelta sbagliata in quanto il controllo cercherebbe di fare delle grandi correzioni intorno al valore obbiettivo, quando invece ne sarebbero sufficienti di piccolissime, generando delle forti ascillazioni di forza e grandi spostamenti. Per questo motivo il valore Kc viene ridotto drasticamente una volta raggiunto il valore obbiettivo della forza.

Dato che le prove a creep sono di lunga durata e non è possibile garantire un monitoraggio della macchina continuo da parte dell'operatore, c'è il rischio che in caso di rottura la vite continui a traslare verso l'alto portando ad una mancanza di sicurezza. Questo avviene perché, una volta fissato un valore di carico a cui deve tendere la cella, il controllo della macchina UTM cercherà di allungare il provino per innalzare il livello di carico agente su di esso. Se il provino si rompe quindi, il controllo cercherà di allontanare le morse senza arrestarsi. Per questo motivo è stato importante settare un valore di allungamento massimo come fine corsa della vite. Se infatti dovesse essere superato questo valore, il controllo della macchina verrebbe immediatamente disattivato impedendo così alla vite di andare a spostamenti che potrebbero portare a condizioni di scarsa sicurezza.

PROCEDURA SPERIMENTALE

Facendo riferimento alla normativa ASTM D-2990 si proponga una procedura sperimentale per determinare il tempo a rottura a creep per il materiale PIBITER® HI A1301 PBT/PC.

Si noti innanzitutto che non è possibile stabilire a priori i livelli di carico da applicare per le diverse prove. Volendo indagare il comportamento di rottura a creep per carichi molto elevati (prossimi a quello di snervamento) e per tempi di rottura limitati a 10 ore circa, si suggerisce di partire da una forza applicata molto vicina a quella di snervamento e quindi di procedere nel seguente modo:

	Carico
Provino C1	1050 N
Provino C2	1030 N
Provino C3	1010 N
Provino C4	975 N
Provino C5	950 N
Provino C6	925 N
Provino C7	900 N
Provino C8	875 N
Provino C9	850 N

Tabella 3 - sequenza di valori di carico applicati per i test di rottura a creep

Non è possibile stabilire a priori quanti e quali livelli di carico sono necessari. Per questo motivo si eseguono test a livelli di carico pari a quelli proposti nella tabella precedente fino a raggiungere le 10 ore di test. Qualora fosse necessario scendere al di sotto dei livelli di forza proposti, verranno aggiunti altri livelli in fase di test.

La procedura seguita per eseguire le prove è la seguente:

1. Si monti innanzitutto il provino sulla macchina UTM come è stato descritto nel capitolo dedicato alle prove di trazione sui provini ritagliati, facendo particolare attenzione all'allineamento del provino in direzione longitudinale rispetto all'asse di rotazione della vite.
2. Prima di serrare il provino si calcoli l'offset della forza cosicché, a macchina scarica, si abbia effettivamente il valore della forza pari a 0 N.
3. Una volta settato l'offset della forza si procede a serrare il provino impostando un controllo di forza a 0 N. In questo modo verranno effettuati degli spostamenti della vite in maniera automatica in modo tale che la cella di carico percepisca, con un certo grado di approssimazione, sempre un valore pari a 0 N.
4. Ora che il provino è stato opportunamente bloccato, facendo attenzione al corretto allineamento in direzione longitudinale, si proceda ad impostare il valore di "PID forza" da 0 N al valore della forza che si vuole mantenere durante la prova a creep e i corretti valori dei parametri di PID per ottimizzare il controllo di forza.
5. Prima di far partire la prova si imposti un valore proporzionale di PID pari a 20, in modo tale che la forza obbiettivo venga raggiunta il più velocemente possibile, entro i limiti di velocità impostati (2000 tick/s).
6. E si imposti un valore di sicurezza di fine-corsa, cosicché
7. Si faccia partire il creep test avviando la registrazione dei dati e azionando il controllo di forza.
8. Una volta raggiunto il valore di forza obiettivo si intervenga sul parametro Kc del PID portandolo a 0,7 così da rendere più stabile il controllo di forza intorno al valore obbiettivo.
9. A questo punto si lasci proseguire la prova fino alla rottura del provino.
10. Dopo la rottura del provino si arresti la registrazione e si annotino delle considerazioni sulla prova e sulla presenza e dimensioni della cavità su un file .doc.
11. Si ripetano le stese operazioni per ciascun livello di carico.

Alla fine della fase di test sono state eseguite tre serie di prove, per verificare la ripetibilità dei risultati. Inoltre nelle prime fasi sono stati eseguiti dei test preliminari per determinare il set-up della macchina più opportuno per questa tipologia di test.

ANALISI DEI DATI

Per analizzare i dati è stato utilizzato il software "Creep.exe", come precedentemente accennato. Il software riceve in input il file .tdms generato durante la prova di creep a rottura, e genera due curve in un grafico cartesiano: la prima curva è quella relativa alla forza applicata in funzione del tempo, mentre la seconda curva riporta l'andamento della deformazione in funzione del tempo. Quest'ultima curva rappresenta la tipica curva di creep.

Una volta plottate le due curve, queste vengono esportate sottoforma di dati in un file excel. I dati presenti in ogni file generato contengono:

- Una colonna relativa al tempo, in secondi;
- Una colonna relativa all'allungamento, in millimetri;
- Una colonna relativa alla forza, in Newton.

Si consideri che la frequenza di acquisizione dei dati riportati nel foglio excel è di 100 Hz per le prove di durata più breve (tempi inferiori all'ora) e di 10 Hz per le prove più lunghe (più di un'ora). Ciò vuol dire che per ogni secondo di test si hanno a disposizione 100 oppure 10 dati di allungamento e forza.

A questo punto è necessario passare al valore di tensione e a quello di deformazione. Per fare questo è necessario considerare la sezione del provino e la lunghezza iniziale del tratto utile, in quanto i valori di tensione e deformazione ingegneristica sono dati rispettivamente dalle seguenti formule:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Bisogna però fare attenzione ad un fatto molto importante: come si era già notato nel caso dei test di trazione i provini a disposizione sono contraddistinti dalla presenza al loro interno di cavità (bolle d'aria) che si palesano alla fine del test in corrispondenza delle sezioni di frattura. Il fatto che si presentino in questa posizione fa supporre che il provino si sia rotto proprio in prossimità della sezione minima. È quindi necessario considerare l'estensione della cavità per calcolare la tensione nel componente in corrispondenza della sezione netta.

Per misurare l'area della cavità sono state eseguite le stesse operazioni fatte nel caso delle prove di trazione. È stato utilizzato un microscopio ottico dotato di videocamera usb, con la quale è stato possibile fotografare la cavità e, attraverso opportuni strumenti forniti dal software fornito insieme alla videocamera, misurarne l'area. In questo modo è stata ricavata l'area netta:

$$A_{netta} = A_{teorica} - A_{cavità}$$

Dove la $A_{teorica}$ corrisponde all'area data dal prodotto tra spessore e larghezza del tratto utile del provino.

Si riporti di seguito a titolo di esempio quello che è stato fatto per determinare l'area della sezione della cavità. Le operazioni sono state svolte nella stessa maniera anche per tutti gli altri provini, dove fosse presente una cavità.

Si prenda la foto della cavità a 35X e si eseguano le seguenti operazioni:

3. si tracci un primo segmento che individui lo spessore centrale del provino dopo frattura. Questo valore virtuale viene espresso in u.m. (unità di misura), e il valore reale è noto in quanto è stato misurato con un calibro. In questo modo è possibile determinare il coefficiente di conversione $u.m. \rightarrow mm$. Per fare questo si osservi la figura (1), e sapendo che il valore reale dello spessore è s ,

$$1 \text{ u.m.} = \frac{s}{L_1} mm$$

Equazione 2 - conversione u.m. in mm.

4. a questo punto, essendo noto il coefficiente di conversione è possibile determinare il valore dell'area della sezione della cavità, così da valutare la diminuzione di sezione dovuta alla sua presenza. Per fare questo si moltiplichi la dimensione dell'area della sezione della cavità (espressa in u.m.) per il coefficiente di conversione $u.m. \rightarrow mm$.

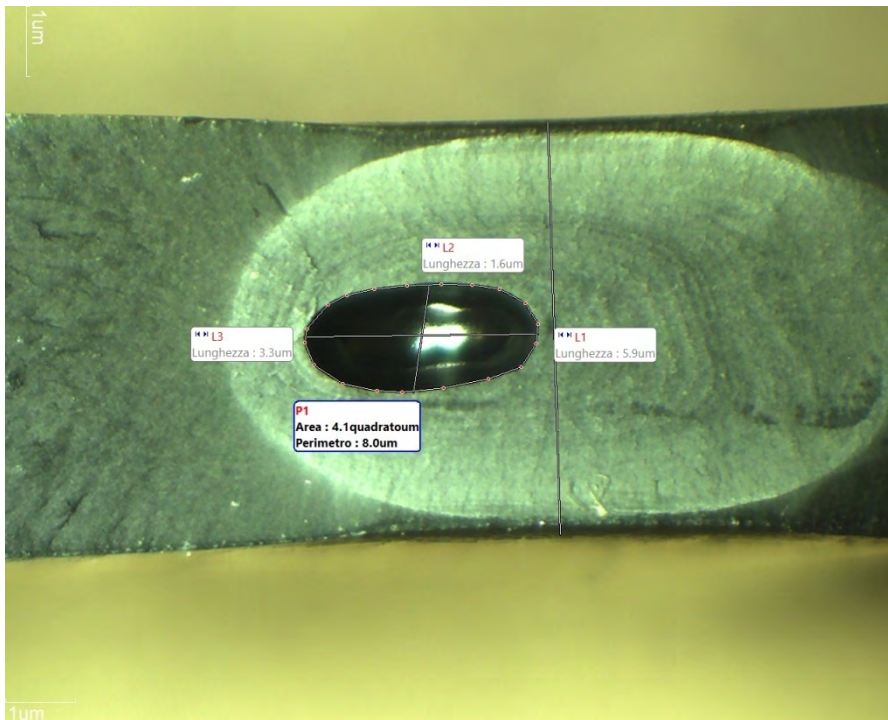


Figura 1 - ingrandimento a 35X di superficie di frattura di un provino in PBT/PC, con relative misure per determinare l'area netta

A questo punto è possibile aggiungere nel file excel altre due colonne:

- Una relativa alla tensione netta, in MPa;
- Una relativa alla deformazione, in forma adimensionale.

Ora nello stesso file, ma in un secondo foglio si riportino tre colonne di dati: la prima relativa al tempo, la seconda alla tensione netta e la terza alla deformazione. Si noti che il numero dei dati a disposizione è eccessivo e che è necessario operarne una riduzione. Prima di fare questo si facciano delle considerazioni:

- La densità di dati deve essere maggiore in corrispondenza dei transitori, come per esempio nelle fasi iniziali di avvio del test oppure nelle fasi conclusive in cui la prova accelera.
- Nelle fasi in cui la velocità di deformazione è costante, la densità dei dati può ridursi drasticamente fino ad arrivare ad 1 dato ogni 10 secondi, nel caso di prove molto lunghe.
- È necessario eliminare tutti i dati non significativi inerenti ai momenti "vuoti" in cui la prova doveva ancora iniziare (e l'allungamento e la tensione erano nulli) oppure in cui il provino era già giunto a rottura e la tensione era prossima a zero.
- Si consideri il rumore del segnale della forza e si cerchi di risolvere il problema mediando il suo valore.

Si decida di procedere nel seguente modo.

Per prove di breve durata ($\text{tempo} \leq 3600 \text{ s}$):

- Da 0 a 1 secondi: si prenda un dato ogni 0,01 secondi. Vengono presi esattamente i valori acquisiti.
- Da 1 a 2 secondi: si consideri un dato ogni 0,1 secondi. In questo caso, mentre i dati di deformazione sono pari a quelli del tempo corrispondente, i dati al tempo t della tensione sono pari alla media dei dati di tensione presenti nell'intervallo di tempo Δt (tra il tempo t e il tempo $t + 0,1 \text{ s}$). Questo viene fatto per ovviare al problema del rumore che è stato rilevato nel controllo di forza.
- Da 2 a 5 secondi: si operi come nel punto precedente, ma si consideri un $\Delta t = 0,5 \text{ s}$, ovviamente estendendo la media delle tensioni a tutto l'intervallo considerato.
- Da 5 secondi fino alla fine del test: si proceda ugualmente, ma con un $\Delta t = 5 \text{ s}$.

Per prove di lunga durata (*tempo* > 3600 s):

- Da 0 a 2 secondi: si prenda un dato ogni 0,1 secondi. Vengono presi esattamente i valori acquisiti.
- Da 2 a 5 secondi: si consideri un dato ogni 0,5 secondi. In questo caso, mentre i dati di deformazione sono pari a quelli del tempo corrispondente, i dati al tempo t della tensione sono pari alla media dei dati di tensione presenti nell'intervallo di tempo $\Delta\tau = 0,5\text{ s}$ (tra il tempo t e il tempo $t + 0,5\text{ s}$). Questo viene fatto per ovviare al problema del rumore che è stato rilevato nel controllo di forza.
- Da 5 a 20 secondi: si operi come nel punto precedente, ma si consideri un $\Delta\tau = 5\text{ s}$, ovviamente estendendo la media delle tensioni a tutto l'intervallo considerato.
- Da 20 secondi fino alla fine del test: si proceda ugualmente, ma con un $\Delta\tau = 10\text{ s}$.

Si noti che per test particolarmente lunghi si consiglia di prendere 1 dato ogni 60 secondi, dopo i primi 20 secondi iniziali.

A questo punto si hanno a disposizione il tempo, la tensione e la deformazione. Si noti che dopo circa 20 secondi la tensione è giunta ad un valore all'incirca costante, entro un errore di $\pm 0,5\text{ MP}$. Da questo dato fino a quello relativo alla rottura si esegua la media della tensione netta, così da fornire un valore il più possibile veritiero della tensione di creep.

Se da questo momento il valore della tensione di creep rimane all'incirca costante, si deve considerare l'inizio del creep in corrispondenza proprio dei 20 secondi. È quindi necessario fare la seguente importante ipotesi: si ipotizzi che per il tempo relativo di creep pari a 0 secondi si abbia una deformazione elastica istantanea che sia pari alla deformazione ottenuta dopo 20 secondi di test effettivo. Si sottolinei che il tempo relativo di creep è pari a 0 secondi, quando il test è giunto a 20 secondi.

Per questo importante motivo si generi un'ulteriore colonna del tempo che riporti il tempo effettivo di creep del test.

Si osservi che il valore della tensione di creep dovrebbe essere perfettamente costante durante la prova, ma a causa di un controllo di forza non perfetto questo valore cambia notevolmente e ripetutamente durante il test.

SERIE 1

Provino C1 - 1050 N

Si riporti a titolo d'esempio tutta la procedura eseguita per il primo provino della prima serie di creep test a rottura. Successivamente, per le prove successive verrà adottata la stessa procedura.

Innanzitutto di carichi il file .tdms con il software creep.exe creato con LabView. A causa di problemi con l'acquisizione si ottiene un dato per ogni decimo di secondo, invece di ottenerne uno per ogni centesimo di secondo. Si riporti in figura (2) il grafico così ottenuto.

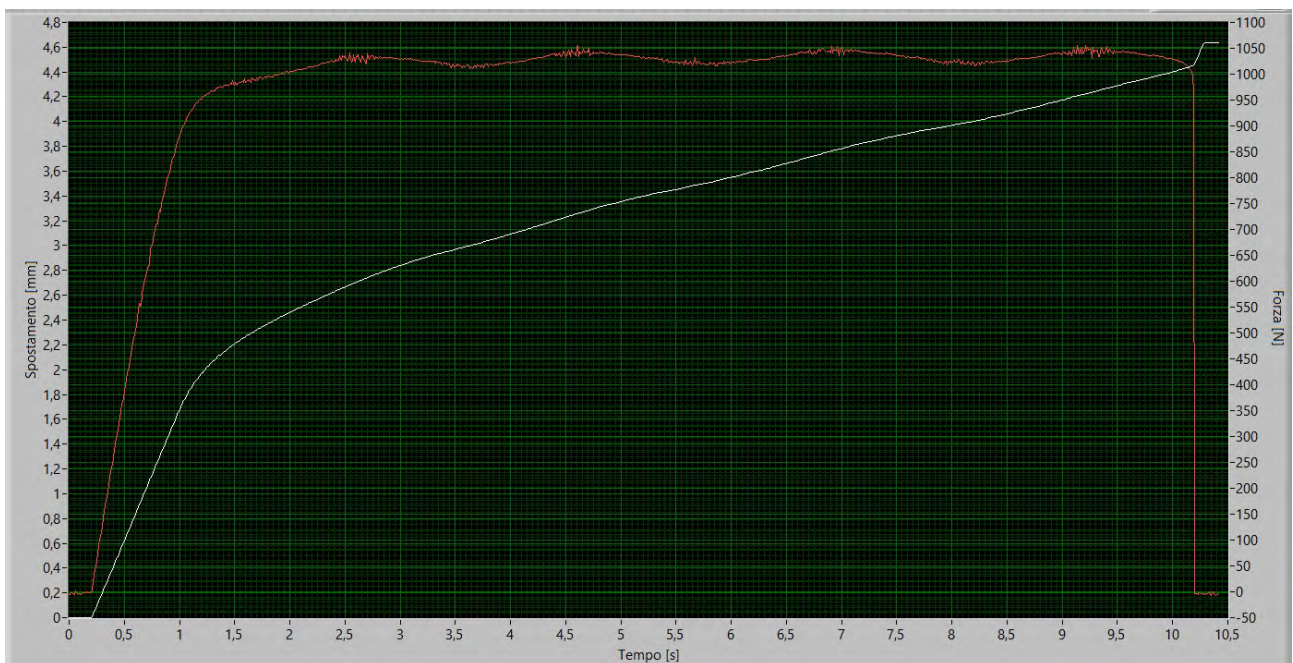


Figura 2 - diagramma di creep a rottura ottenuto con il software creep.exe. Si noti che in questo caso è necessario moltiplicare per 10 il tempo, in quanto c'è stato un errore di acquisizione durante il test.

Cliccando con il tasto destro del mouse sull'area del grafico si seleziona la voce *Export* → *Export data to Excel*.

A questo punto si ottiene un file Excel contenente le seguenti colonne di dati:

Tempo [s] - Spostamento	Spostamento [mm] - Spostamento	Tempo [s] - Forza	Forza [N] - Forza	Tempo [s] - Spostamento	Spostamento [mm] - Spostamento
----------------------------	-----------------------------------	----------------------	----------------------	----------------------------	-----------------------------------

Sono presenti forza e spostamento, ma è di maggiore utilità avere tensione netta e deformazione ingegneristiche. Per ottenerle, considerando anche l'area al netto della cavità, si eseguano le seguenti operazioni nello stesso file Excel ottenendo le colonne di tabella (4):

1. Per ridurre il più possibile le dimensioni del file, si rimuovano tutte le colonne di dati ridondanti o inutili al nostro scopo;

2. Riportare i parametri geometrici iniziali rilevanti, cioè la lunghezza del tratto utile L_0 e l'area della sezione lorda.
3. Eseguire il calcolo della sezione netta riportando: il valore della lunghezza dello spessore del provino dopo rottura L_1 sia quella virtuale (espressa in u. m.) che quella reale misurata con un calibro (e quindi espressa in mm); il conseguente fattore di conversione $u.m. \rightarrow mm$ derivante dalla cavità virtuale (espressa in u. m.) e di conseguenza l'area della cavità reale (espressa in mm) e ottenuta con la seguente,

$$A_{cavità\ reale} = A_{cavità\ virtuale} \times coefficiente\ di\ conversione$$

A questo punto posso determinare la sezione netta sottraendo l'area della cavità reale dall'area lorda della sezione.

4. Ora si può aggiungere due colonne: la prima riporterà la tensione netta mentre la seconda la deformazione.

Tempo [s]	Spostamento [mm]	Forza [N]	L0 (mm)	AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	DIMENS. CAVITA' (um ²)	DIMENS. CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)	TENSIONE (MPa)	DEFORMAZIONE
0	0	-6,16	60	41,417	5,9	3,9	0,661	1,4	0,925	40,491	-0,152266	0
0,1	0	-5,84									-0,144252	0
...	...	...									...	...

Tabella 4 - formato foglio Excel per il calcolo della tensione e della deformazione nel caso di test di creep a rottura

A questo punto è necessario procedere alla riduzione del numero dei dati, in quanto i dati disponibili in questo momento (in questo caso) sono 1043 per ogni colonna di tempo, tensione e deformazione. Un numero così elevato di dati è inutile ai fini dello studio di creep a rottura: si cerchi di avere una densità di dati maggiore in prossimità dei transitori (fino ad un dato ogni decimo di secondo) mentre una densità molto minore quando la velocità di deformazione è circa costante (un dato ogni 5 secondi). Così facendo, e operando opportune medie seguendo le indicazioni fornite precedentemente, si ottengono i dati riportati in tabella (5).

Si riporti inoltre il valore della tensione media effettiva ricavato in questo caso eseguendo la media dei dati dai 20 secondi fino alla fine del test (caselle con sfondo rosso nella tabella (5)):

$$\sigma_{creep} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} = 25,45\ MP$$

Si concluda quindi che questa è stata una prova di rottura a creep eseguita ad un valore di tensione pari a 25,45 MPa.

Tempo [s]	Tensione [MPa]	Deformazione [mm/mm]	Tempo di creep [s]	Tempo [s]	Tensione [MPa]	Deformazione [mm/mm]	Tempo di creep [s]
0	-0,04808	0	-20	4	11,94896	0,013875	-16
0,1	0,072127	0,000118	-19,9	4,5	13,30975	0,015644	-15,5
0,2	0,456801	0,000512	-19,8	5	14,69618	0,017401	-15
0,3	0,825448	0,000866	-19,7	10	20,42191	0,032774	-10
0,4	1,170053	0,001215	-19,6	15	24,14332	0,038679	-5
0,5	1,474586	0,001568	-19,5	20	24,75463	0,042441	0
0,6	1,803163	0,001918	-19,4	25	25,34497	0,045679	5
0,7	2,187838	0,00226	-19,3	30	25,44192	0,048274	10
0,8	2,476342	0,002618	-19,2	35	25,16304	0,050248	15
0,9	2,820957	0,002965	-19,1	40	25,22376	0,052465	20
1	3,141518	0,003319	-19	45	25,63906	0,054695	25
1,1	3,486108	0,003667	-18,9	50	25,63426	0,056623	30
1,2	3,838724	0,004017	-18,8	55	25,32362	0,058198	35
1,3	4,159285	0,004377	-18,7	60	25,24735	0,059931	40
1,4	4,47987	0,004727	-18,6	65	25,54548	0,061873	45
1,5	4,82446	0,005075	-18,5	70	25,80272	0,063797	50
1,6	5,112965	0,005425	-18,4	75	25,61487	0,065399	55
1,7	5,441552	0,005774	-18,3	80	25,29687	0,066712	60
1,8	5,77814	0,006135	-18,2	85	25,32074	0,068424	65
1,9	6,090674	0,006488	-18,1	90	25,6623	0,070354	70
2	6,411235	0,006837	-18	92,5	25,77323	0,071302	72,5
2,5	7,371331	0,008595	-17,5	95	25,76714	0,072229	75
3	8,929265	0,010358	-17	97,5	25,65139	0,073137	77,5
3,5	10,4327	0,012111	-16,5	99,9	25,37859	0,074283	79,9

Tabella 5 - sintesi dei dati sperimentali del test di creep a rottura eseguito sul provino C1 sella prima serie.

Da questi dati è possibile ottenere due curve nello stesso grafico, entrambe dipendenti dal tempo di creep, e non dal tempo dell'intero test:

- La prima curva è quella della tensione, e serve a verificare che l'andamento della tensione sia il più possibile costante e regolare;
- La seconda curva è quella tipica di un creep test e riporta la deformazione in funzione del tempo.

Si riportino le due curve nel grafico di figura (3).

Nel titolo del grafico è riportato in nome del provino (C1) e la tensione media a cui è sottoposto il provino, che viene identificato come il carico di creep costante. In realtà come si può vedere dal grafico della tensione in funzione del tempo, questa non è perfettamente costante ma oscilla attorno ad un valore medio che è quello che si assume come tensione di creep. Questo fatto può essere dovuto ad un controllo di forza non ottimale oppure ad un problema nell'acquisizione del segnale della cella di

carico, come per esempio ad un eccessivo rumore del segnale che genera delle notevoli oscillazioni nella forza intorno al valore obbiettivo.

Per quanto riguarda la deformazione si noti che il suo andamento è quello tipico di un creep test: infatti si possono individuare le tre regioni di creep. Nella fase iniziale si ha il creep primario in cui la velocità di deformazione diminuisce; nella regione centrale si ha il creep secondario in cui la deformazione procede a velocità costante; mentre l'ultimo tratto, quello che precede la rottura, è quello inerente al creep terziario in cui si ha un'accelerazione della deformazione fino a giungere a rottura. Si osservi che il creep terziario è poco visibile in quanto la pendenza della curva non varia in modo significativo prima del cedimento.

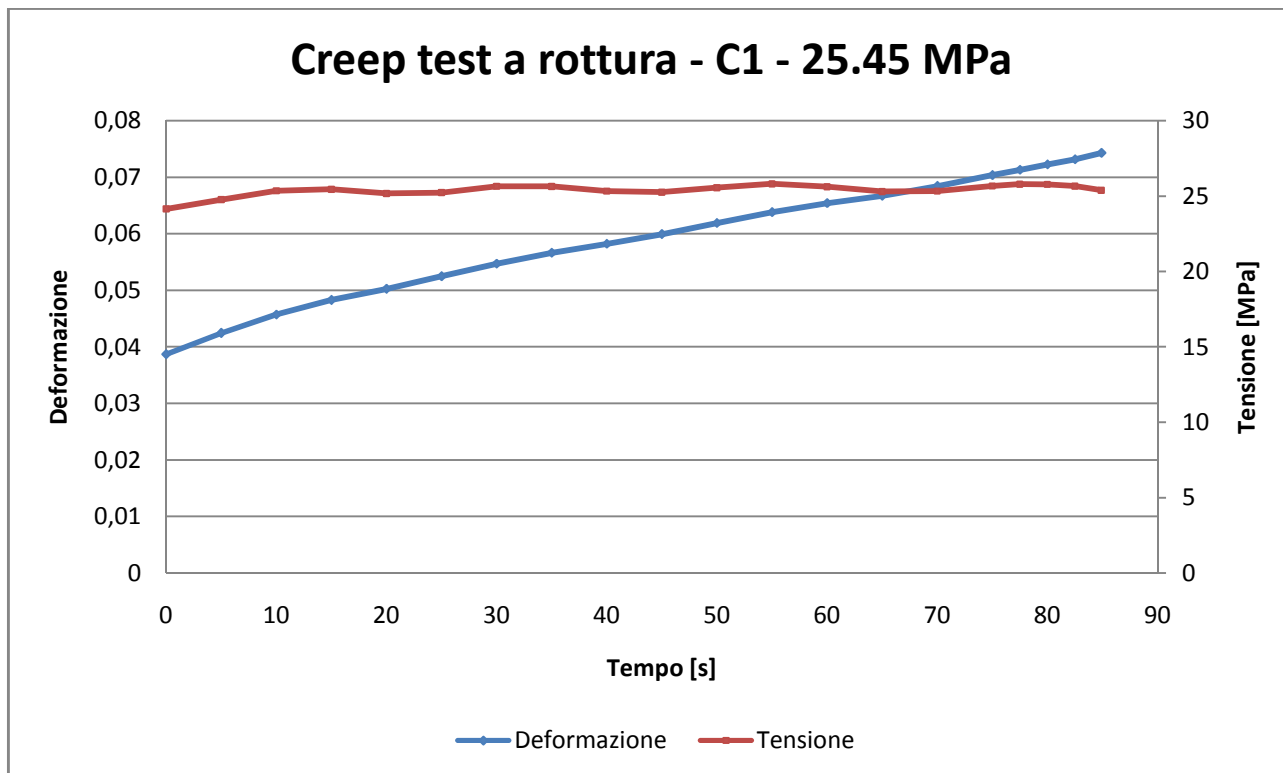


Figura 3 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino C1, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 26,03 MPa.

Si noti come la cavità presente all'interno del provino abbia influenzato sul test, osservando la tabella (6). In tabella viene riportato:

- SERIE: indica il numero della serie di test;
- PROVINO: il nome che identifica il provino utilizzato;
- CARICO IMPOSTATO [N]: indica il valore di forza impostato nel controllo di forza della prova;
- TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]: il valore della tensione relativo alla sezione netta e al carico impostato,

$$TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa] = \frac{CARICO IMPOSTATO [N]}{AREA LORDA [mm]}$$

- TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]: rappresenta il valore della tensione riferita alla sezione netta ricavato dalla media delle tensioni dai 20 secondi fino alla fine del test;
- DEFORMAZIONE A ROTTURA: è la deformazione alla quale il provino giunge a rottura e corrisponde all'allungamento finale rapportato alla lunghezza iniziale del tratto utile;

- TEMPO A ROTTURA [s]: corrisponde al tempo della prova, corrisponde al tempo della prova, cioè da quando viene raggiunto il valore del carico di creep fino alla rottura del provino.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1	C1	1050	25.3519086	25.451891	0.074283	99.9

Tabella 6 - Riassunto dei parametri significativi per il creep test a rottura sul provino C1

Durante il test sono state annotate alcune osservazioni riguardo a problemi incontrati o anomalie riscontrate. In questo caso:

- La prova ha avuto una durata particolarmente breve, intorno ai 2 minuti, probabilmente a causa del fatto che il carico era molto elevato e prossimo a quello di snervamento.
- Un'anomalia significativa è il fatto che, sebbene fosse stato imposto un carico obbiettivo pari a 1050 N, questo valore non è stato mai raggiunto durante la prova, al massimo è stato raggiunto il valore di 1040 N. Questo è accaduto probabilmente a causa dell'effetto del rilassamento delle tensioni che a carichi così elevati tende a predominare rispetto al creep.
- Nonostante questo fatto la tensione applicata al provino mediamente è superiore a quella teorica, proprio a causa della presenza della cavità all'interno dello stesso.
- La tensione rimane intorno al valore della tensione media effettiva entro un intervallo di incertezza pari a $\pm 0.5 MP$.

Provino C2 - 1030 N

Si eseguano le stesse operazioni che sono state fatte per il provino C1 e si riportino direttamente i risultati, tralasciando la descrizione di tutti i passaggi.

Si determini l'area netta della sezione di rottura del provino come spiegato precedentemente.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.9	3.91	0.662711864	2.5	1.656779661	39.76022034

A questo punto si determini la tensione netta e la deformazione in funzione del tempo, com'è stato fatto nel caso precedente, ottenendo il diagramma delle due curve relative ad esse (fig. (4)).

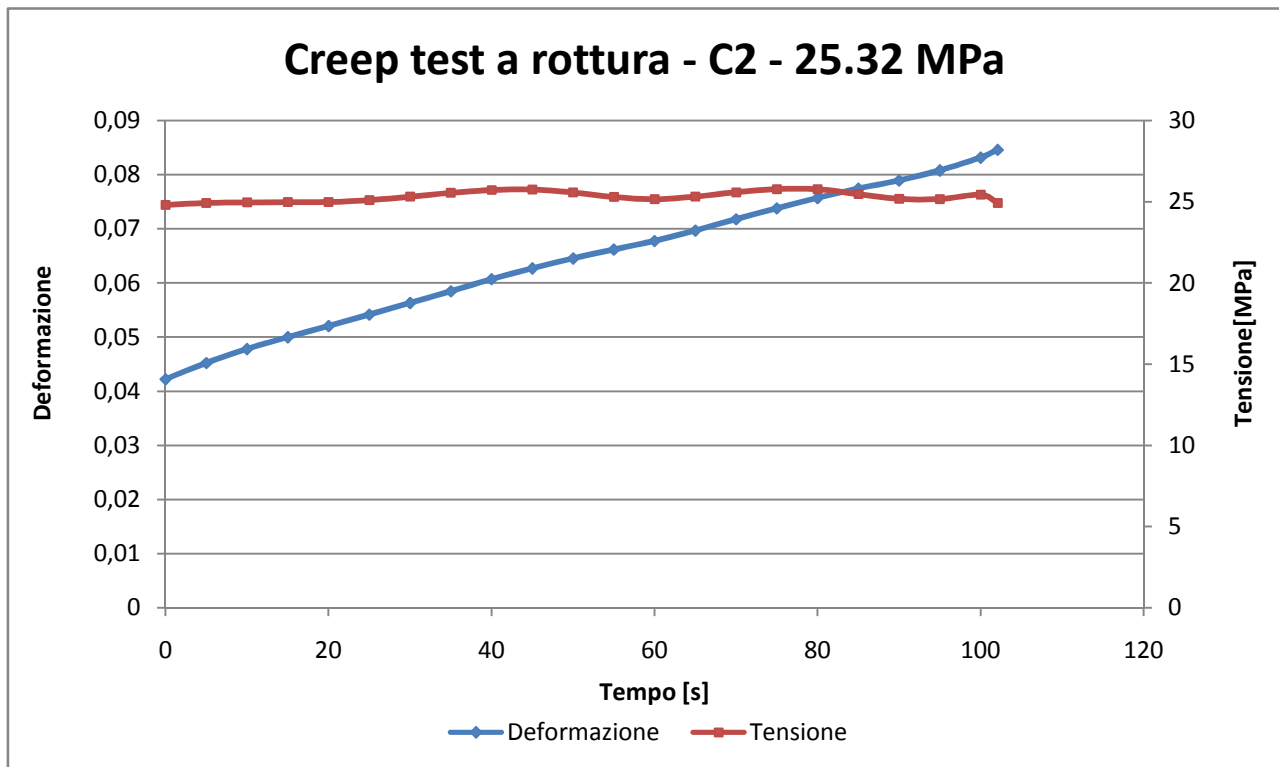


Figura 4 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino C2, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 25,32 MPa.

Si riportino i risultati del test nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1	C2	1030	24.8690151	25.321497	0.084583333	102.1

Osservazioni:

- Si noti che anche in questo caso la tensione non è perfettamente costante e che tende ad esserci un andamento oscillatorio intorno al valore di target. Il valore di creep è pari a quello medio effettivo con un'incertezza pari a $\pm 0.4 MP$.
- Inoltre si può notare che il creep terziario, come nel caso precedente, non è chiaramente visibile ma viene leggermente accennato appena prima del cedimento del provino.
- Anche in questo caso, sempre a causa della presenza della cavità, la tensione in corrispondenza della sezione minima del provino è maggiore di quella attesa teoricamente.

Si determini l'area netta della sezione di rottura del provino.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (μm)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (μm ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.8	3.9	0.672413793	3.8	2.555172414	38.86182759

Con questa informazione è possibile ottenere le seguenti curve di tensione netta e deformazione in funzione del tempo, rappresentative di un creep test a rottura.

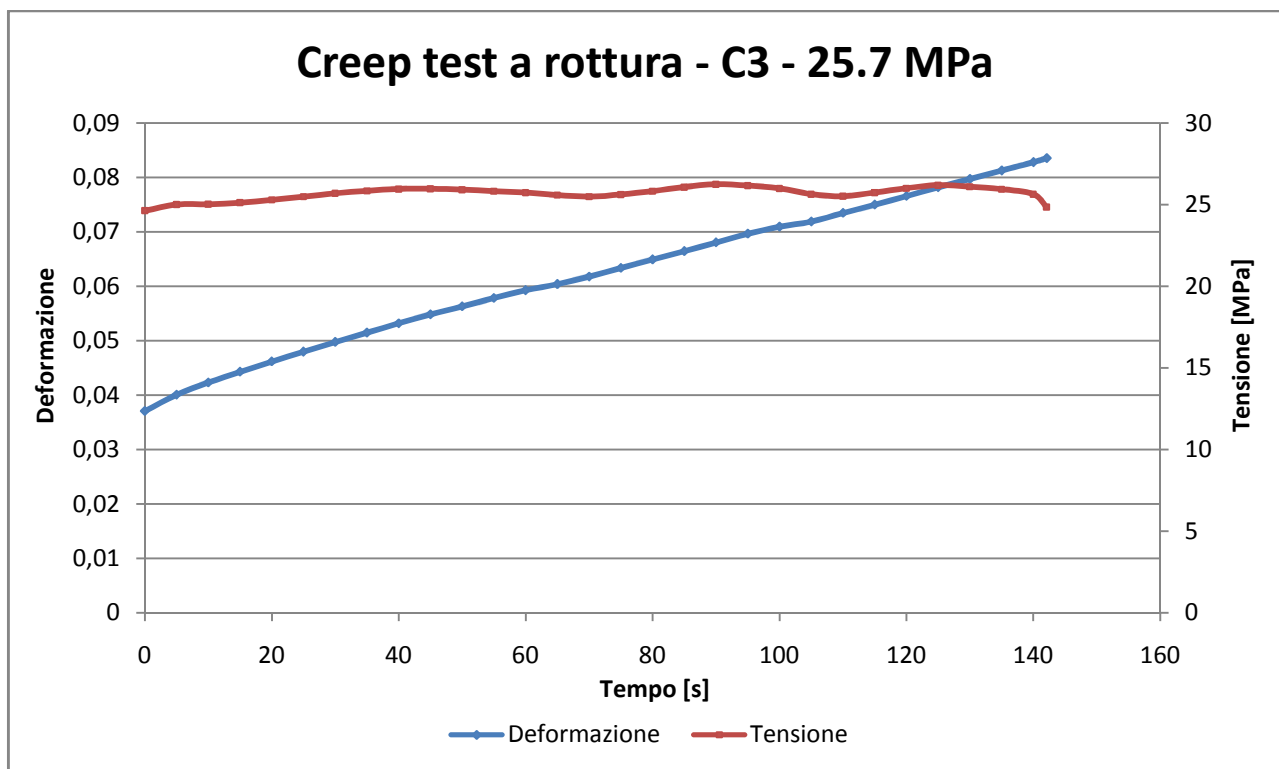


Figura 5 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino C3, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 25,7 MPa.

Si riportino nella seguente tabella i risultati del test.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1	C3	1010	24.3861216	25.703603	0.083526	142.1

Osservazioni:

- Anche in questo caso il passaggio dal creep secondario al creep terziario è impercettibile, la causa potrebbe essere la cavità che porta il provino a rottura prematuramente.
- Si noti che la tensione non rimane perfettamente costante, ma il suo valore oscilla intorno al valore medio effettivo calcolato. Si può considerare costante con un'incertezza di $\pm 0.7 \text{ MPa}$.
- Il valore di tensione medio effettivo risulta superiore di ben 1.3 MPa rispetto il valore teorico, in quanto è presente una cavità anche in questo provino.

Provino C4 - 950 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (μm)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (μm^2)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.8	3.83	0.660344828	4.2	2.773448276	38.64355172

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

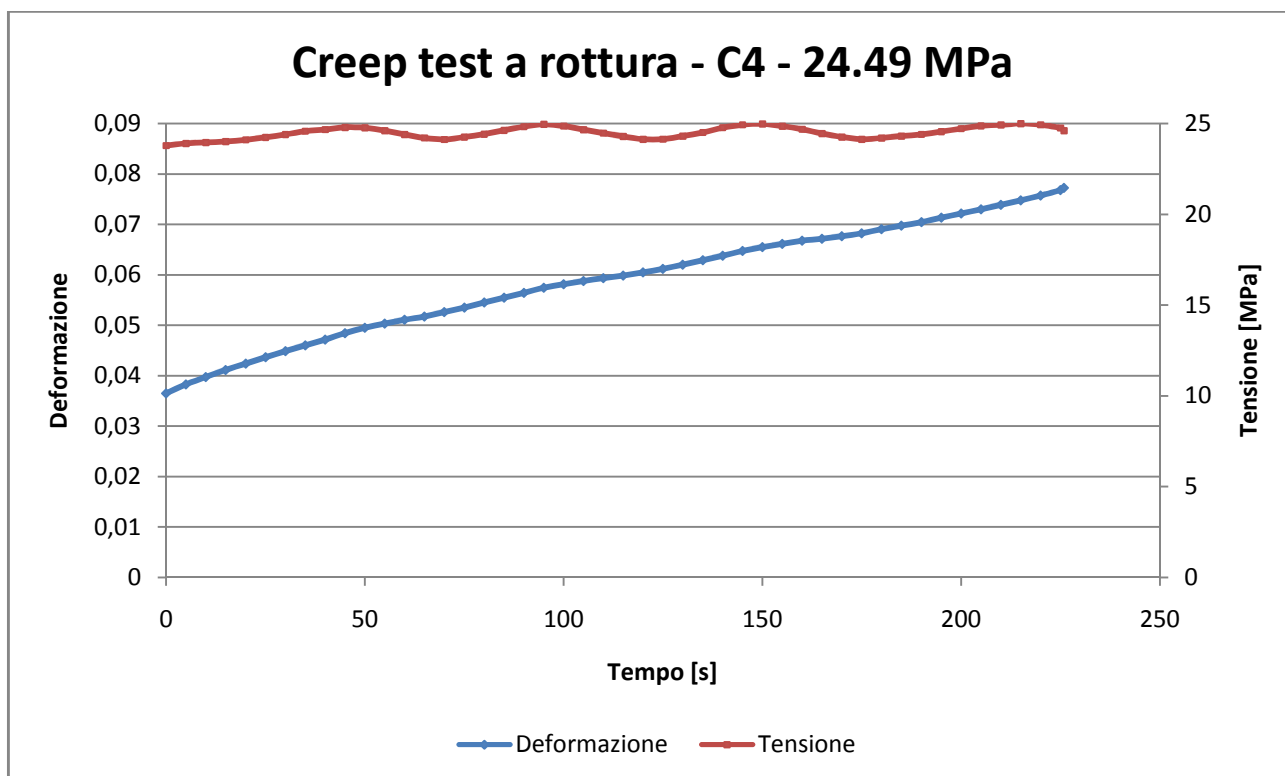


Figura 6 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino C4, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 24,49 MPa.

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1	C4	950	22.9374411	24.49142	0.077218667	225.9

Osservazioni:

- Il passaggio dal creep secondario a quello terziario è quasi impercettibile anche in questo caso.
- La tensione oscilla in maniera vistosa intorno ad un valore medio effettivo. Infatti l'incertezza della tensione media di creep è pari a $\pm 0.6 \text{ MPa}$.
- La tensione reale è maggiore rispetto a quella teorica attesa di circa 1.5 MPa.

Provino C5 - 900 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.8	3.85	0.663793103	2.7	1.792241379	39.62475862

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

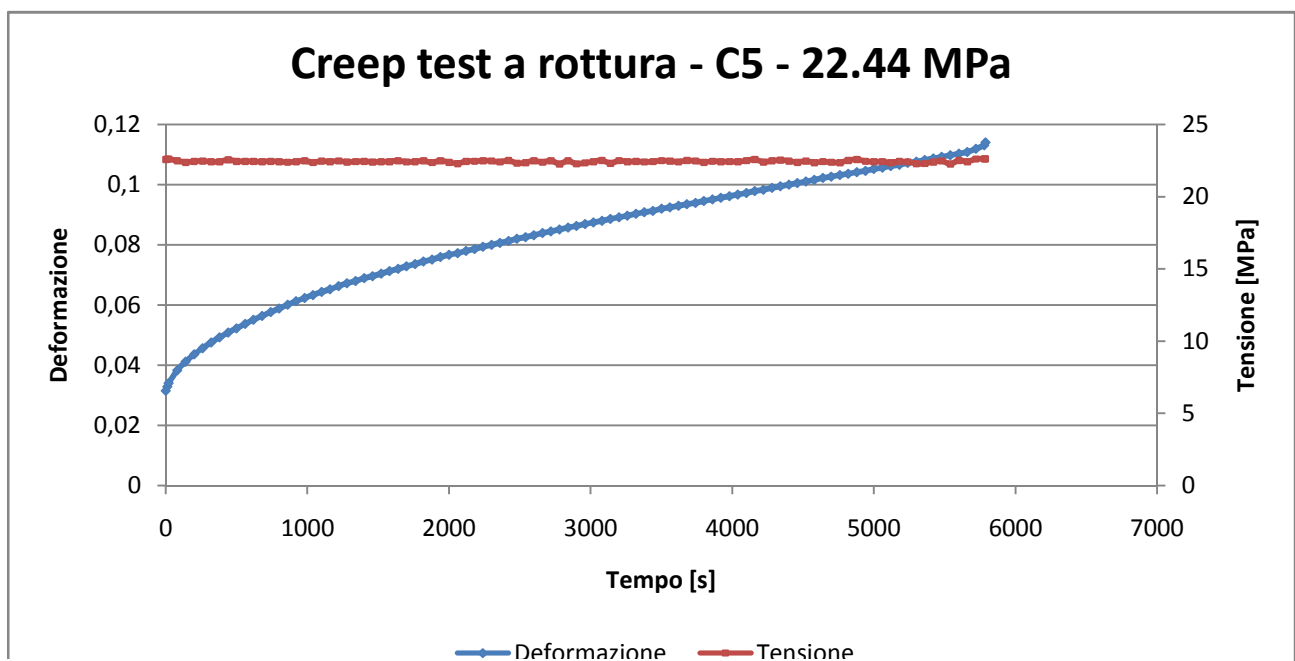


Figura 7 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino C5, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 22.43 MPa.

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1	C5	900	21.7302074	22.4376	0.114045167	5787.7

Osservazioni:

- La prova ha avuto una durata di sostanzialmente maggiore rispetto ai test precedenti proprio perché la tensione applicata al componente è inferiore. Questo fatto è positivo perché è proprio ciò che ci si aspetta da una serie di creep test a rottura: al diminuire del carico il tempo a rottura dovrebbe aumentare.
- La cavità presente fa sì che la tensione effettiva sia superiore a quella attesa teoricamente.
- La tensione anche in questo caso non è perfettamente costante, ma mostra un andamento oscillatorio intorno al valore medio della tensione effettiva, con un'incertezza di circa $\pm 0.18 \text{ MP}$.

Provino C6 - 875 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.9	3.85	0.652542373	1.4	0.913559322	40.50344068

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1	C6	875	21.1265905	21.473205	0.086512167	9040.7

Osservazioni:

- La tensione risulta leggermente maggiore di quella teorica, ma non così tanto come nei casi precedenti, a causa di una cavità di dimensioni contenute.
- Anche in questo caso la tensione oscilla intorno al valore medio effettivo con un'incertezza pari a $\pm 0.22 \text{ MP}$.

- La curva mostra un tipico comportamento a creep: infatti in questo caso è possibile distinguere le tre fasi del creep, anche se la fase terziaria non è particolarmente estesa.

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

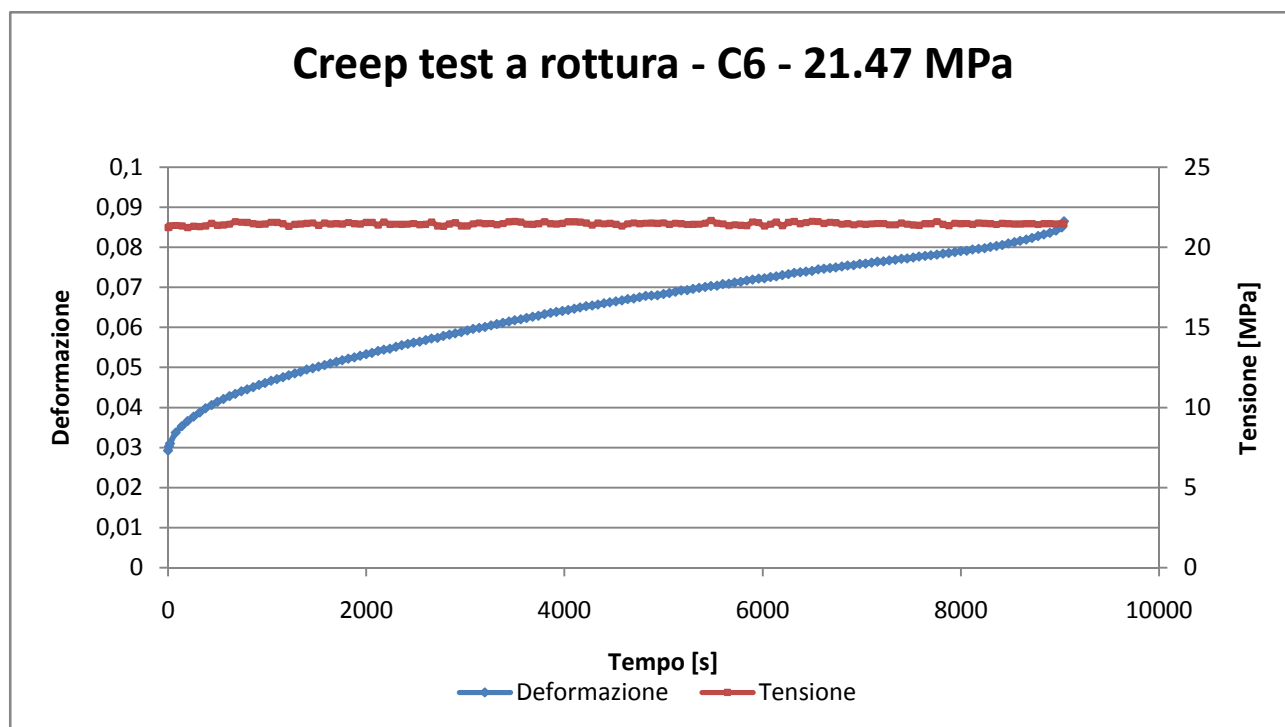


Figura 8 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino C6, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 21.47 MPa.

Provino C7 - 850 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	1	1	1	0	0	41.417

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1	C7	850	20.5229737	20.3951	0.157244833	31635

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

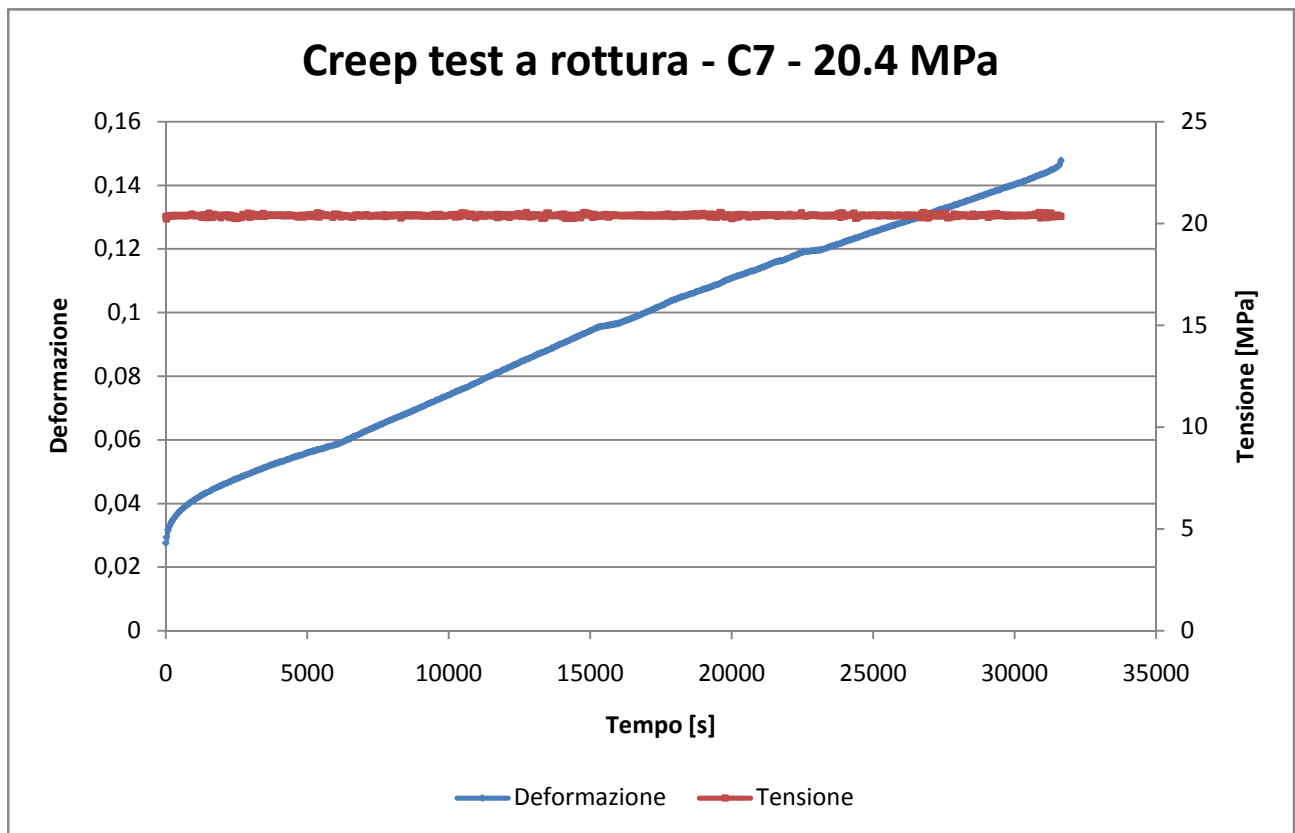


Figura 9 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino C7, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 21.4 MPa.

Osservazioni:

- In questo caso la cavità era assente, infatti la tensione netta non risulta superiore a quella teorica. Anzi, risulta inferiore, probabilmente perché il controllo di forza manteneva teneva la forza ad un valore sempre inferiore al valore target.
- Il creep terziario si presenta, anche se la sua estensione risulta minima e quasi trascurabile rispetto al tempo complessivo della prova.
- Anche in questo caso la tensione mediamente rimane costante, anche se oscilla intorno al valore medio effettivo con un'incertezza non eccessiva pari a $\pm 0.16 \text{ MP}$.
- Dato il grande numero di dati a disposizione si è deciso di ricavare un dato al minuto, invece di un dato ogni 20 secondi. Si noti che anche in questo modo la forma della curva rimane uguale.

SERIE 2

Provino CA - 1050 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (μ m)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (μ m ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.9	3.85	0.652542373	3.7	2.41440678	39.00259322

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
2	CA	1050	25.3519086	25.991199	0.122434	127.97

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

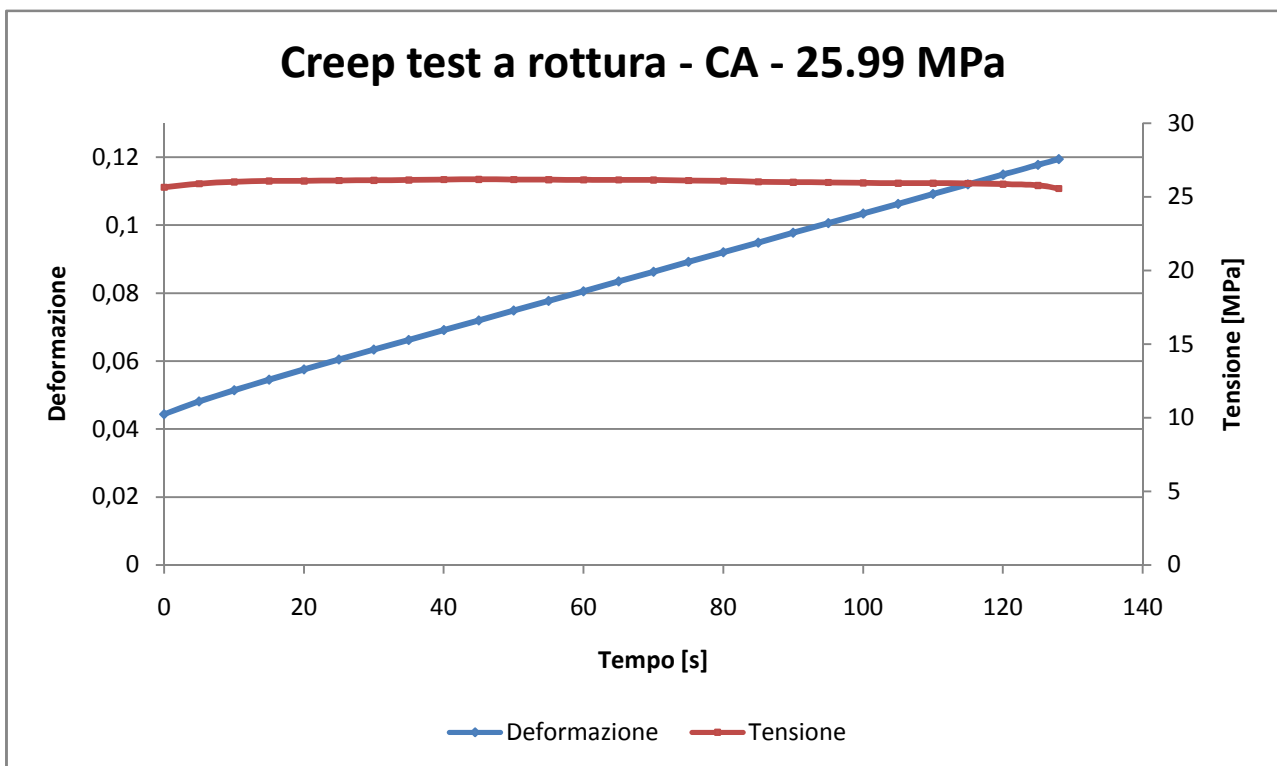


Figura 10 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CA, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 25.99 MPa.

Osservazioni:

- Durante il test non si è mai giunti al valore target di 1050 N, ma ci si è fermati al massimo a 1030 N. Questo non perché il provino si sia rotto in fase di caricamento, ma probabilmente perché il fenomeno del creep (a questo livello di carico) è bilanciato dal fenomeno del rilassamento delle tensioni: questi due fenomeni si bilanciano al valore di 1030 N e la forza non riesce a crescere. Nonostante ciò il valore della tensione effettiva è maggiore a quello atteso perché è presente una grande cavità.
- Inoltre la cavità, oltre ad essere grande, è di forma irregolare: non si ha un'ellisse ma una cavità a forma di "D".
- Ad ogni modo il valore della tensione oscilla molto meno intorno al valore medio rispetto ai test eseguiti precedentemente. L'incertezza è pari a $\pm 0.3 \text{ MPa}$.
- Il passaggio dal creep secondario a terziario è visibile, anche se molto lieve. Inoltre il creep terziario ha una durata molto limitata.

Provino CB - 1030 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (μm)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (μm^2)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.9	3.85	0.652542373	3.7	2.41440678	39.00259322

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
2	CB	1030	24.8690151	25.173932	0.0770365	79.3

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

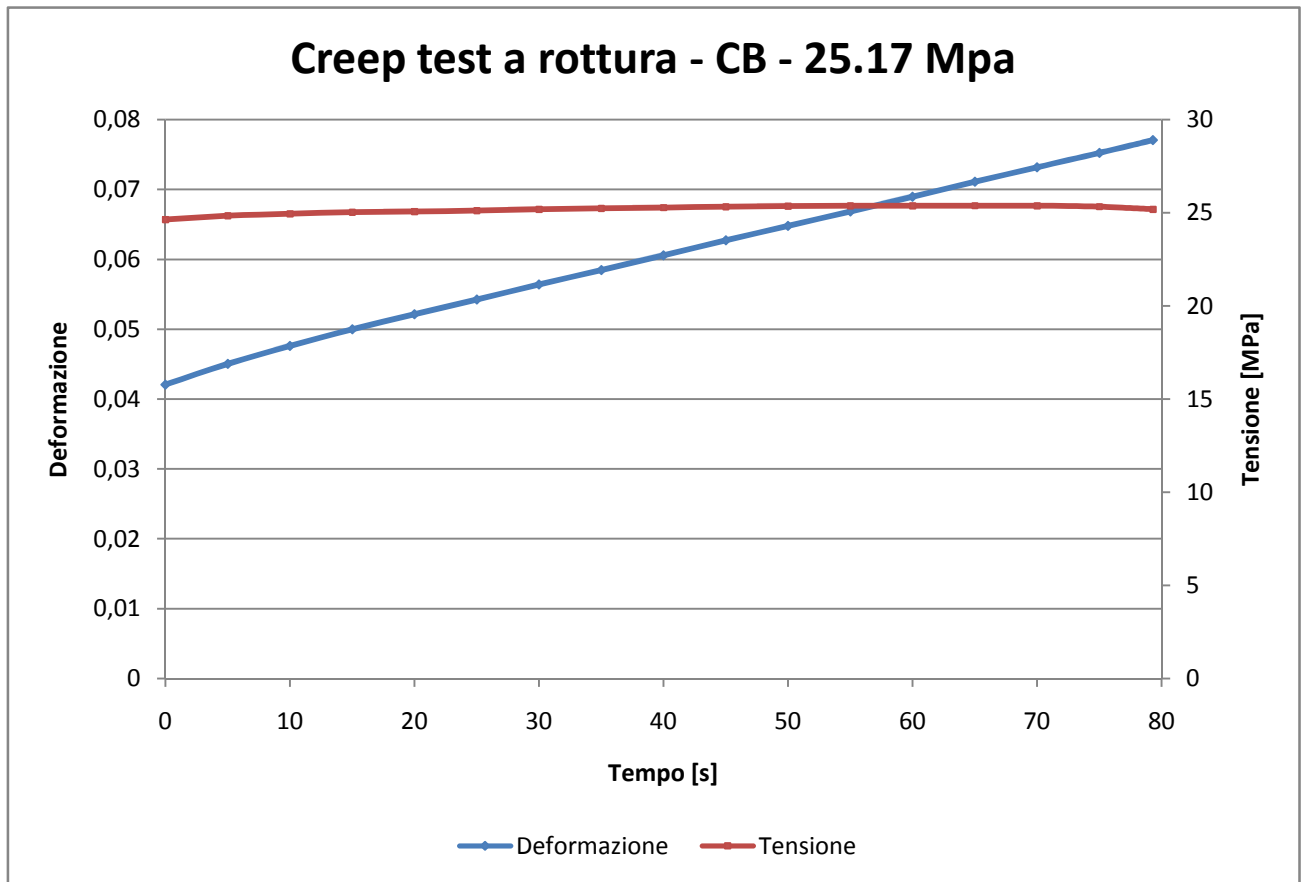


Figura 11 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CB, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 25.17 MPa.

Osservazioni:

- Anche in questo caso non si è riusciti ad arrivare al valore di target impostato. Infatti il valore massimo di forza a cui si è giunti è stato pari a 1015 N. Diventa difficile capire il perché di questo fenomeno, che sembra presentarsi esclusivamente per carichi elevati.
- Dopo il transitorio di carico iniziale, si giunge ad una condizione di carico pressoché costante intorno alla tensione media effettiva con un'incertezza di $\pm 0.38 \text{ MP}$. Probabilmente a causa della breve durata della prova non si manifesta un andamento oscillatorio intorno al valore medio, come per le prove più lunghe.
- Anche in questo caso il passaggio dal creep secondario a terziario è evidente, ma ha un'estensione temporale molto ridotta rispetto al tempo complessivo della prova.

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.9	3.85	0.652542373	3.7	2.41440678	39.00259322

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

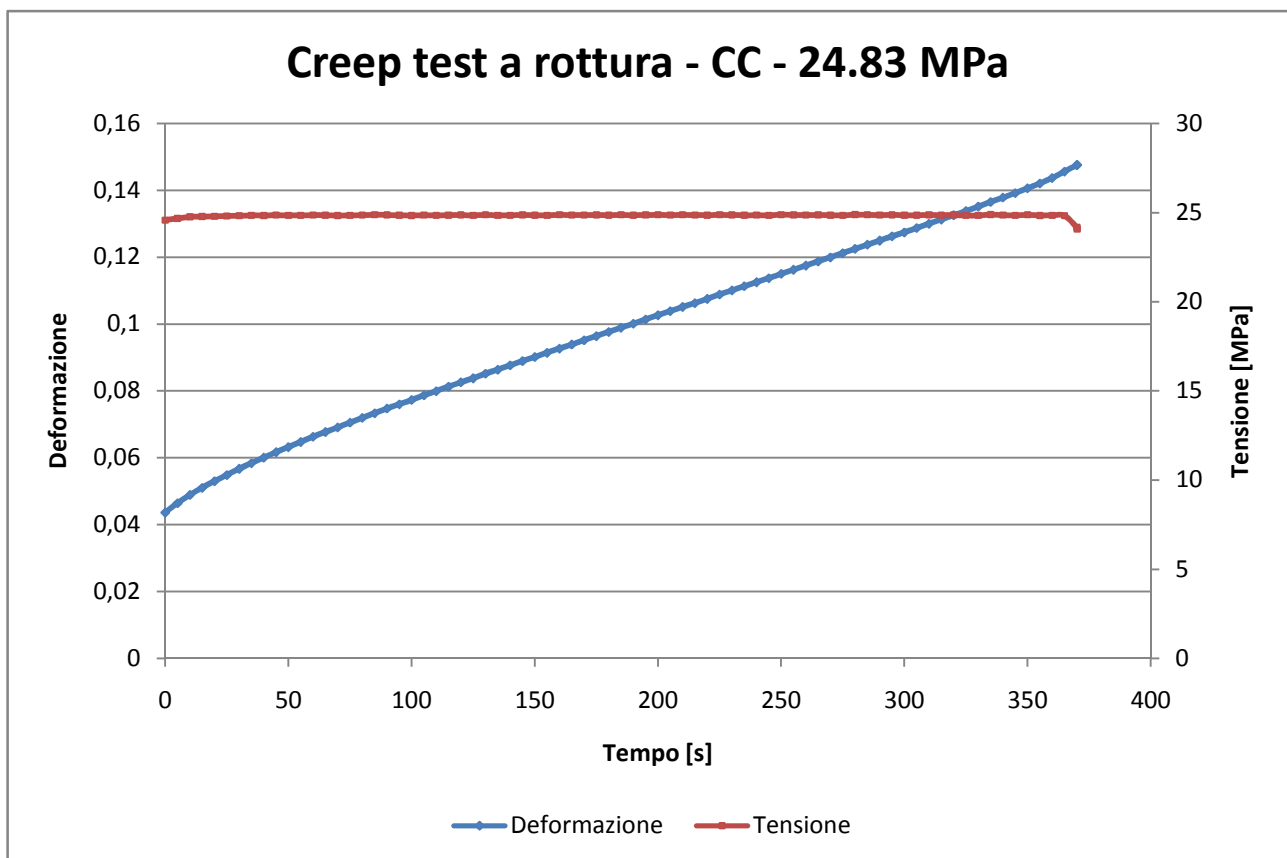


Figura 12 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CC, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 24.83 MPa.

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
2	CC	1010	24.3861216	24.829806	0.147581667	370.16

Osservazioni:

- Anche in questo caso non è stato raggiunto il valore di carico target, anche se rispetto ai due casi precedenti, la differenza tra carico applicato e carico obiettivo è inferiore.
- Sono presenti ben due cavità sulla superficie di rottura, ma di piccole dimensioni, e complessivamente la riduzione di area utile è piccola.
- I due fatti appena citati giustificano il fatto che la tensione media effettiva risulta essere inferiore a quella teorica, nonostante l'area netta sia inferiore rispetto alla sezione lorda.
- Si noti che la tensione applicata ha un andamento particolarmente costante e non mostra un andamento oscillatorio come nei casi precedenti rispetto al valore di tensione media effettiva con un'incertezza di $\pm 0.4 \text{ MP}$.
- Per quanto riguarda il creep terziario, esso è appena visibile graficamente, ma è difficile determinare il transitorio dal creep secondario a quello terziario.

Provino CD - 975 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (μm)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (μm^2)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.9	3.86	0.654237288	1.8	1.177627119	40.23937288

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
2	CD	975	23.541058	24.05045	0.078722167	260.9

Osservazioni:

- In questo test il livello di carico raggiunto è molto vicino a quello impostato, anche se leggermente inferiore.
- Inoltre è presente una cavità di dimensioni medie.
- Per questi motivi la tensione effettiva media è superiore rispetto alla tensione teorica.
- L'andamento della tensione è particolarmente costante e non è presente un evidente oscillamento intorno al valore di tensione media effettiva. L'incertezza è pari a $\pm 0.1 \text{ MP}$.
- È presente il passaggio da creep secondario a creep terziario, ma l'aliquota di tempo inerente alla fase terziaria è molto ridotta rispetto al tempo complessivo.

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

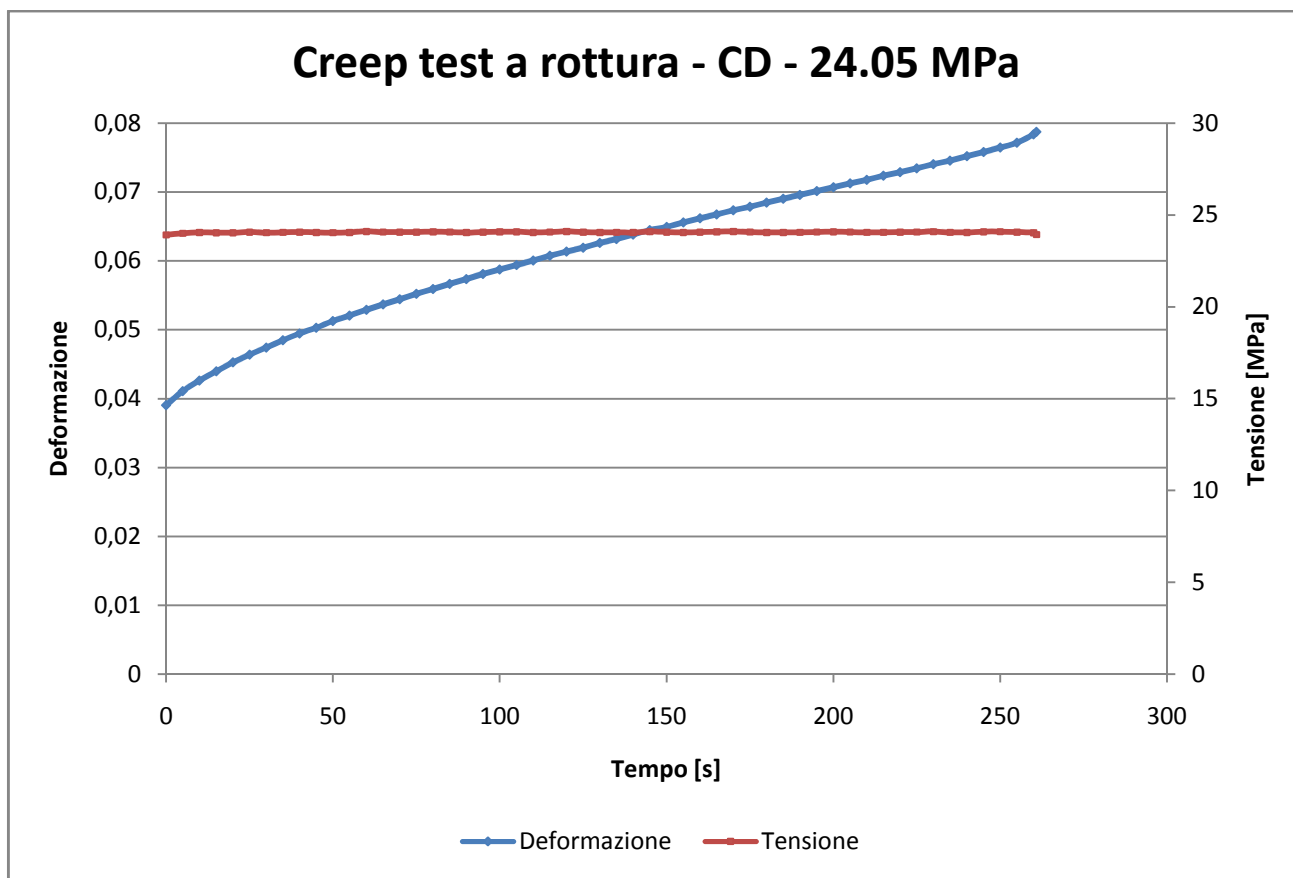


Figura 13 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CD, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 24.05 MPa.

Provino CE - 950 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (μm)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (μm ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.9	3.86	0.654237288	3.1	2.028135593	39.38886441

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
2	CE	950	22.9374411	23.963488	0.071625	408.88

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

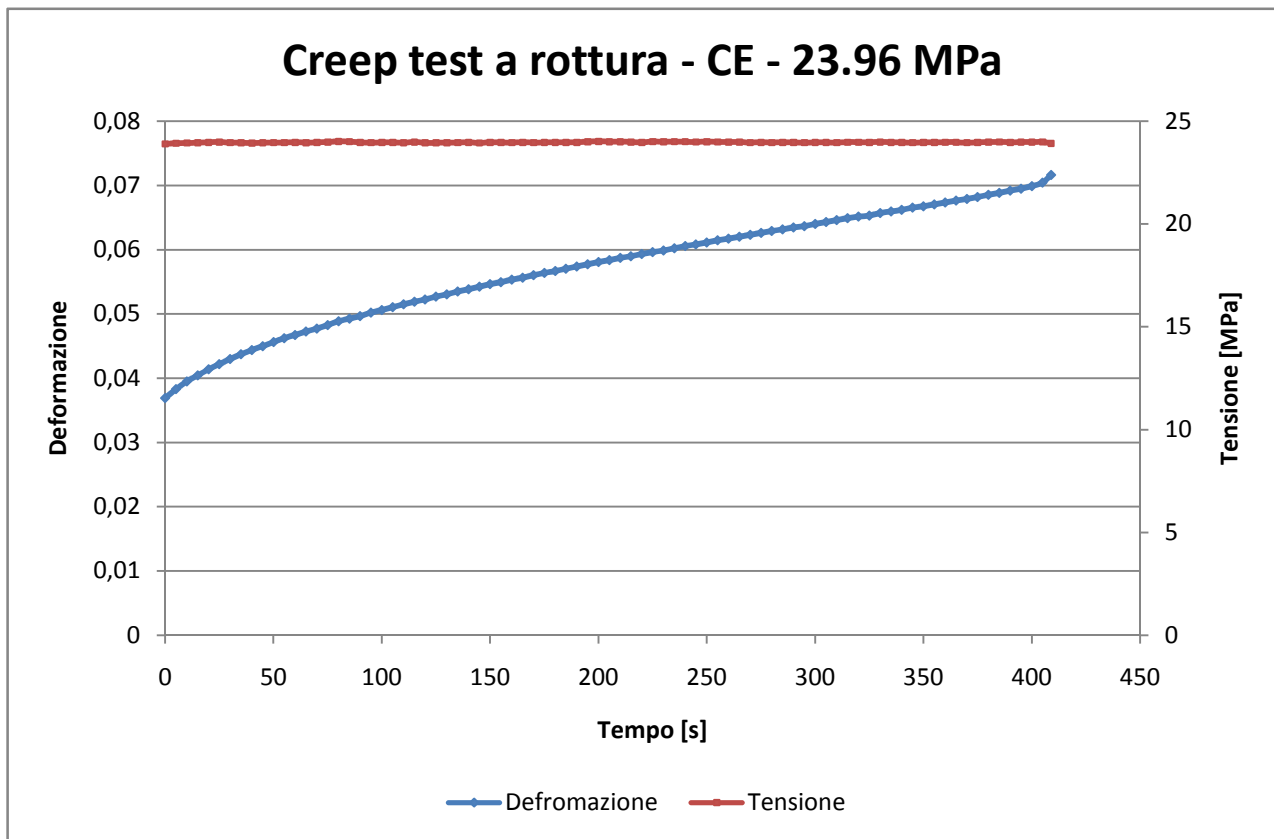


Figura 14 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CE, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 23.96 MPa.

Osservazioni:

- A questo livello di carico il valore di target viene raggiunto durante il test e la forza rimane mediamente nel suo intorno.
- È presente una cavità di grande dimensione e di forma ad ellisse regolare.
- Date le dimensioni generose della cavità e il fatto che la forza fosse mediamente pari al valore di target impostato, il valore della tensione media effettiva è superiore a quella teorica di circa 1 MPa.
- La tensione mostra un andamento costante e caratterizzato da oscillazioni non apprezzabili graficamente. Infatti l'incertezza è particolarmente piccola ed è circa pari a $\pm 0.06 \text{ MP}$.
- Il creep terziario è presente anche se di breve durata rispetto al tempo complessivo; inoltre si può notare la transizione da fase secondaria a terziario.

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	1	1	1	0	0	41.417

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

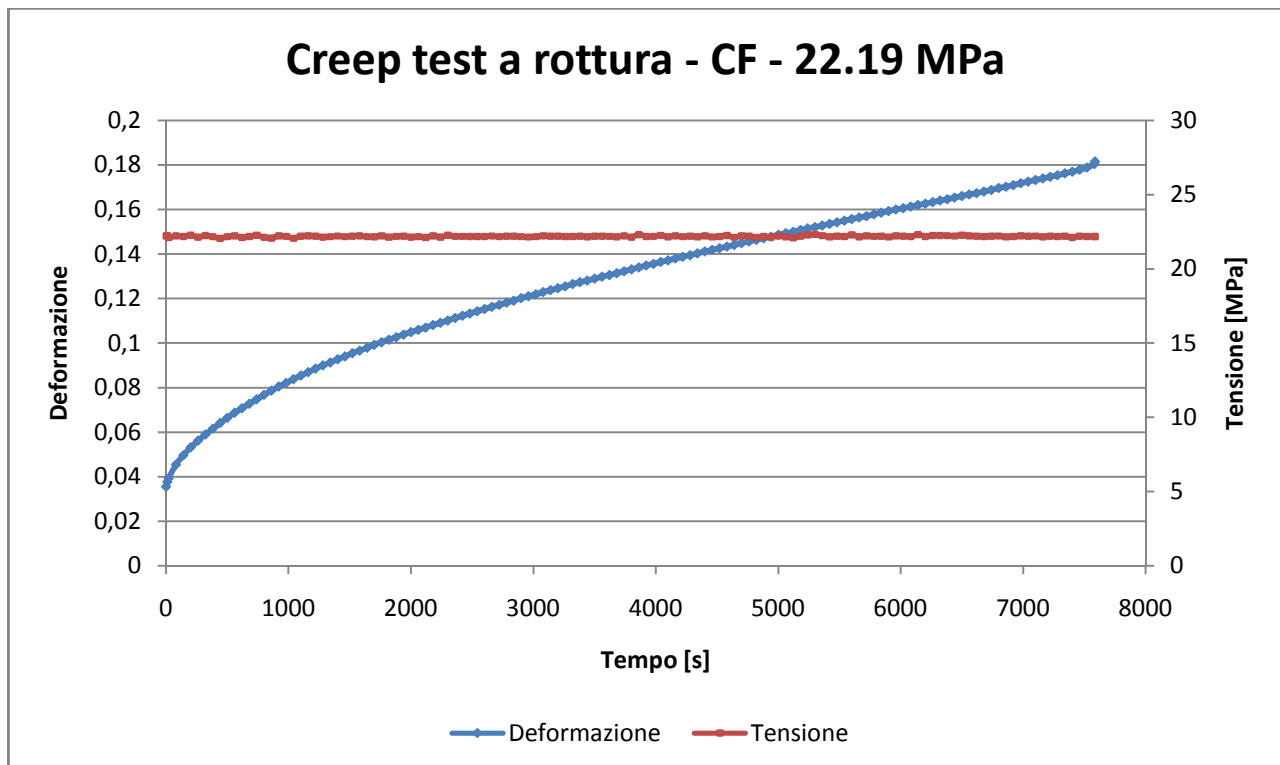


Figura 15 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CF, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 22.19 MPa.

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
2	CF	925	22.3338243	22.19382	0.181501667	7586.8

Osservazioni:

- Si noti che non è presente alcuna cavità all'interno della sezione di rottura.
- Inoltre la forza applicata mediamente è stata leggermente inferiore (circa 10 N) rispetto al valore di target.

- Questi due fatti hanno generato una tensione media effettiva inferiore rispetto a quella teorica.
- La prova ha avuto una durata sufficientemente lunga da permettere di osservare un fenomeno di deriva nella cella di carico. Infatti all'inizio del test il valore di offset della forza era pari a -38 N, mentre alla fine del test è stato registrato un offset pari a -46 N.
- L'andamento della tensione si dimostra costante intorno al valore medio effettivo, entro un intervallo di $\pm 0.2 \text{ MPa}$.
- Come nei casi precedenti il creep terziario è presente ma ha una durata breve rispetto al tempo complessivo.
- Si noti anche che probabilmente a causa dell'assenza di cavità si ha avuto un notevole allungamento a rottura, superiore alla maggior parte degli altri test.

Provino CG - 900 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (μm)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (μm^2)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.9	3.81	0.645762712	0.8	0.516610169	40.90038983

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

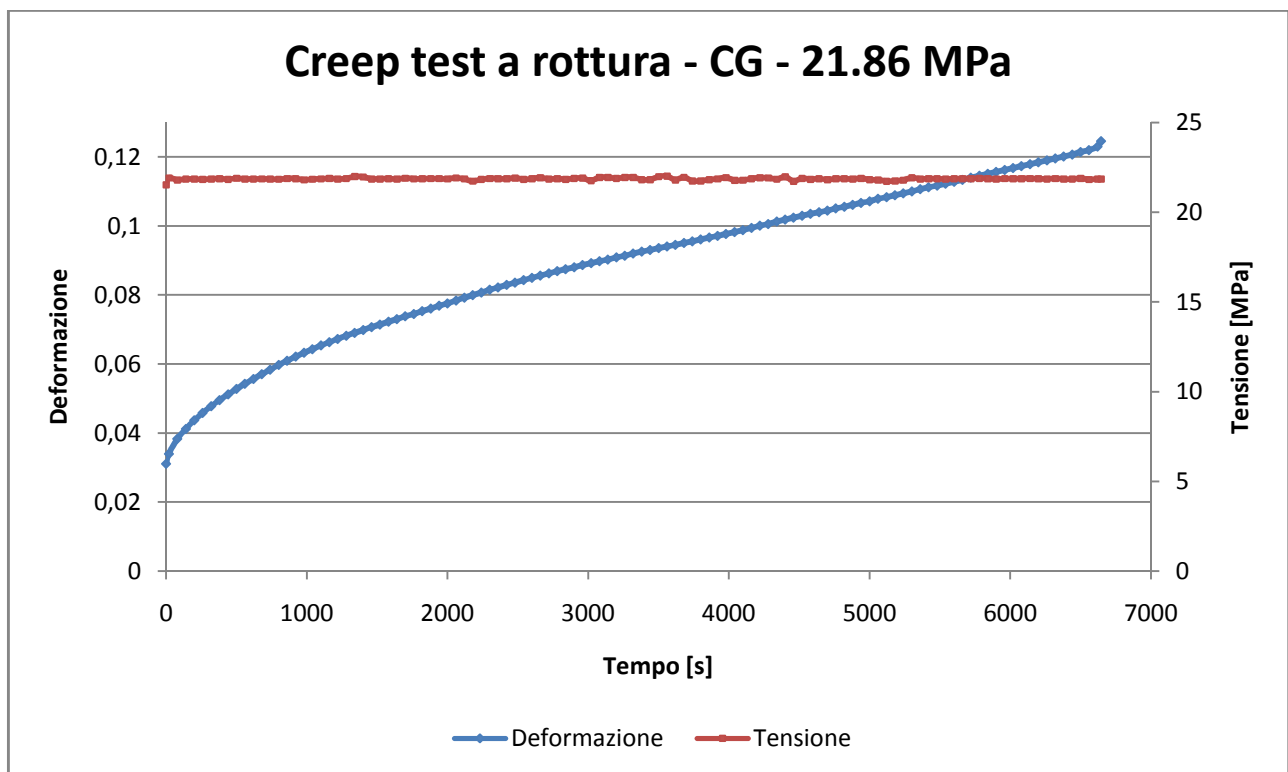


Figura 16 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CG, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 21.86 MPa.

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
2	CG	900	21.7302074	21.860005	0.124586833	6645.9

Osservazioni:

- Il valore della forza durante il test è stato mediamente uguale al valore della forza impostato come target.
- È presente una cavità sulla superficie di rottura, ma è di dimensioni limitate, per cui la tensione effettiva aumenta di poco rispetto al valore teorico.
- L'allungamento a rottura è stato superiore alla media probabilmente a causa delle piccole dimensioni della cavità.
- L'andamento della tensione effettiva è costante e pari al valore medio effettivo entro un intervallo di incertezza di $\pm 0.23 \text{ MP}$.
- Anche in questo caso è presente la fase terziaria del creep e si manifesta nelle fasi conclusive del test riguardando solo una piccola parte della durata complessiva.

Provino CH - 875 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	6	3.83	0.638333333	4.1	2.617166667	38.79983333

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
2	CH	875	21.1265905	22.408703	0.086439167	10299.5

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

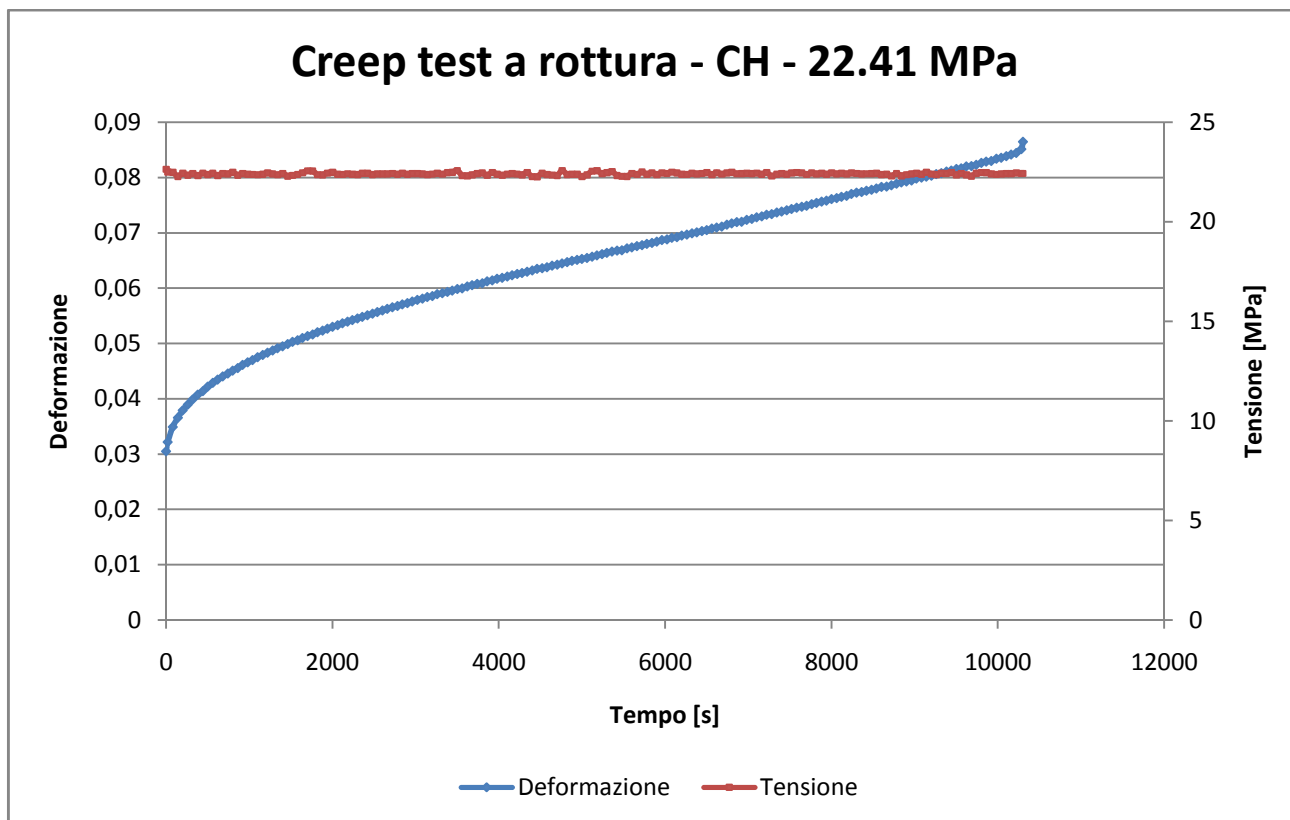


Figura 17 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CH, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 22.41 MPa.

Osservazioni:

- In questo caso la forza che ha interessato il provino è stata mediamente di 10 N inferiore rispetto al valore di target.
- Inoltre la sezione di rottura presenta una cavità di dimensioni generose che aumenta la tensione effettiva sul provino.
- La combinazione di questi due fatti porta ad un innalzamento della tensione media effettiva rispetto a quella teorica di circa 1.3 MPa. L'effetto della notevole riduzione della sezione avrebbe fatto attendere un valore di tensione effettiva maggiore di quanto si è ottenuto, questo perché il valore della forza applicata è stato mediamente inferiore a quello obiettivo.
- La tensione effettiva si dimostra costante intorno al valore di tensione media effettiva con un'incertezza di $\pm 0.20 \text{ MP}$.
- Anche in questo caso il creep terziario è presente ma interessa una piccola aliquota del tempo complessivo di test.
- La lunga durata del test ha permesso di rivelare un effetto di deriva della cella di carico: infatti all'inizio del test si aveva un offset della forza pari a -6 N, mentre alla fine ha raggiunto -21 N.

Provino CI - 850 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.9	3.83	0.649152542	3.3	2.14220339	39.27479661

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

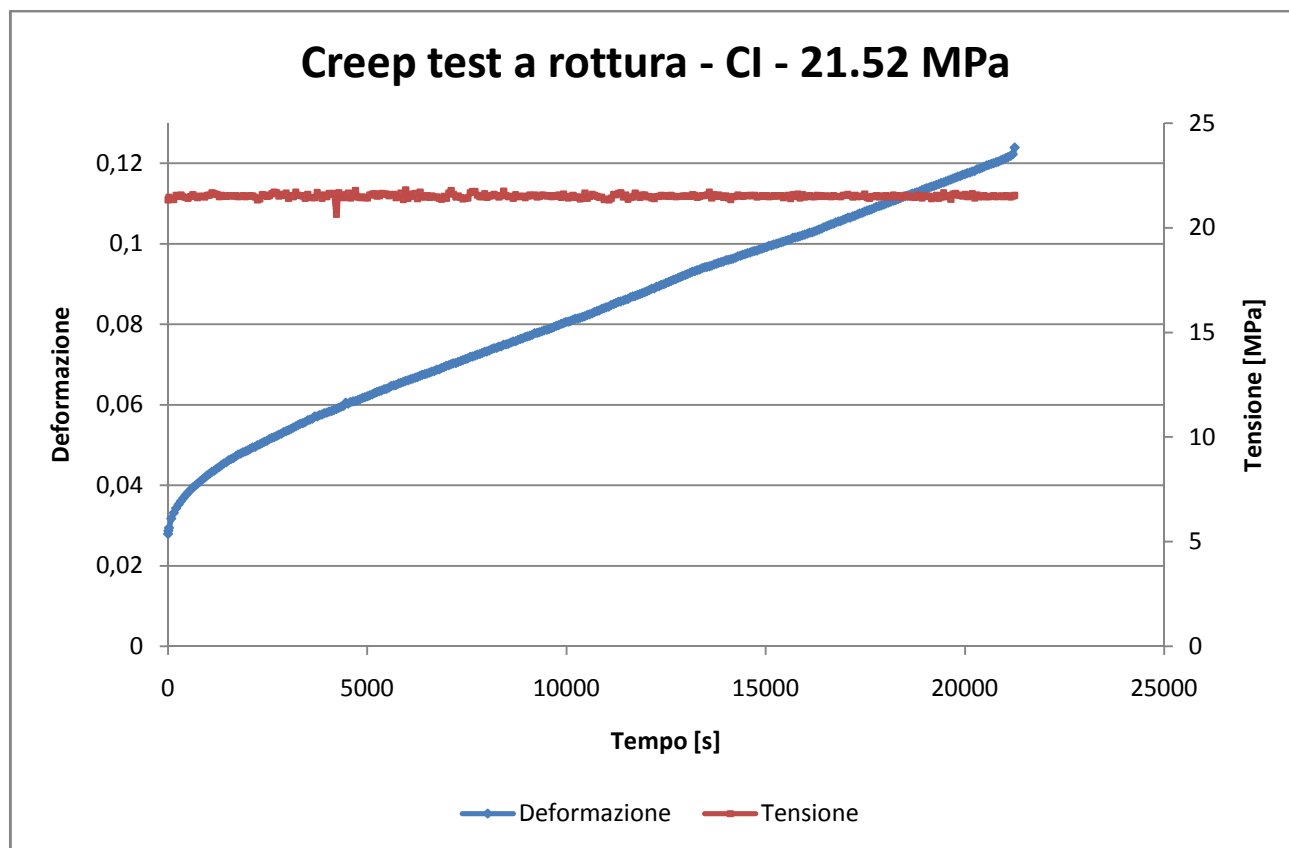


Figura 18 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CI, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 21.52 MPa.

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
2	CI	850	20.5229737	21.517936	0.1239445	21244.7

Osservazioni:

- È presente una cavità di dimensioni generose, superiori alla media.
- La forza applicata al provino è stata in media molto vicina alla forza di target.
- Infatti si ha una tensione media effettiva superiore di circa 1 MPa a quella media teorica.
- La tensione sembra avere delle discontinuità non trascurabili: infatti oltre a notarlo visivamente dal grafico, la tensione media effettiva ha un intervallo di incertezza di circa $\pm 0.6 \text{ MP}$, che è più ampio rispetto gli altri casi.
- Anche in questo caso il creep terziario si manifesta negli ultimo frangente del test, occupando una piccola percentuale del tempo complessivo di test.

- Inoltre è presente anche in questo caso un fenomeno di deriva: inizialmente si ha un offset della forza pari a + 3 N mentre alla fine è pari a - 37 N.

SERIE 3

Provino CJ - 1050 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	6	3.85	0.641666667	2.5	1.604166667	39.81283333

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

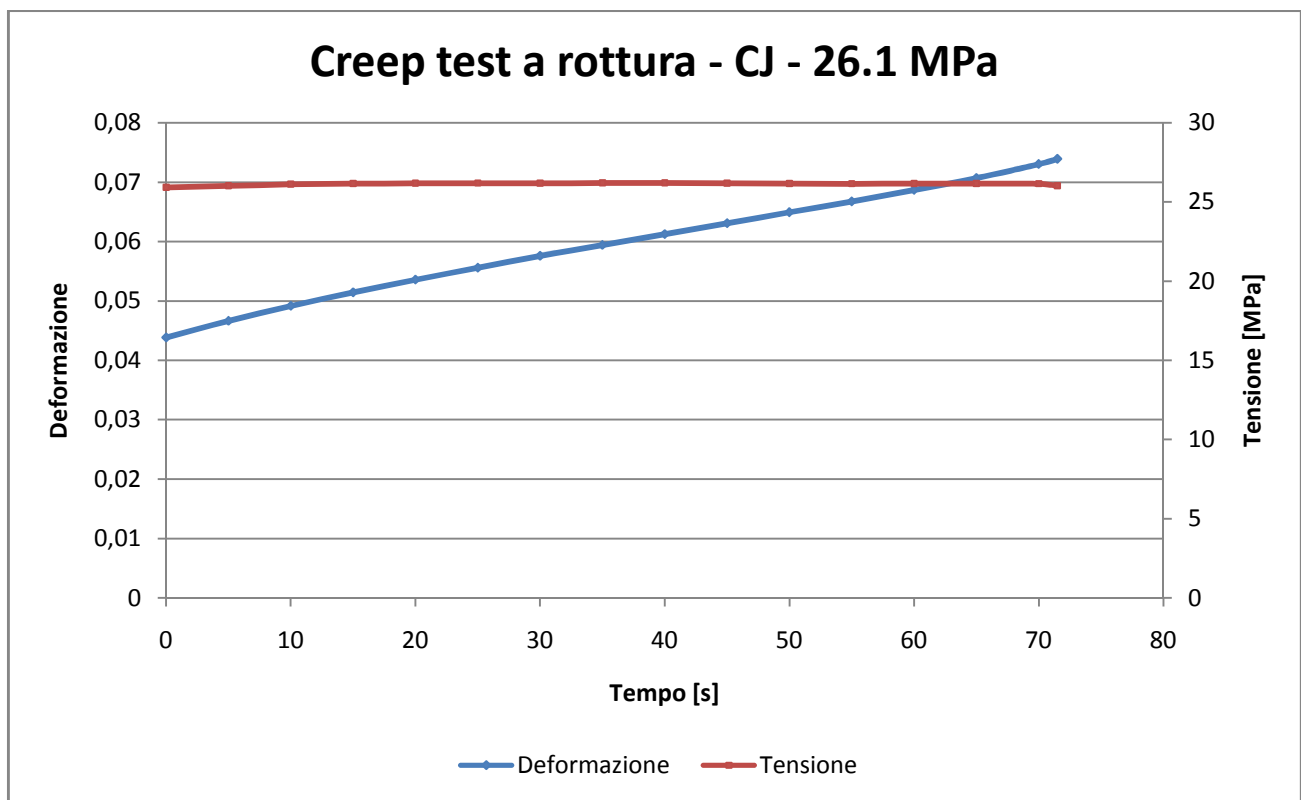


Figura 19 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CJ, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 26.1 MPa.

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
3	CJ	1050	25.3519086	26.097382	0.073908	71.5

Osservazioni:

- È presente una cavità di dimensioni medio - grandi e di forma ellittica regolare.
- Mediamente il valore della forza applicato è inferiore rispetto al valore di target di circa 10 N.
- La riduzione dell'area utile della sezione di frattura ha portato ad avere un valore di tensione media effettiva superiore a quello teorico di circa 0.8 MPa.
- La tensione tieffettiva si dimostra essere particolarmente stabile, infatti il suo valore si può considerare mediamente pari al valore medio effettivo entro un intervallo di incertezza di circa $\pm 0.15 MP$.
- In questo caso il creep terziario è impercettibile la transizione da quello secondario non è apprezzabile.
- Attenzione al tempo effettivo di rottura a creep. Nel caso in cui la durata complessiva del test sia particolarmente breve, è giusto considerare il tempo di rottura a creep al netto del transitorio iniziale dovuto al raggiungimento della tensione di creep costante. Si deve quindi togliere i primi 20 secondi e quindi adeguare i dati correggendo il tempo a rottura.

Provino CK - 1030 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.8	3.86	0.665517241	3.8	2.528965517	38.88803448

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
3	CK	1030	24.8690151	26.11314	0.072718667	69.96

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

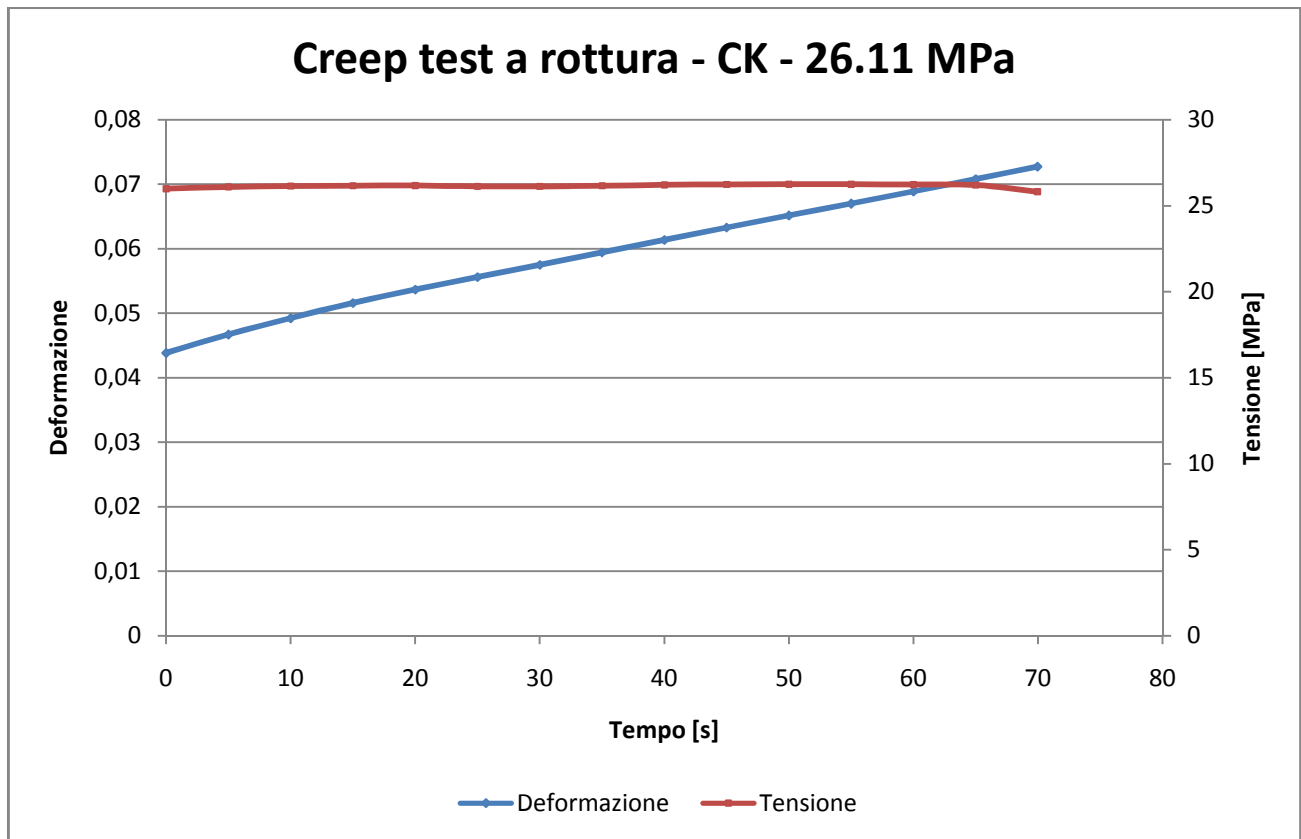


Figura 20 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CK, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 26.11 MPa.

Osservazioni:

- È presente una cavità di dimensioni generose e di forma irregolare: come in altri sporadici casi la cavità è a forma di "D".
- Il valore della forza effettivamente registrato dalla cella di carico è stato mediamente uguale al valore impostato come obiettivo.
- Il fatto però che ci sia una cavità così ampia ha portato ad un incremento della tensione effettiva nel provino di circa 1.3 MPa.
- La tensione effettiva si è dimostrata particolarmente costante in questo caso. Infatti essa è pari al valore medio effettivo con un'incertezza di $\pm 0.2 \text{ MP}$.

- In questo caso il creep terziario sembra non essere presente, probabilmente a causa di un cedimento prematuro del provino dovuto alla presenza della cavità di grandi dimensioni e irregolare.

Provino CL- 1010 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (μm)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (μm ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.9	3.87	0.655932203	3.2	2.098983051	39.31801695

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

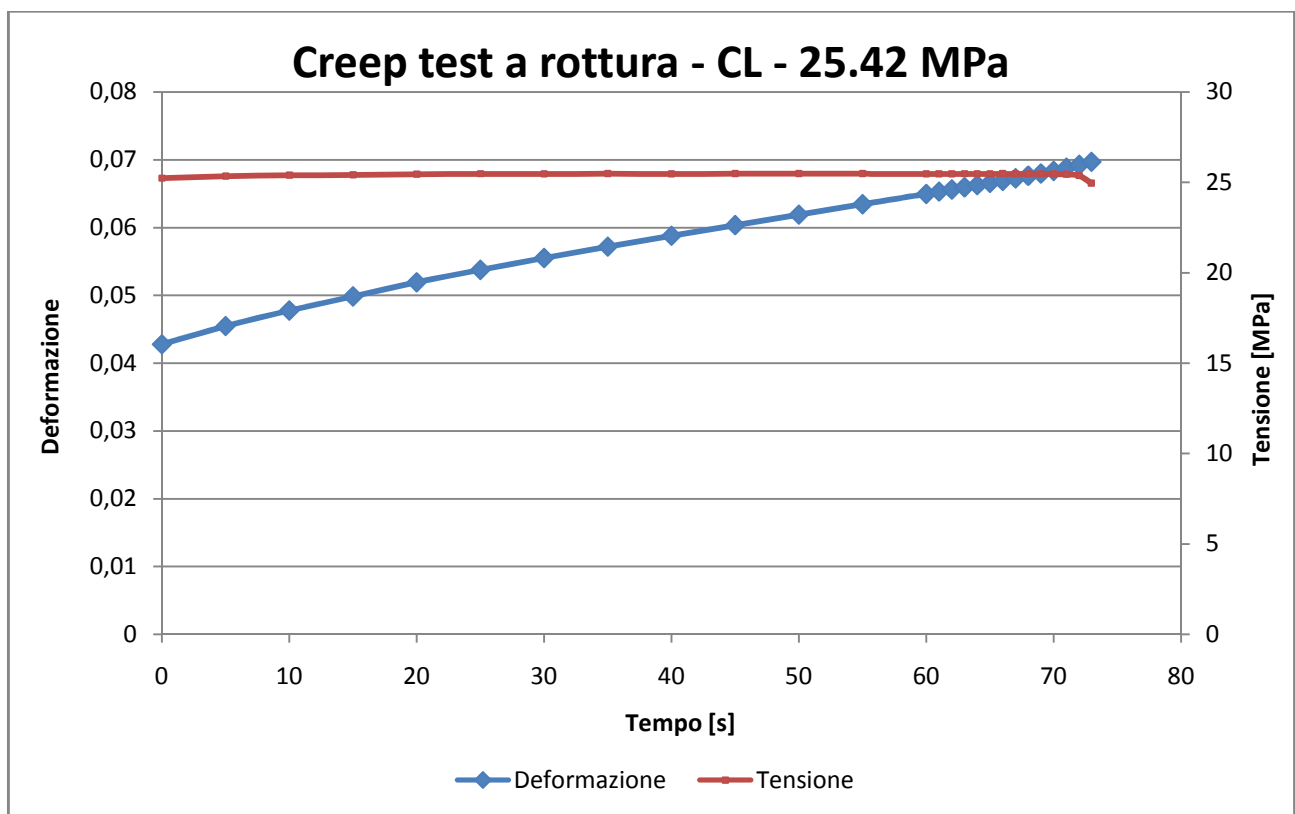


Figura 21 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CL, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 25.41 MPa.

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
3	CL	1010	24.3861216	25.42281	0.069666667	72.96

Osservazioni:

- È presente una grande cavità al centro di dimensioni superiori alla media, ma la forma è regolare.
- Inoltre si noti che il carico raggiunto dal sistema di controllo della cella di carico è mediamente pari al valore di target impostato.
- Per i motivi sopracitati il valore della tensione media effettiva risulta essere superiore a quello teorico di circa 1 MPa e rimane costante con un'incertezza pari a $\pm 0.27 MP$.
- Si noti che a causa della breve durata del test si ha difficoltà a distinguere le tre fasi del creep. In particolare si noti che sebbene la curva sembri a pendenza costante, facendo attenzione è possibile osservare una transizione diretta dal creep primario al creep terziario: l'assenza del creep secondario (o comunque la sua limitata estensione) probabilmente è dovuta al carico molto elevato.

Provino CM- 975 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.7	3.81	0.668421053	3.8	2.54	38.877

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
3	CM	975	23.541058	24.876279	0.100171833	543.42

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

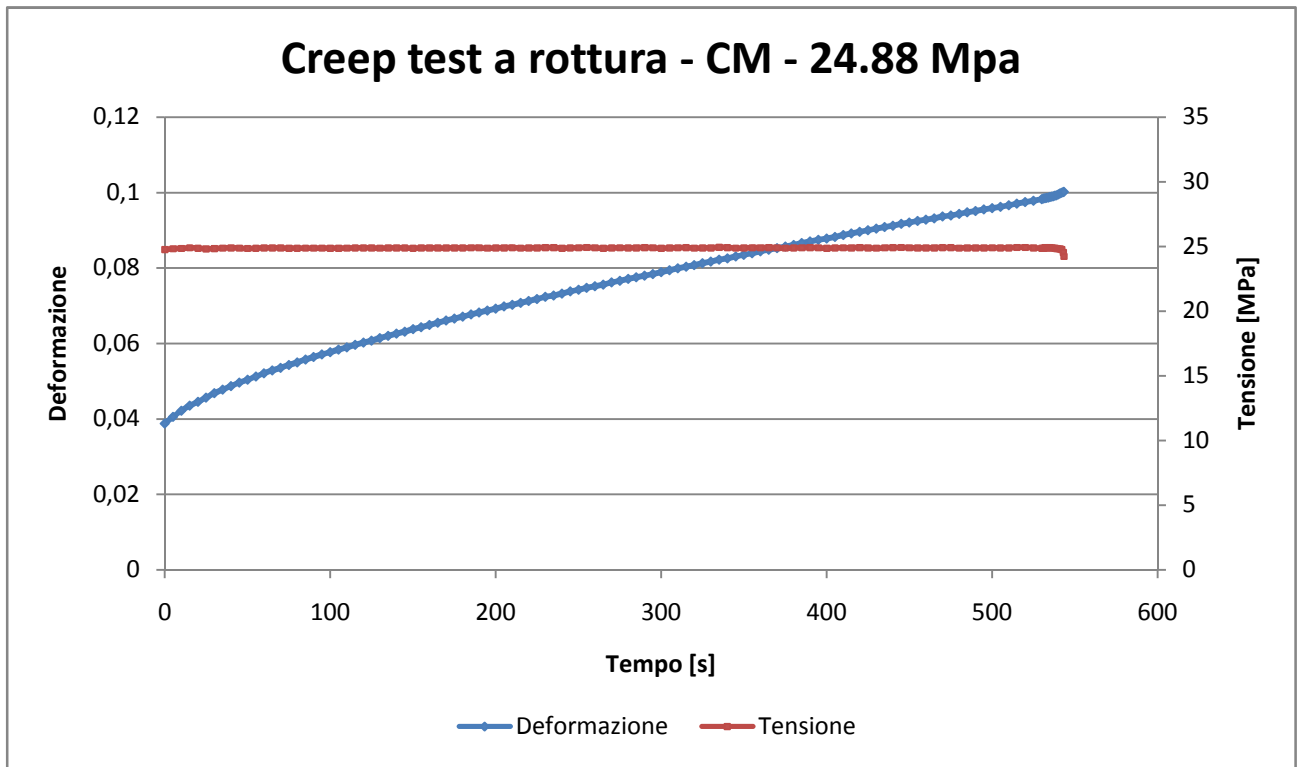


Figura 22 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CM, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 24.88 MPa.

Osservazioni:

- È presente una cavità di dimensioni notevoli e di forma regolare.
- Il valore della forza raggiunto dal sistema è mediamente pari a quello impostato come obiettivo.
- Dunque il valore della tensione media effettiva risulta essere 1.3 MPa superiore a quello medio teorico. Inoltre rimane costante con un'incertezza di $\pm 0.35 \text{ MP}$.
- In questo caso è ben visibile la transizione dal creep primario alla fase secondaria, mentre rimane meno chiaro il passaggio dalla fase secondaria a quella terziaria, che si manifesta solamente negli ultimi istanti del test.

Provino CN- 950 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	6	3.82	0.636666667	1.4	0.891333333	40.52566667

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
3	CN	950	22.9374411	23.288526	0.100383667	1267.34

Osservazioni:

- Il carico di forza effettivamente applicato dal sistema di controllo è stato inferiore di circa 7 N rispetto al valore di target.
- È presente una cavità di dimensioni medio piccole.
- Questi due fattori insieme hanno portato ad una tensione media effettiva superiore a quella teorica di solo circa 0.3 MPa.
- Inoltre la tensione media effettiva può considerarsi costante entro un intervallo di incertezza molto ristretto di circa $\pm 0.05 \text{ MP}$.
- Come nel caso precedente anche in questo la transizione dal creep primario a secondario è evidente, come pure lo sviluppo del secondario. È molto limitato invece il creep terziario.

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

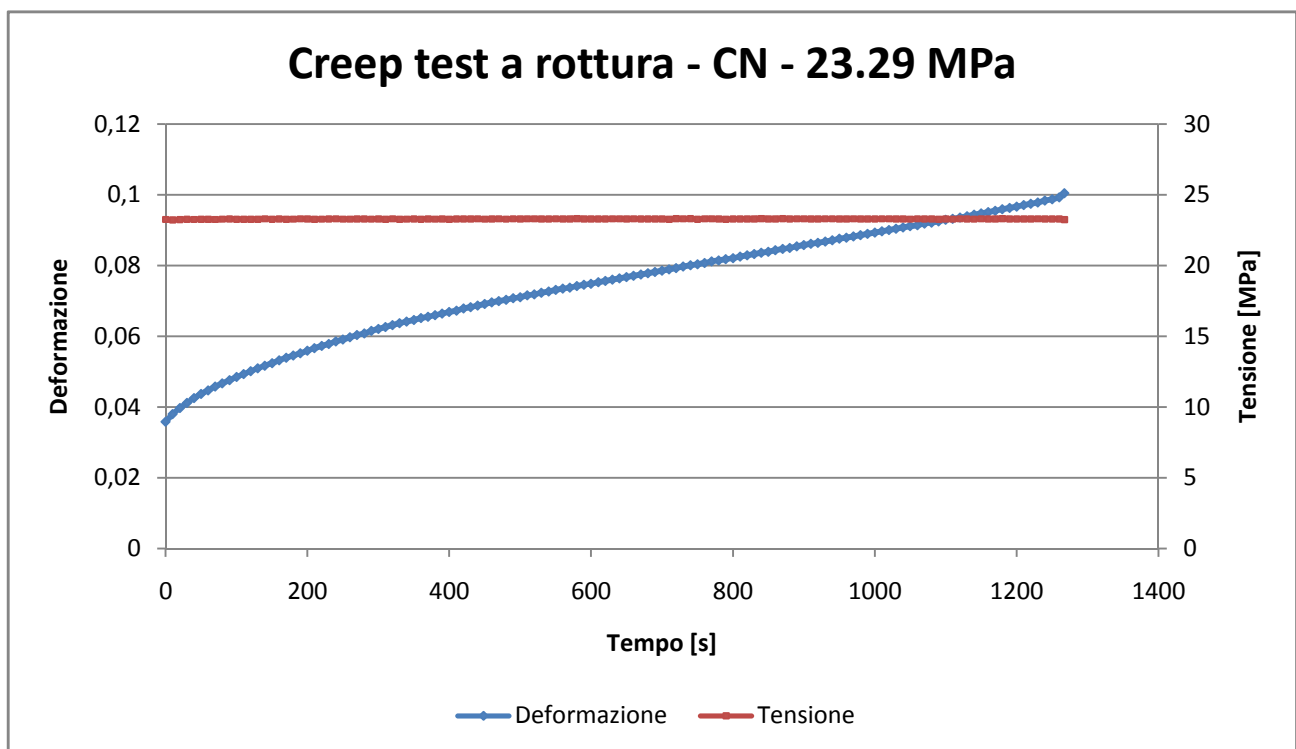


Figura 23 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CN, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 23,29 MPa.

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	6	3.87	0.645	0.7	0.4515	40.9655

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
3	CO	925	22.3338243	22.417354	0.072343667	571.28

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

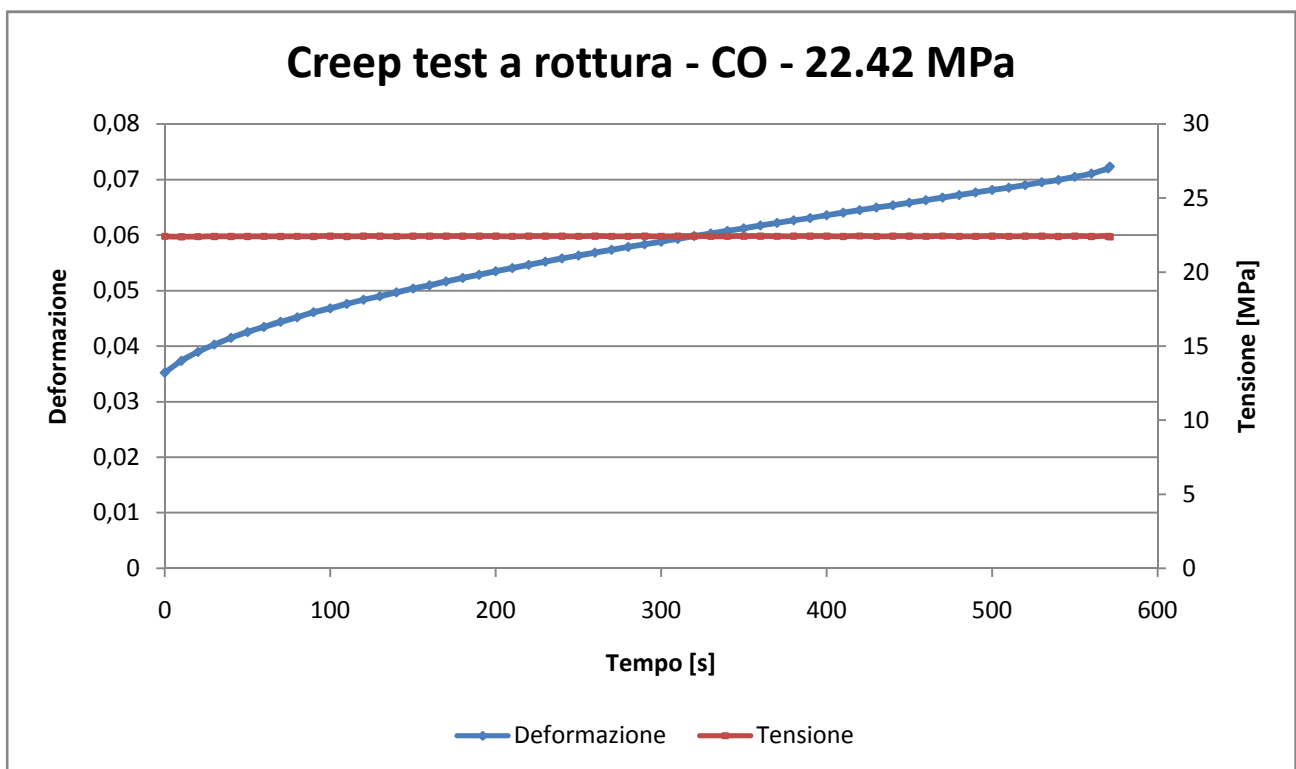


Figura 24 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CO, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 22.42 MPa.

Osservazioni:

- La cavità presente è di dimensioni piccole, sotto la media.

- Il carico della forza effettivamente misurato è leggermente inferiore del carico target settato inizialmente.
- Il valore della tensione media effettiva è superiore a quello teorico di nemmeno 0.1 MPa. Inoltre la tensione media effettiva si può considerare costante con un'incertezza di circa $\pm 0.03 \text{ MP}$.
- Anche in questo caso è interessante notare come la transizione da creep primario a secondario sia evidente, mentre quella dal secondario a terziario sia molto prossima alla rottura del provino: infatti la terza fase dura particolarmente poco, in relazione al tempo complessivo.
- Per questo livello di carico ci si sarebbe aspettati una rottura ad un tempo decisamente maggiore. È difficile determinare la causa di questo cedimento inaspettato, anche perché la cavità presente è di piccole dimensioni e di forma piuttosto regolare.

Provino CP- 900 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.7	3.82	0.670175439	1.1	0.737192982	40.67980702

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

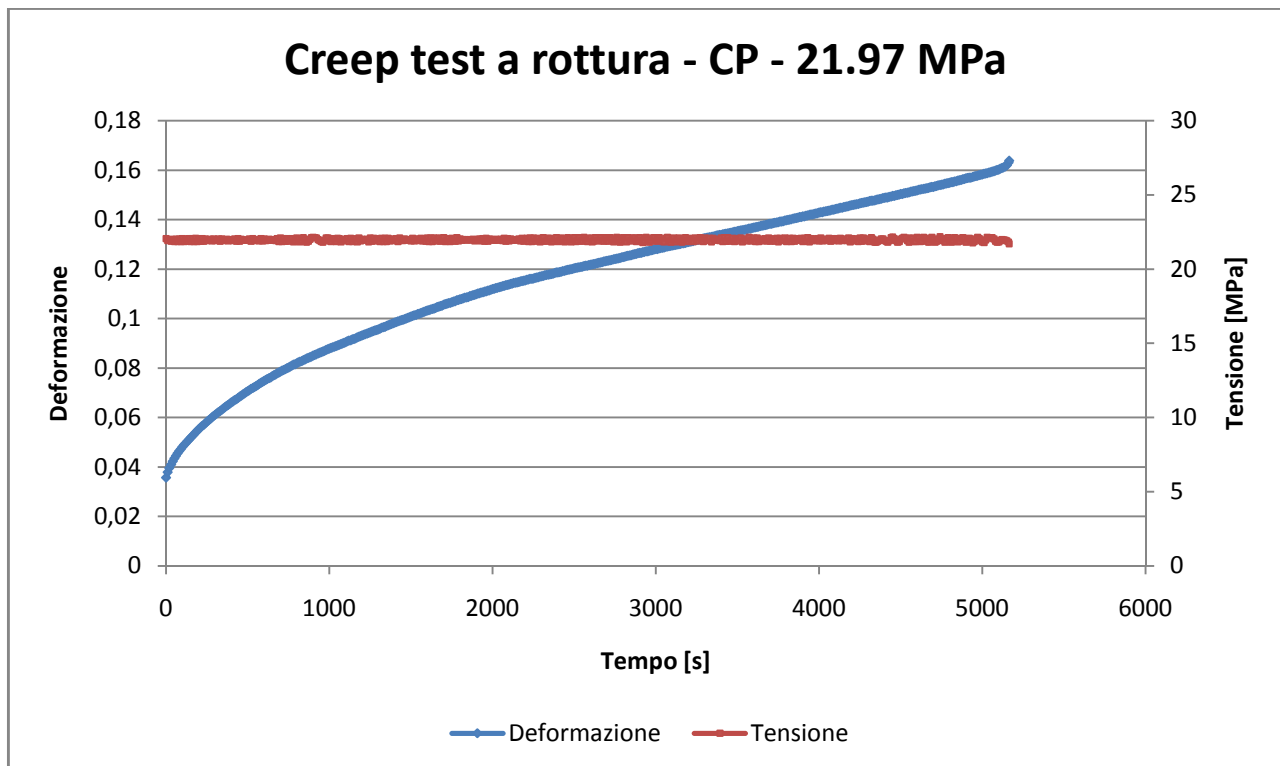


Figura 25 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CP, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 21.97 MPa.

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
3	CP	900	21.7302074	21.972749	0.163791667	5163.5

Osservazioni:

- Anche in questo caso la cavità presente è di dimensioni ridotte e il carico di forza applicato effettivamente è stato leggermente inferiore (5 N) rispetto a quello impostato come target.
- La tensione media effettiva risulta leggermente superiore a quella teorica (di circa 0.25 MPa) e può essere considerata costante con un'incertezza di ± 0.24 MPa.
- È chiaramente visibile la transizione da creep primario a secondario, mentre quella dal secondario a terziario è molto ridotta ed è presente solo nell'ultimo periodo del test. Il creep terziario occupa solo una minima frazione temporale del test compressivo.
- Inoltre, essendo il test di lunga durata, è stato possibile constatare la presenza di un effetto di deriva nell'acquisizione del segnale della cella di carico. Infatti inizialmente l'offset della forza era pari a -35 N, mentre alla fine del test è risultato essere pari a -47 N.

Provino CQ- 875 N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (um)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (um ²)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.8	3.84	0.662068966	3.7	2.449655172	38.96734483

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
3	CQ	875	21.1265905	22.304881	0.108494833	5137.9

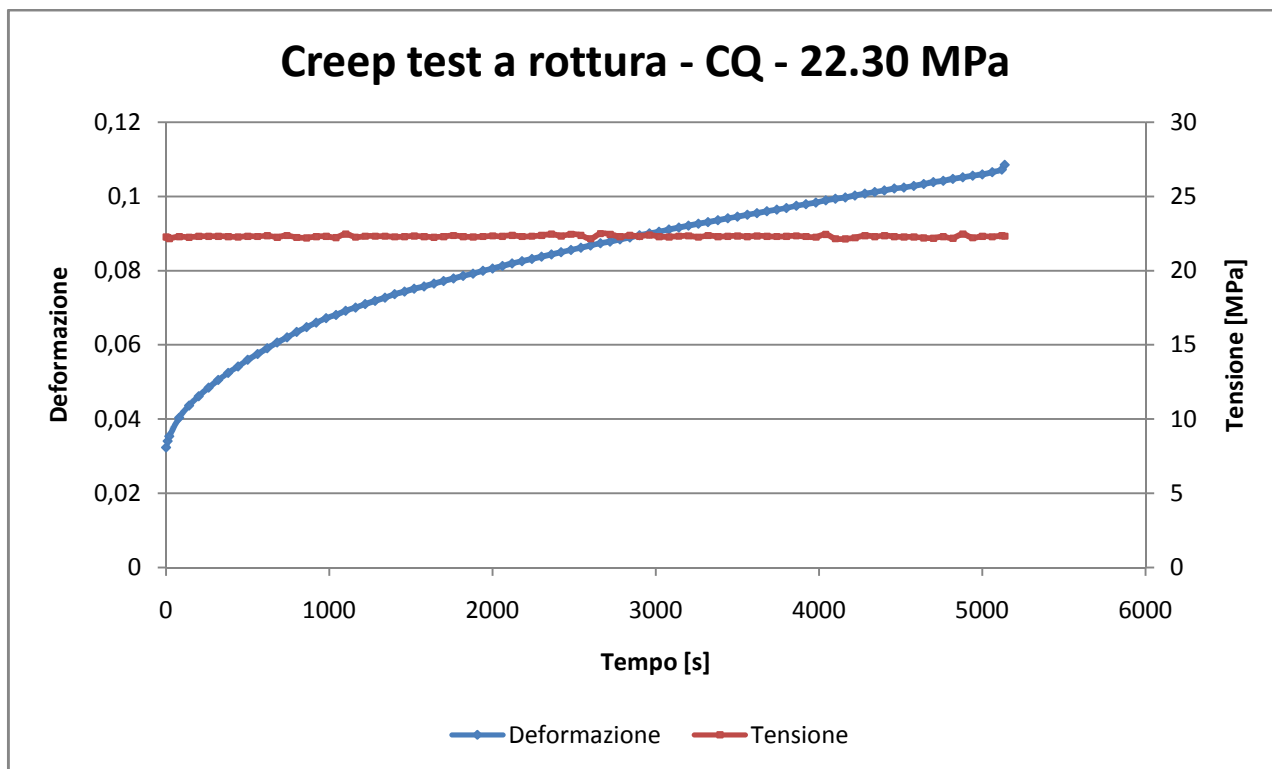


Figura 26 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CQ, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 22.30 MPa.

Osservazioni:

- È presente una cavità di notevoli dimensioni al centro della sezione di rottura a forma di ellisse regolare.
- La forza applicata è mediamente pari a quella impostata come obbiettivo.
- La tensione media effettiva è superiore di 1.2 MPa circa rispetto a quella teorica a causa principalmente della grande cavità presente. Inoltre questo valore può considerarsi costante entro un'incertezza di $\pm 0.18 \text{ MP}$.
- Come per i casi precedenti anche in questo la transizione dal creep primario a secondario è molto evidente, mentre quella dal secondario al terziario avviene verso la fine del test e si manifesta in un intervallo temporale ristretto. Come pure la fase terziaria del creep ha una durata relativa (rispetto al tempo complessivo del test) molto breve.
- Anche in questo caso è possibile notare una isteresi della cella di carico: infatti a inizio test l'offset della forza era pari a - 47 N, mentre alla fine del test risultava pari a -51 N.

Provino CR - 850N

Determinare l'area netta della sezione di frattura.

AREA LORDA (mm ²)	L1 - rif. (μm)	L1 - rif. (mm)	1 u.m. = X mm (conv.)	SEZIONE CAVITA' (μm^2)	SEZIONE CAVITA' (mm ²)	AREA NETTA (mm ²)
41.417	5.8	3.85	0.663793103	2.3	1.526724138	39.89027586

I risultati del test sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
3	CR	850	20.5229737	20.817312	0.090625	12239.9

Si riportano le curve relative al creep test a rottura: tensione netta e deformazione in funzione del tempo.

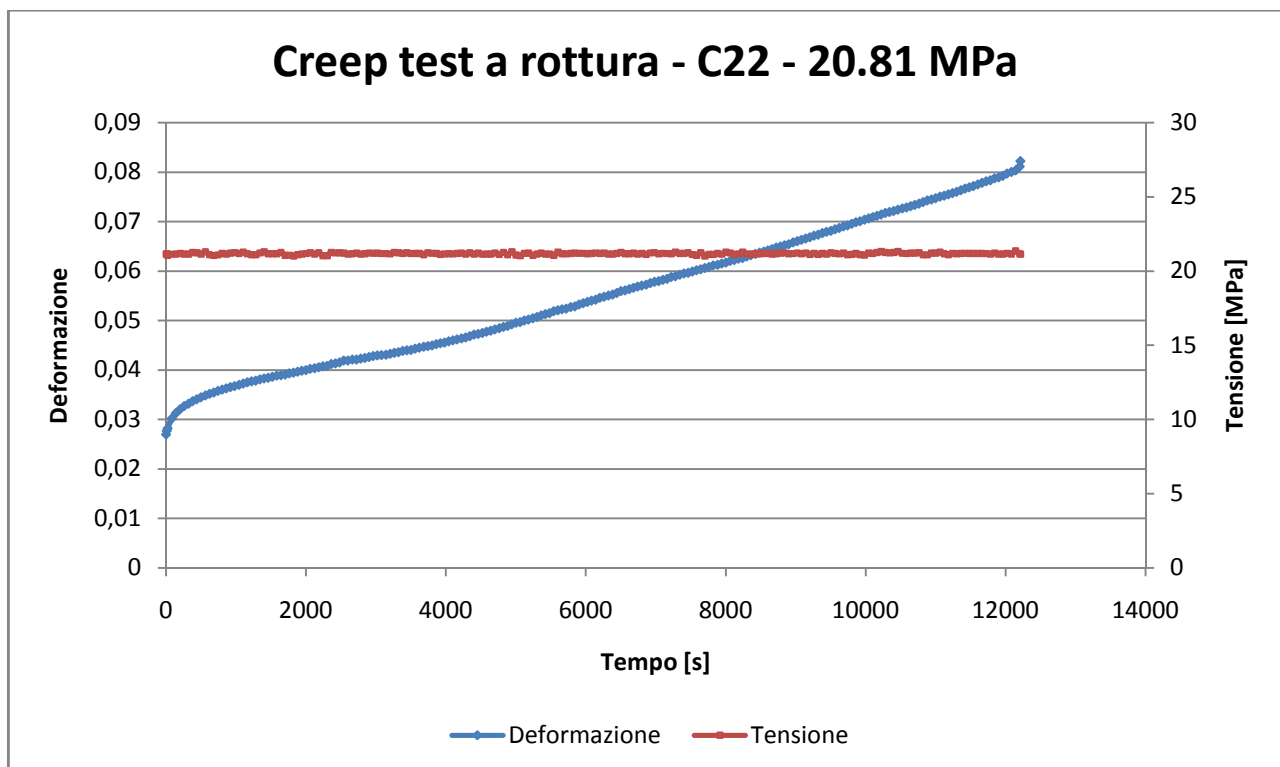


Figura 27 - diagramma della tensione e della deformazione in funzione del tempo ottenuto dal creep test a rottura del provino CR, sottoposto ad un carico di creep medio pari a 20.81 MPa.

Osservazioni:

- È presente una cavità di dimensioni medio grandi.
- La forza a cui è sottoposto il provino risulta essere in media leggermente inferiore (circa 5 N) rispetto a quella impostata come valore target.
- Quindi la tensione netta effettiva risulta essere superiore a quella teorica di circa 0.3 MPa. Ad ogni modo si può considerare costante intorno al valore medio effettivo con un'incertezza di $\pm 0.18 \text{ MP}$.

- La transizione dal creep primario a quello secondario è evidente e avviene progressivamente in un tempo abbastanza lungo. Il passaggio dalla fase secondaria a quella terziaria invece avviene repentinamente e poco tempo prima della rottura del provino.
- Anche qui è presente un effetto di deriva della cella di carico. L'offset della forza appena prima di cominciare il test era pari a -49 N, mentre alla fine del test è stato ricalcolato e il suo valore era passato a - 69 N.

CREEP A ROTTURA - ANALISI DATI E BEST FIT MODELLI

In questo capitolo si analizzino i risultati ottenuti dai test di creep a rottura. Dopo averli commentati si cerchi di ricavare dei dati utili e significativi per eseguire il best fit dei modelli teorici di creep a rottura, ricordando che è necessario conoscere una serie di punti caratterizzati dai valori di tensione di creep applicata e dal tempo di rottura a creep.

ANALISI DEI RISULTATI

Nel capitolo precedente sono stati riportati tutti i test di creep a rottura eseguiti. Ora è necessario analizzare i dati di questi test per cercare di determinare le caratteristiche più importanti per quanto riguarda il creep a rottura del materiale preso in esame (il blend PBT/PC). Si consideri che i parametri significativi per i modelli che descrivono questo comportamento sono:

- La tensione a creep applicata al provino;
- Il tempo a rottura a creep, cioè il tempo necessario affinché (per la data tensione a creep) il provino giunga a rottura.

Per ogni test eseguito si possono facilmente ottenere sia la tensione sia il tempo a rottura, ma prima di seguire questo procedimento è bene verificare la bontà e la ripetibilità dei dati test eseguiti: cioè si deve accertare che a carico uguale, la pendenza della curva di creep (tempo - deformazione) rimane costante.

Ci si aspetta dunque che la pendenza della curva di creep sia uguale nei test eseguiti con stessi carichi, ma che la rottura del provino può avvenire anche in momenti diversi a parità di carico a causa della presenza della cavità sulla superficie di frattura.

Per verificare se effettivamente ciò è verificato e per ricavare dei dati utili per la determinazione dei punti (tensione di creep - tempo a rottura) si esegua un'analisi statistica dei dati ricavati per tutti i test.

Innanzitutto si riassumano in un foglio excel i dati salienti di tutti i test eseguiti. I dati sono:

- SERIE: indica il numero della serie di test;
- PROVINO: il nome che identifica il provino utilizzato;
- CARICO TARGET [N]: indica il valore di forza impostato nel controllo di forza della prova;
- TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]: il valore della tensione relativo alla sezione netta e al carico impostato,

$$TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa] = \frac{CARICO TARGET [N]}{AREA LORDA [mm]}$$

- TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]: rappresenta il valore della tensione riferita alla sezione netta ricavato dalla media delle tensioni dai 20 secondi fino alla fine del test;
- DEFORMAZIONE ISTANTANEA INIZIALE: è il valore di deformazione che si ha all'istante iniziale del tempo di creep (cioè a 20 secondi dall'inizio della prova).

- **DEFORMAZIONE A ROTTURA:** è la deformazione alla quale il provino giunge a rottura e corrisponde all'allungamento finale rapportato alla lunghezza iniziale del tratto utile;
- **TEMPO A ROTTURA [s]:** corrisponde al tempo della prova, cioè da quando viene raggiunto il valore del carico di creep fino alla rottura del provino.

Si riportino nella seguente tabella l'insieme dei risultati di tutti i test di rottura a creep eseguiti.

SERIE	PROVINO	CARICO TARGET [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE ISTANTANEA INIZIALE	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1	C1	1050	25.35	25.45	0.042	0.074	84.9
1	C2	1030	24.87	25.32	0.042	0.085	102.1
1	C3	1010	24.39	25.70	0.037	0.084	142.1
1	C4	950	22.94	24.49	0.036	0.077	225.9
1	C5	900	21.73	22.43	0.031	0.114	5787.7
1	C6	875	21.13	21.47	0.029	0.087	9040.7
1	C7	850	20.52	20.39	0.027	0.157	31635
2	CA	1050	25.35	25.99	0.044	0.122	127.97
2	CB	1030	24.87	25.17	0.042	0.077	79.3
2	CC	1010	24.39	24.83	0.043	0.148	370.16
2	CD	975	23.54	24.05	0.039	0.079	260.9
2	CE	950	22.94	23.96	0.036	0.072	408.88
2	CF	925	22.33	22.19	0.035	0.181	7586.8
2	CG	900	21.73	21.86	0.031	0.125	6645.9
2	CH	875	21.13	22.41	0.030	0.086	10299.5
2	CI	850	20.53	21.52	0.028	0.124	21244.7
3	CJ	1050	25.35	26.09	0.044	0.074	71.5
3	CK	1030	24.87	26.11	0.044	0.073	69.96
3	CL	1010	24.39	25.42	0.043	0.069	72.96
3	CM	975	22.94	24.88	0.039	0.100	543.42
3	CN	950	21.73	23.29	0.036	0.100	1267.34
3	CO	925	21.13	22.42	0.035	0.072	571.28
3	CP	900	20.52	21.97	0.036	0.164	5163.5
3	CQ	875	25.35	22.30	0.032	0.108	5137.9
3	CR	850	24.87	20.82	0.027	0.091	12239.9

Tabella 1 - riassunto dei test di creep a rottura eseguiti

A questo punto si ha a disposizione una panoramica dei risultati ottenuti in termini di tensione, deformazione e tempo. Si osservi innanzitutto che a causa della presenza di cavità all'interno della superficie di rottura non si hanno dei livelli di tensione precisi, come si voleva in principio. Per questo motivo è necessario eseguire un'analisi statistica per ottenere dei valori significativi per i modelli di creep a rottura.

Si cominci innanzitutto con ordinare i dati riassunti precedentemente in base ad un criterio di tensione media effettiva crescente, così da poterli dividere in classi di appartenenza. I dati dei test ordinati per tensione crescente sono riportati nella seguente tabella.

SERIE	PROVINO	CARICO IMPOSTATO [N]	TENSIONE MEDIA TEORICA [MPa]	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE ISTANTANEA INIZIALE	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1	C7	850.00	20.52	20.40	0.028	0.157	31635.00
3	CR	850.00	20.52	20.82	0.027	0.091	12239.90
1	C6	875.00	21.13	21.47	0.029	0.087	9040.70
2	CI	850.00	20.52	21.52	0.028	0.124	21244.70
2	CG	900.00	21.73	21.86	0.031	0.125	6645.90
3	CP	900.00	21.73	21.97	0.036	0.164	5163.50
2	CF	925.00	22.33	22.19	0.035	0.182	7586.80
3	CQ	875.00	21.13	22.30	0.032	0.108	5137.90
2	CH	875.00	21.13	22.41	0.031	0.086	10299.50
3	CO	925.00	22.33	22.42	0.035	0.072	571.28
1	C5	900.00	21.73	22.43	0.032	0.114	5787.70
3	CN	950.00	22.94	23.29	0.036	0.100	1267.34
2	CE	950.00	22.94	23.96	0.037	0.072	408.88
2	CD	975.00	23.54	24.05	0.039	0.079	260.90
1	C4	950.00	22.94	24.49	0.036	0.077	225.90
2	CC	1010.00	24.39	24.83	0.044	0.148	370.16
3	CM	975.00	23.54	24.88	0.039	0.100	543.42
2	CB	1030.00	24.87	25.17	0.042	0.077	79.30
1	C2	1030.00	24.87	25.32	0.042	0.085	102.10
3	CL	1010.00	24.39	25.42	0.043	0.070	72.96
1	C1	1050.00	25.35	25.45	0.042	0.074	84.90
1	C3	1010.00	24.39	25.70	0.037	0.084	142.10
2	CA	1050.00	25.35	25.99	0.044	0.122	127.97
3	CJ	1050.00	25.35	26.10	0.044	0.074	71.50
3	CK	1030.00	24.87	26.11	0.044	0.073	69.96

Tabella 2 - dati riassuntivi creep test a rottura ordinati in funzione della tensione media effettiva crescente.

A questo punto si suggerisca di dividere i test in un numero significativo di classi di appartenenza suggerito dalla teoria, seguendo la formula.

$$N^{\circ} \text{ classi di appartenenza} = \sqrt{n^{\circ} \text{ dati}} = \sqrt{25} = 5$$

Quindi si prenda il valore di tensione minimo e il valore di tensione massimo e si dividano i dati seguendo il procedimento:

- Individuo l'intervallo di tensione comprendente i dati a disposizione:

$$\Delta\sigma = \sigma_{media\ effettiva\ max} - \sigma_{media\ effettiva\ min}$$

- Determino l'intervallo di tensione in MPa, relativo ad una singola classe:

$$\Delta\sigma_j = \frac{\Delta\sigma}{N^{\circ}\ classi\ di\ appartenenza}$$

- In questo modo sono state determinate le seguenti classi di appartenenza:

CLASSE j-esima	σ_j media effettiva min		σ_j media effettiva max
	[MPa]		[MPa]
Classe 1	20.39514	$\leq \sigma_j <$	21.53873628
Classe 2	21.53874	$\leq \sigma_j <$	22.68233726
Classe 3	22.68234	$\leq \sigma_j <$	23.82593824
Classe 4	23.82594	$\leq \sigma_j <$	24.96953921
Classe 5	24.96954	$\leq \sigma_j <$	26.11314019

Tabella 3 - Suddivisione in classi d'appartenenza

Dove j indica la numerazione della classe, mentre il pedice i indica la numerazione delle tensioni medie effettive del test i-esimo.

Confronto curve di creep

Ora si prendano tutte le prove di creep che hanno una tensione media effettiva appartenente all'intervallo della j-esima classe. E per ciascuna classe di appartenenza si rappresentino in un diagramma le relative curve di creep a rottura per analizzarne graficamente l'andamento, accompagnato da una tabella che esprima i dati salienti di ciascun test, ordinati sempre per tensione media effettiva crescente.

CLASSE 1

N° TEST	SERIE	PROVINO	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE ELASTICA ISTANTANEA	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1°	1	C7	20.40	0.028	0.157	31635
2°	3	CR	20.82	0.027	0.091	12239.9
3°	1	C6	21.47	0.029	0.087	9040.7
4°	2	CI	21.52	0.028	0.124	21244.7

Tabella 4 - Creep test appartenenti alla 1ª classe d'appartenenza

Osservazioni:

- Si noti che la pendenza delle curve di creep è ragionevolmente molto simile in tutti i casi: ciò significa che la velocità di deformazione è all'incirca uguale in tutti e quattro i casi.
- Le curve differiscono per la deformazione e il tempo a rottura.

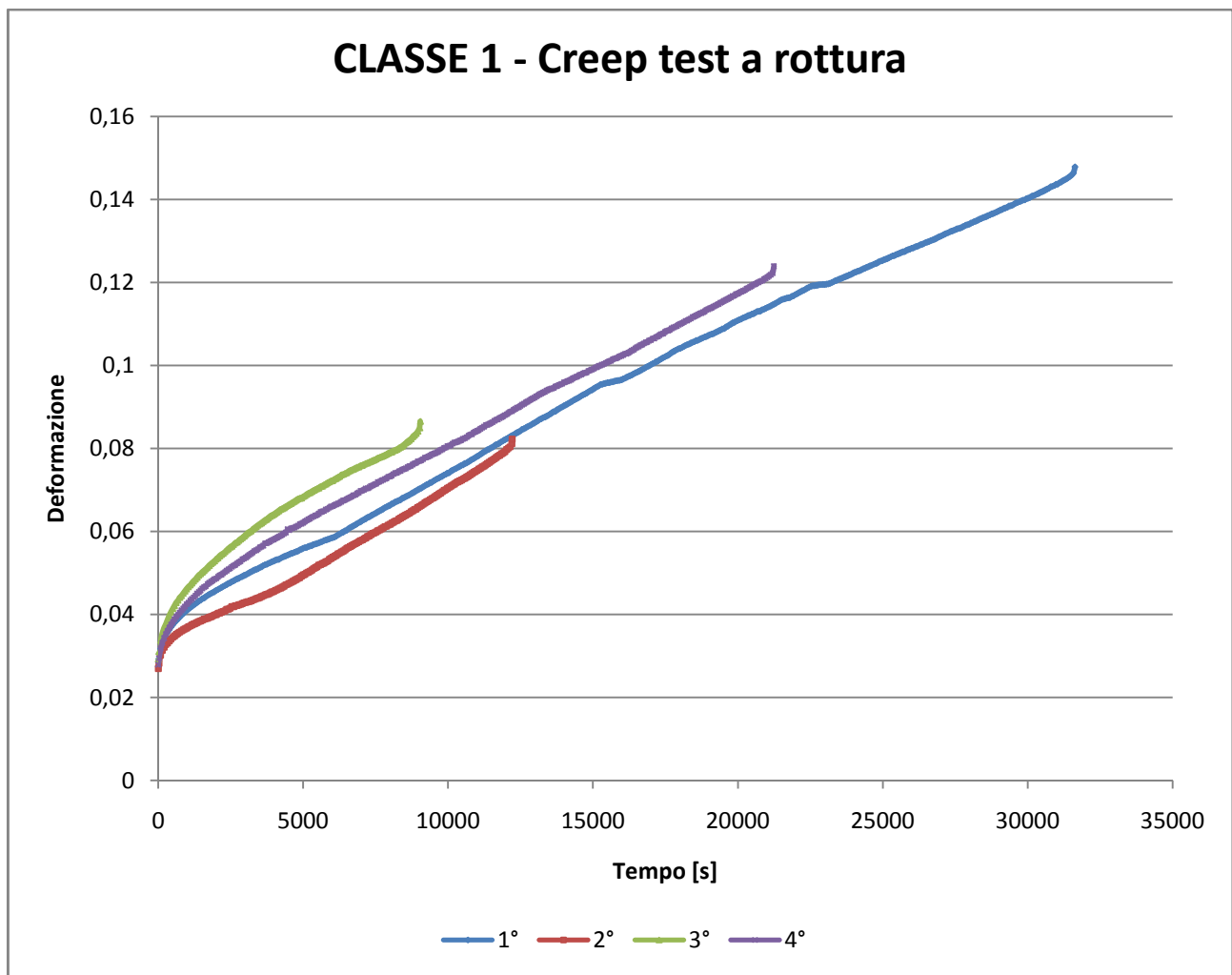


Figura 1 - Diagramma dei creep test a rottura appartenenti alla prima classe

Si decida di prendere dunque tutti i test eseguiti in questa classe e di ricavarne due dati importanti per determinare il comportamento di creep a rottura del materiale, facendo la media del tempo di rottura e la media della tensione di creep. In questo modo ottengo:

Tensione MEDIA	Tempo a rottura medio		
	[s]	[min]	[h]
21.0509	18540.08	309.0013	5.150021

Dove la tensione media è quella ottenuta mediando i valori della tensione media effettiva dei test della prima classe di appartenenza. Lo stesso vale per quanto riguarda il tempo a rottura medio, il quale viene espresso sia in secondi che in minuti che in ore.

CLASSE 2

N° TEST	SERIE	PROVINO	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE ELASTICA ISTANTANEA	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1°	2	CG	21.86	0.031	0.125	6645.9
2°	3	CP	21.97	0.036	0.164	5163.5
3°	2	CF	22.19	0.035	0.182	7586.8
4°	3	CQ	22.30	0.032	0.108	5137.9
5°	2	CH	22.41	0.031	0.086	10299.5
6°	3	CO	22.42	0.035	0.072	571.28
7°	1	C5	22.43	0.032	0.114	5787.7

Tabella 5 - Creep test appartenenti alla 2^classe d'appartenenza

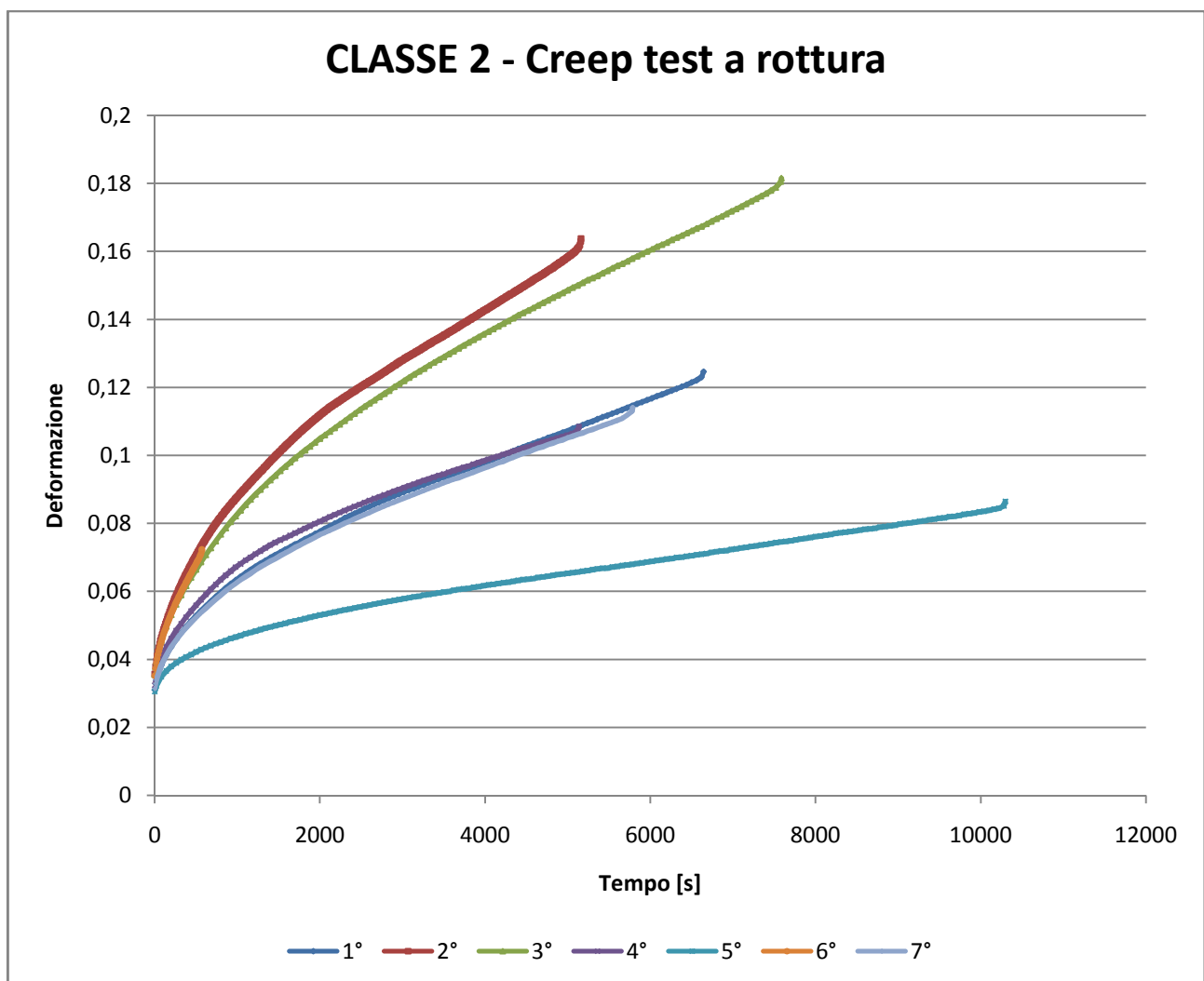


Figura 2 - Diagramma dei creep test a rottura appartenenti alla seconda classe

Osservazioni:

- A differenza della prima classe, in questa è possibile distinguere 3 diverse pendenze delle curve di creep. Le differenze sono molto grandi, infatti per quanto riguarda la curva con la pendenza massima essa arriva ad una deformazione pari a circa il 18%, mentre per quanto

riguarda la curva con la pendenza minima essa arriva ad una deformazione di circa il 9%.

Questo vuol dire che la ripetibilità tra i diversi test, eseguiti alla stessa tensione di creep, non è stata riscontrata: sarà quindi necessario cercare una giustificazione di questo fatto.

- Inoltre si noti che per curve con uguale pendenza (come le 2°, 3° e 6°) si hanno grosse differenze di tempo di rottura e allungamento. Questo fatto è da ricondurre alla presenza della cavità.

In questo caso si decida dunque di considerare le tre curve aventi la pendenza media, cioè quelle inerenti ai test 1°, 4° e 7°, e di eseguire la media della tensione media effettiva e del tempo a rottura dei risultati dei tre test. Si ottiene la seguente tabella:

Tensione MEDIA	Tempo a rottura medio		
	[MPa]	[s]	[min]
22.19883	5857.167	97.61944	1.626991

CLASSE 3

N° TEST	SERIE	PROVINO	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE ELASTICA ISTANTANEA	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1°	3	CN	23.29	0.036	0.100	1267.34

Tabella 6 - Creep test appartenenti alla 3ª classe d'appartenenza

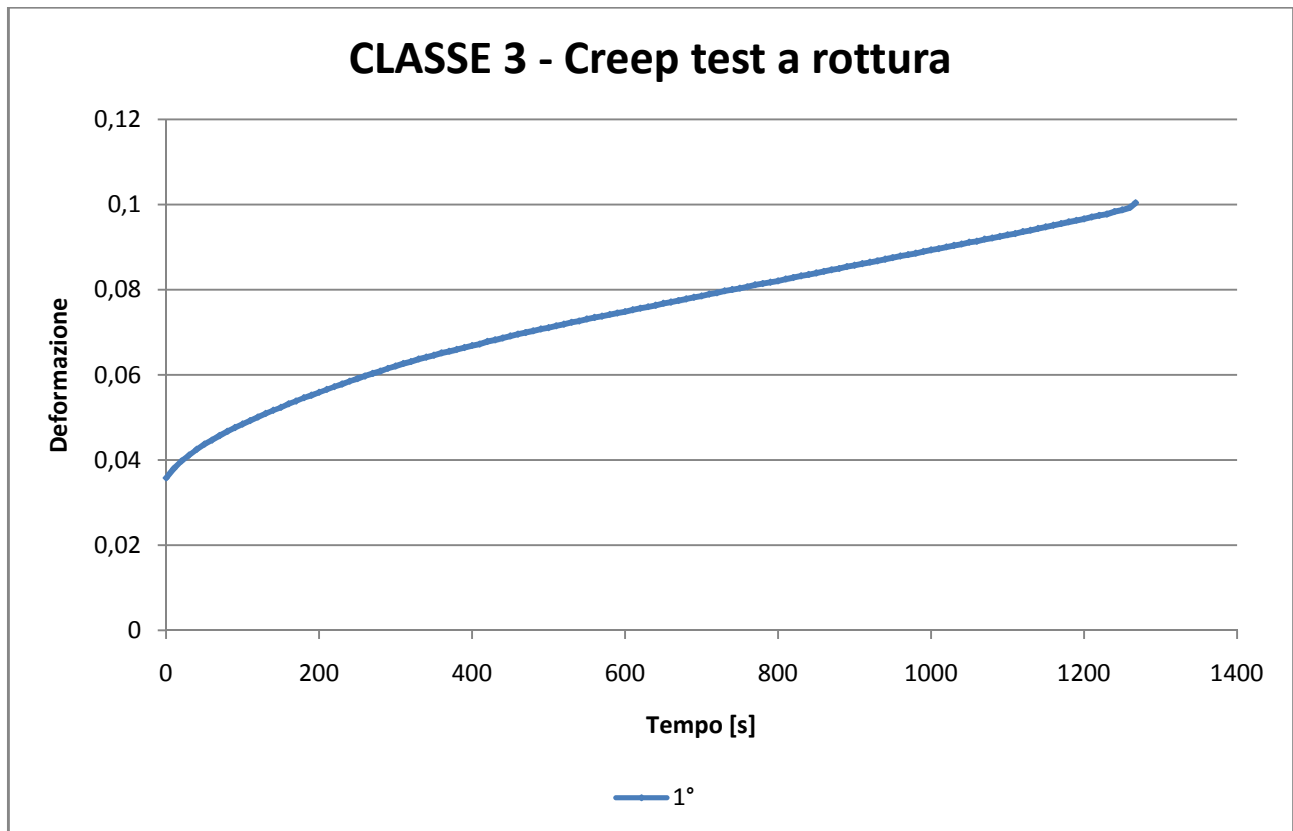


Figura 3 - Diagramma dei creep test a rottura appartenenti alla terza classe

Osservazioni:

- In questa terza classe è presente un solo test, in quanto nell'intervallo compare un solo valore della i -esima tensione media effettiva di creep.
- Si prenda a riferimento quindi il valore della tensione media effettiva del test e il suo tempo a rottura per ricavare il terzo punto di creep a rottura.

I valore di tensione media e di tempo a rottura per la classe 3 sono i seguenti:

Tensione MEDIA	Tempo a rottura medio		
[MPa]	[s]	[min]	[h]
23.29	1267.34	21.12233	0.352039

CLASSE 4

N° TEST	SERIE	PROVINO	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE ELASTICA ISTANTANEA	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1°	2	CE	23.96	0.037	0.072	408.88
2°	2	CD	24.05	0.039	0.079	260.9
3°	1	C4	24.49	0.036	0.077	225.9
4°	2	CC	24.83	0.044	0.148	370.16
5°	3	CM	24.88	0.039	0.100	543.42

Tabella 7 - Creep test appartenenti alla 4ª classe d'appartenenza

Osservazioni:

- Si osservi che sono presenti tre differenti pendenze delle curve di creep a rottura. Questo significa che si hanno tre differenti velocità di deformazione per lo stesso livello di carico, e quindi non è verificata nemmeno in questo caso la ripetibilità dei risultati: infatti la deformazione a rottura va dal 7% al 14%.
- Inoltre si noti che, sempre a causa della presenza delle cavità sulla superficie di frattura, ci sono grosse differenze in termini di deformazione e tempo a rottura anche a parità di pendenza.

Come nei casi precedenti si prendano le curve aventi la stessa pendenza intermedia e si esegua la media sia della tensione effettiva sia del tempo a rottura. Quindi si mediano i valori dei test 2°, 3° e 5° e così si ottengono i seguenti dati del creep a rottura:

Tensione MEDIA	Tempo a rottura medio		
[MPa]	[s]	[min]	[h]
24.47272	343.4067	5.723444	0.095391

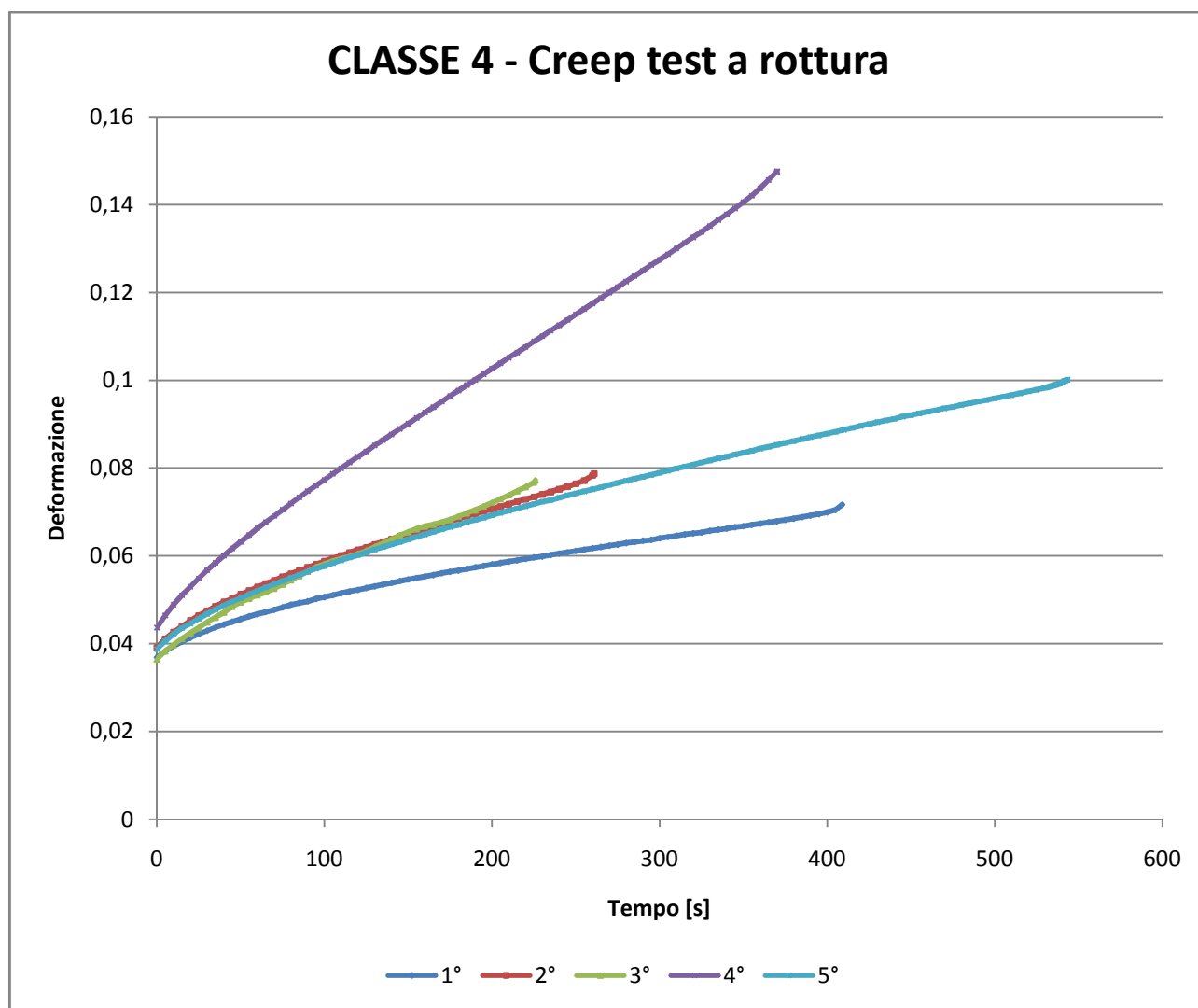


Figura 4 - Diagramma dei creep test a rottura appartenenti alla quarta classe

CLASSE 5

N° TEST	SERIE	PROVINO	TENSIONE MEDIA EFFETTIVA [MPa]	DEFORMAZIONE ELASTICA ISTANTANEA	DEFORMAZIONE A ROTTURA	TEMPO A ROTTURA [s]
1°	2	CB	25.17	0.042	0.077	79.3
2°	1	C2	25.32	0.042	0.085	102.1
3°	3	CL	25.42	0.043	0.070	72.96
4°	1	C1	25.45	0.042	0.074	84.9
5°	1	C3	25.70	0.037	0.084	142.1
6°	2	CA	25.99	0.044	0.122	127.97
7°	3	CJ	26.10	0.044	0.074	71.5
8°	3	CK	26.11	0.044	0.073	69.96

Tabella 8 - Creep test appartenenti alla 5ª classe d'appartenenza

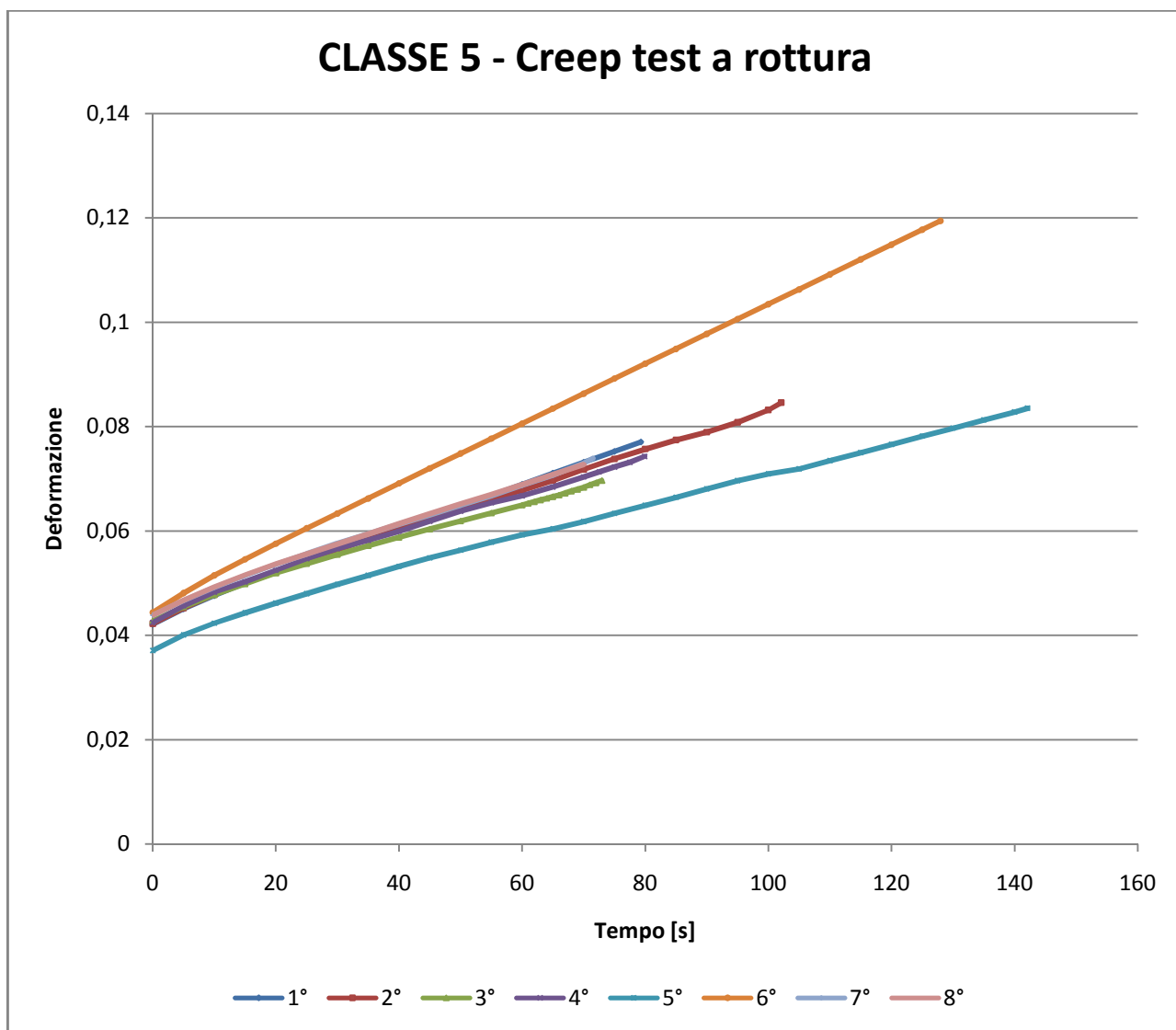


Figura 5 - Diagramma dei creep test a rottura appartenenti alla quinta classe

Osservazioni:

- Anche in questa classe sono presenti 3 differenti pendenze delle curve di creep, anche se le differenze tra la curva con pendenza massima e la curva con pendenza minima è inferiore rispetto ai casi delle classi 2 e 4.
- A causa delle differenti cavità presenti all'interno della superficie di frattura si hanno deformazioni e tempi di rottura molto diversi anche a parità di pendenza.

Si prendano dunque i dati dei test che hanno generato delle curve di creep a rottura che abbiano all'incirca la stessa pendenza. Si considerino quindi i test 1°, 2°, 3°, 4°, 7° e 8° e si eseguano le medie della tensione a creep effettiva e del tempo a rottura, così da ottenere i seguenti dati:

Tensione MEDIA	Tempo a rottura medio		
[MPa]	[s]	[min]	[h]
25.59678	80.12	1.335333	0.022256

DATI DI CREEP A ROTTURA

A questo punto sono stati raccolti una serie di dati rappresentativi del comportamento a creep a rottura del materiale preso in esame. Infatti si riportino in tabella (...) i risultati della sintesi dei dati ricavati dai test eseguiti.

CLASSE	TENSIONE MEDIA [MPa]	TEMPO A ROTTURA MEDIO		
		[s]	[min]	[h]
1	21.0509	18540.08	309.0013	5.150021
2	22.19883	5857.167	97.61944	1.626991
3	23.29	1267.34	21.12233	0.352039
4	24.47272	343.4067	5.723444	0.095391
5	25.59678	80.12	1.335333	0.022256

Tabella 9 - valori di tensione e tempo a rottura medi per ciascuna classe di appartenenza

È possibile riportare le coppie di valori un grafico che abbia in ascissa il logaritmo del tempo di rottura e in ordinata il livello della tensione di creep.

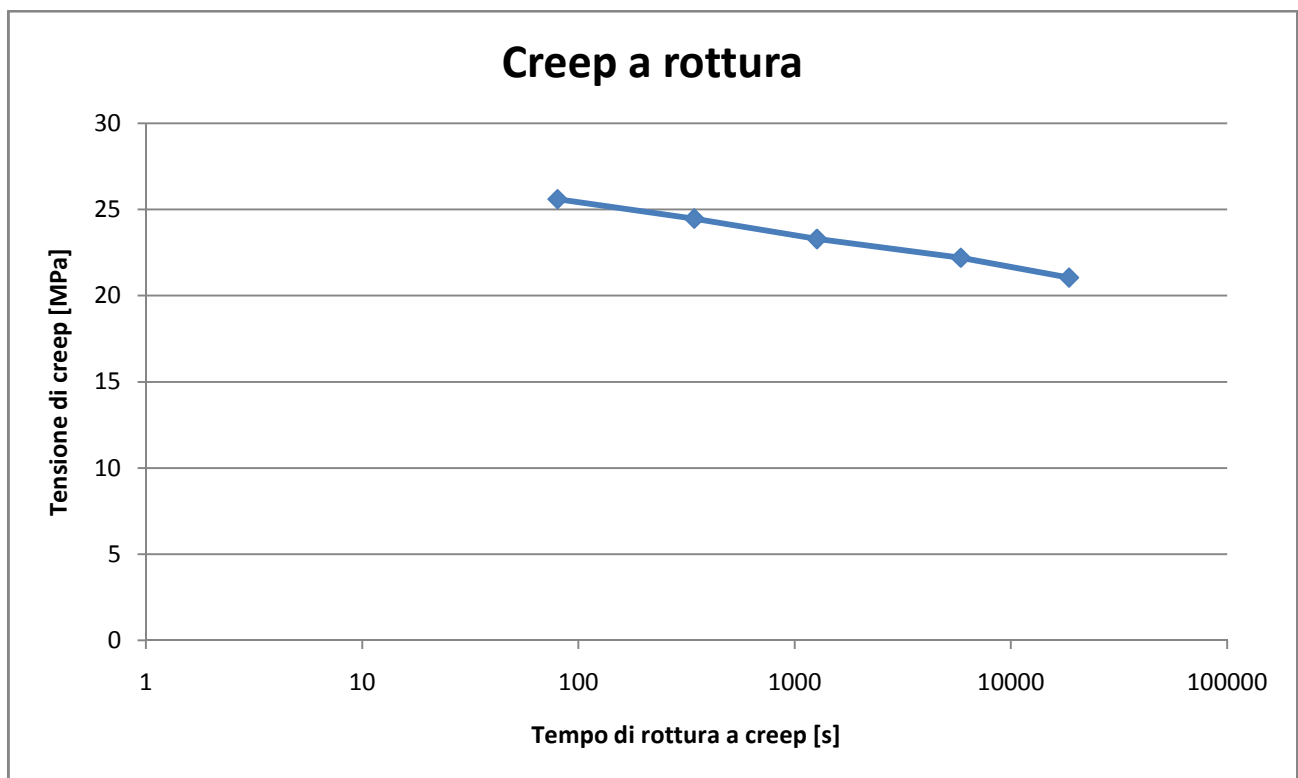


Figura 6 - Curva di creep a rottura: tempo di rottura a creep vs tensione di creep

A questo punto è di fondamentale importanza verificare se i dati ricavati sono coerenti con i modelli teorici di creep a rottura presenti in letteratura. Per fare questo è necessario eseguire un'analisi di best fit dei dati ricavati sperimentalmente con i vari modelli matematici.

Si noti però che i dati che si hanno a disposizione sono limitati in un range temporale decisamente limitato per quanto riguarda la tipologia di test. Solitamente, guardando altri diagrammi simili, si noti che si hanno dati ricavati per valori di tempo fino a 10^{10} minuti. Per fare questo generalmente si utilizzano dei dati ottenuti con prove di rottura a creep a temperature diverse. Purtroppo non era disponibile una cella climatica durante la fase di test e per motivi di sicurezza non è stato possibile eseguire dei test di durata superiore alle 10 ore.

BEST FIT DEI MODELLI TEORICI

A questo punto con i dati che si hanno a disposizione si esegua un'analisi di best fit dei modelli teorici ricavati dalla letteratura. Per fare quest'operazione si utilizzi il software MATHCAD 14, il quale attraverso la funzione genfit, riesce a fornire i valori delle costanti di una funzione conoscendo i valori delle variabili. Per tutti i modelli la variabile indipendente è la tensione media di creep, mentre la variabile dipendente è il tempo di rottura a creep.

I modelli matematici di cui si vuole eseguire il best fit sono:

- Il criterio di Reiner-Weissenberg;
- Il criterio di Reiner-Weissenberg modificato;
- Il criterio della deformazione massima;
- Il criterio della tensione massima;
- Il criterio di Crochet;
- Il meccanismo di danneggiamento continuo;
- Il meccanismo di frattura.

Alla fine delle varie analisi si facciano delle considerazioni sulla bontà di un criterio rispetto all'altro e si indichi quale può essere il criterio più adeguato per il materiale preso in considerazione.

Si noti che il numero di dati che si avrebbe a disposizione, nel caso in cui si considero le sole cinque coppie di valori forniti dall'analisi statistica, è troppo limitato. Per questo motivo si considerino tutti i dati significativi, senza eseguirne la media, così da ottenere una "nuvola" di dati.

Si riassumano i dati considerati nella seguente tabella.

PROVINO	TEMPO A ROTTURA			TENSIONE DI CREEP
	[h]	[min]	[s]	[MPa]
C7	8.7875	527.25	31635.00	20.40
CR	3.399972	203.9983	12239.90	20.82
C6	2.511306	150.6783	9040.70	21.47
CI	5.901306	354.0783	21244.70	21.52
CG	1.846083	110.765	6645.90	21.86
CQ	1.427194	85.63167	5137.90	22.30
C5	1.607694	96.46167	5787.70	22.43
CN	0.352039	21.12233	1267.34	23.29
CD	0.072472	4.348333	260.90	24.05
C4	0.06275	3.765	225.90	24.49
CM	0.15095	9.057	543.42	24.88
CB	0.022028	1.321667	79.30	25.17
C2	0.028361	1.701667	102.10	25.32
CL	0.020267	1.216	72.96	25.42
C1	0.023583	1.415	84.90	25.45
CJ	0.019861	1.191667	71.50	26.10
CK	0.019433	1.166	69.96	26.11

Tabella 10 - Lista dei dati sperimentali dei test creep utilizzati per eseguire il best fit

Criterio di Reiner-Weissenberg

Si riporti passo passo il procedimento seguito in questo primo caso; per i criteri successivi i passaggi saranno gli stessi e se ridondanti verranno omessi i dettagli.

Innanzitutto si prenda in considerazione l'equazione del modello, che in questo caso è:

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_A = \left(\frac{1}{1 - 2^{n-1}}\right)^{1/n} \left[\frac{1}{2} \frac{D_0}{C} \frac{(\sigma_R - \sigma_0)(\sigma_R + \sigma_0)}{\sigma_0^2} \right]^{1/n}$$

A questo punto si individuino le costanti note, le costanti da determinare attraverso la funzione di "genfit" e le variabili dipendenti e indipendenti che si hanno a disposizione come dati forniti dai creep test a rottura.

Innanzitutto l'unica costante nota in questo caso è:

- σ_R , cioè la tensione a cui si ha il cedimento del componente. Si consideri questa tensione pari a quella di snervamento del materiale che si ha determinato precedentemente con i test di trazione sui provini.
- τ_0 , è una costante di tempo che può essere pari a 1 secondo, 1 minuto oppure 1 ora e serve per adimensionalizzare il valore del tempo a rottura.

Le costanti da determinare sono invece:

- D_0 , è una costante del materiale legata al modulo di creep al tempo zero;
- C , è una costante del materiale legata al modulo di creep a istanti diversi da quello iniziale;
- n , è un esponente caratteristico del materiale.

Le variabili di cui si hanno a disposizione i valori dai test sono:

- σ_0 , che è il valore della tensione di creep applicato;
- t_R , che è il tempo di rottura a creep che si ha per la tensione σ_0 applicata.

A questo punto è possibile eseguire la funzione "genfit" del software MATHCAD, ma prima si spieghi brevemente come opera questa applicazione.

La forma del genfit è

$$\text{genfit}(X, Y, \text{guess}, f)$$

E ha lo scopo di fornire un vettore che contenga i parametri che definiscono una funzione $f(x)$ avente n parametri: $(u_1, u_2 \dots u_n)$ e che approssimi nel migliore dei modi i dati che si hanno a disposizione di v_x e v_y . La funzione *genfit* opera un'ottimizzazione del metodo di minimizzazione degli errori proposto da Levenberg-Marquardt. Sebbene sia un metodo veloce e poco sensibile a vettori di tentativo non adatti, potrebbe non convergere correttamente per problemi con molti minimi locali.

Gli argomenti presenti nella funzione sono quindi:

- X e Y : sono vettori di dati reali dei valori corrispondenti ai valori di x e $f(x)$ ricavati sperimentalmente. Si noti che devono esserci almeno tante coppie di dati quanti sono i parametri.
- *guess*: è un vettore composto da n elementi che diano un valore di tentativo ai parametri.
- $f(x, u)$: è un vettore composto da $n+1$ elementi che corrispondono alla funzione di cui eseguire il fitting e a tutte le derivate parziali della funzione eseguire rispetto al n -esimo parametro. Dove x è la variabile indipendente, mentre u rappresenta il vettore dei parametri.

Ora che si è a conoscenza della tipologia di funzione e di come opera, è necessario ricavare le derivate parziali della funzione stessa rispetto ai parametri (cioè le costanti da determinare). Per questioni pratiche e per semplificare il problema si è deciso di ridurre il rapporto $\frac{D_0}{C}$ ad un'unica costante detta A . In questo modo i parametri non sono più tre ma diventano due: n e A .

La derivata parziale rispetto all'esponente n è:

$$\frac{d(t_r)}{dn} = - \left[\frac{\ln\left(-\frac{1}{2^{n-1}-1}\right) \left(-\frac{1}{2^{n-1}-1}\right)^{\frac{1}{n}}}{n^2} - \frac{2^{n-1} \ln(2) \left(-\frac{1}{2^{n-1}-1}\right)^{\frac{1}{n}-1}}{n(2^{n-1}-1)^2} \right] \left[-\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)(\sigma_0 + \sigma_r)}{2\sigma_0^2} \right]^{\frac{1}{n}} - \frac{\ln\left[-\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)(\sigma_0 + \sigma_r)}{2\sigma_0^2}\right] \left(-\frac{1}{2^{n-1}-1}\right)^{\frac{1}{n}} \left[-\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)(\sigma_0 + \sigma_r)}{2\sigma_0^2}\right]^{\frac{1}{n}}}{n^2}$$

Mentre la derivata parziale rispetto alla costante A è:

$$\frac{d(t_r)}{dA} = \frac{(\sigma_0 - \sigma_r)(\sigma_0 + \sigma_r) \left(-\frac{1}{2^{n-1} - 1} \right) \left[\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)(\sigma_0 + \sigma_r)}{2\sigma_0^2} \right]^{\frac{1}{n}-1}}{2n\sigma_0^2}$$

A questo punto è necessario fornire il valore della costante nota:

$$\sigma_r = 27,1 \text{ MP}$$

E sostituire n e A con i valori u_0 e u_1 in modo tale da ottenere il vettore dei parametri:

$$u = (u_0, u_1)$$

Che serve per la generazione del vettore della funzione di fitting.

Ora si inserisca una tabella di dati che contenga nella prima colonna (colonna 0) i valori del tempo espressi in ore, minuti o secondi e nella seconda colonna (la numero 1) si riportino i valori della tensione di creep a rottura corrispondente al tempo di rottura della colonna 0. In questo caso si considerino il tempo in secondi e la tensione ovviamente in MPa.

data :=

	0	1
0	3.163·10 ⁴	20.4
1	1.224·10 ⁴	20.82
2	9.041·10 ³	21.47
3	2.124·10 ⁴	21.52
4	6.646·10 ³	21.86
5	5.138·10 ³	22.3
6	5.788·10 ³	22.43
7	1.267·10 ⁴	23.29
8	260.9	24.05
9	225.9	24.49
10	543.42	24.88
11	79.3	25.17
12	102.1	25.32
13	72.96	25.42
14	84.9	25.45
15	71.5	26.1
16	69.96	26.11

A questo punto è necessario generare i vettori dei dati del tempo e della tensione a rottura, per questo motivo si scrivino:

$$Y := \text{data}^{\langle 0 \rangle} \quad X := \text{data}^{\langle 1 \rangle}$$

Dove la lettera maiuscola X o Y indica il nome del vettore, data indica il nome della tabella da cui viene generato e l'apice numerico indica il numero della colonna preso in considerazione per generare il vettore.

È quindi possibile determinare il vettore di funzioni per il fitting dei dati di creep a rottura nel modo seguente:

$$f(z, u) := \begin{bmatrix} (Tr) \\ \frac{d}{du_0}(Tr) \\ \frac{d}{du_1}(Tr) \end{bmatrix}$$

Dove z è la variabile ausiliaria che sostituisce la tensione σ_0 nella funzione del modello e nelle sue derivate parziali, mentre u è il vettore degli n parametri. Infatti la corrispondenza dei parametri è la seguente:

$$u_0 = n$$

$$u_1 = A$$

Si deve ora fornire un vettore detto "guess", che contenga dei valori di tentativo dei parametri che si stanno cercando. Bisogna fare attenzione a fornire dei valori adeguati per riuscire ad andare a convergenza la funzione. Per questo motivo si noti che è indispensabile fornire all'esponente n un valore compreso tra 0 e 1, mentre per il parametro A è accettabile qualunque valore. Per ricercare dei valori di tentativo adeguati è necessario fare affidamento su un best fit grafico preliminare da eseguire con Excel.

Per fare questo si riportino in un foglio Excel sia i dati sperimentali dei 16 test utili, sia l'implementazione dell'equazione del modello di creep a rottura. Per eseguire quest'ultima operazione si riportino sul foglio i seguenti dati:

- i valori di parametro di tentativo,
- le costanti noti dell'equazione,
- i valori della variabile indipendente in una colonna (in questo caso i valori della tensione)
- e nella colonna accanto si riportino l'equazione del modello che fornisce come risultato i valori del tempo a rottura a creep corrispondenti alla tensione inserita nella colonna precedente.

Si ottiene dunque un foglio excel che si presenta nel seguente modo:

MODELLO - REINER WEISSENBERGER				
TENSIONE ROTTURA	1° PARAMETRO	2° PARAMETRO	TENSIONE	EQUAZIONE DEL MODELLO - TEMPO
[MPa]	n	A	[MPa]	Reiner-Weissenberger - [s]
27.1	0.32	26	1	4.64276E+14
			2	3.97036E+12
			3	2.41273E+11
			4	32534397700
			5	6758111357
			6	1837576300
			7	599460369.5
			8	222661209.5
			9	91008880.03
			10	39974838.91
			11	18544261.18
			12	8964874.851
			13	4467839.326
			14	2274465.102
			15	1173015.09
			16	608058.2138
			17	314273.3931
			18	160532.8037
			19	80207.292
			20	38687.60155
			21	17697.18515
			22	7478.746277
			23	2798.840363
			24	858.903884
			25	182.8456368
			26	16.29144604
			27	0.003639421

Tabella 11 - implementazione del modello di Reiner-Weissenberger mediante Excel

Si noti che nella tabella precedente sono stati riportati già i valori dei parametri che possono essere considerati adeguati per un best fit preliminare.

In questa tabella si sottolineano in azzurro i parametri da determinare per ottenere il best fit del modello con i dati sperimentali.

Per valutare graficamente il best fit è a questo punto necessario creare un grafico che presenti sia l'andamento della curva del modello sia la distribuzione dei dati sperimentali. L'obiettivo sarà dunque quello di fare in modo che la curva del modello passi attraverso la nuvola di dati nel miglior modo possibile, cioè facendo in modo che la somma degli errori sia minima. Questa operazione viene eseguita direttamente dalla funzione di genfit presente in MATHCAD, in Excel ci si limita ad eseguire un best fit apprezzabile visivamente, deputando poi all'altro software il compito di fornire dei valori esatti.

Una volta generato il grafico in Excel si modifichino i valori dei parametri n e A finché non si ottiene un ragionevole fitting delle curve, come si può vedere nella seguente figura.

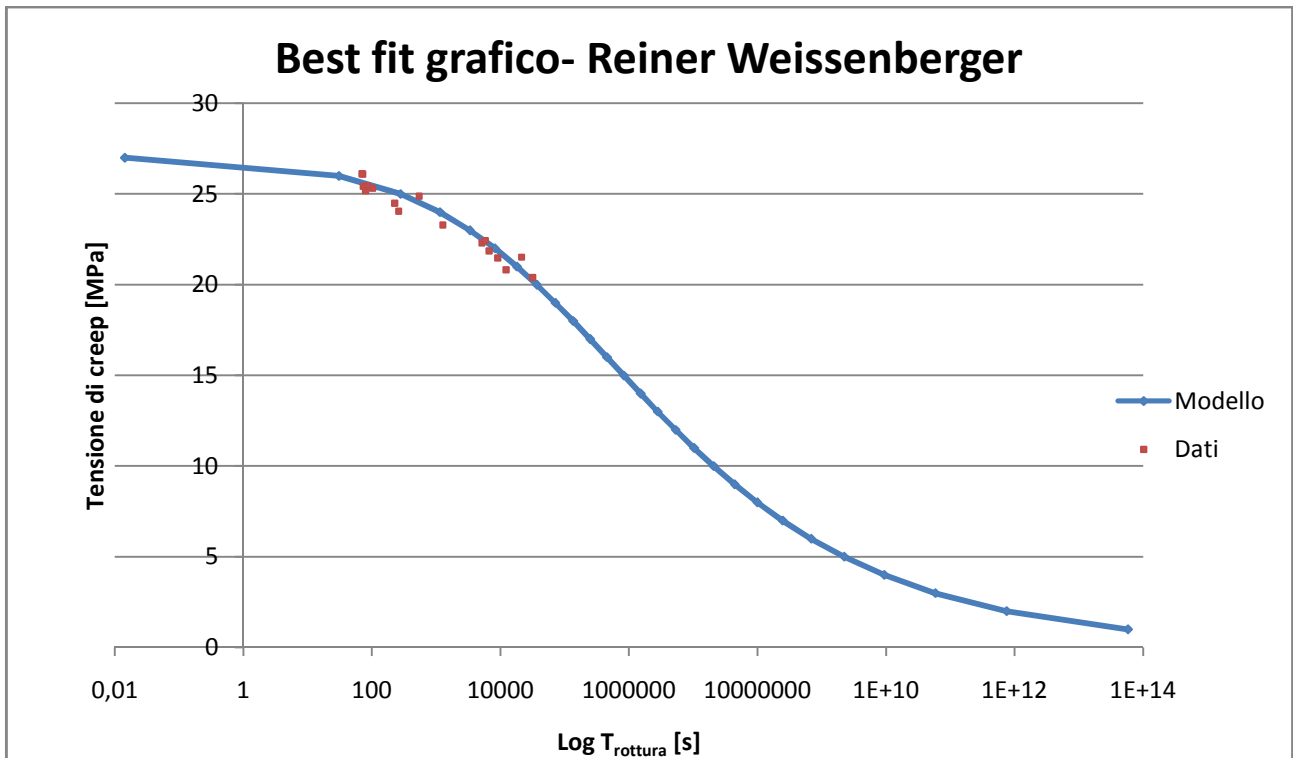


Figura 7 - Grafico del best fit preliminare implementato con Excel del criterio di R-W

Si noti che nella tabella precedente sono stati riportati già i valori dei parametri che possono essere considerati adeguati per un best fit preliminare.

Ora che si hanno questi valori a disposizione si esegua il best fit sfruttando le potenzialità del software MATHCAD, in particolare la sua funzione *genfit*. Si prenda dunque come vettore di tentativo il seguente, basandosi sullo studio preliminare fatto con Excel:

$$guess = \begin{pmatrix} 0.32 \\ 26 \end{pmatrix}$$

Ora è possibile implementare la funzione *genfit*, scrivendola nel seguente modo:

$$GEN := genfit(X, Y, guess, f)$$

In questo modo *genfit* prende i valori del vettore X e li mette come valore della variabile dipendente $[f(z)]$, i valori del vettore Y e li sostituisce al valore della variabile indipendente z e infine prende i valori dei parametri di tentativo del vettore *guess*. Tutto ciò con lo scopo di fornire nuovi valori dei parametri cosicché il modello fitti al meglio i dati sperimentali. Infatti, si ottiene un vettore GEN del tutto analogo al vettore *guess*, ma con i valori dei parametri aggiornati e corretti. Si ottiene dunque il seguente risultato:

$$GEN = \begin{pmatrix} 0.292 \\ 20.278 \end{pmatrix}$$

Si noti che anche variando sensibilmente i parametri forniti nel vettore di tentativo, i valori del vettore GEN sono comunque costanti: questo significa che la funzione *genfit* opera correttamente e giunge a

convergenza. Inoltre si osservi che fornendo valori molto distanti da quelli di tentativo la funzione non converge, dimostrando che il lavoro preliminare eseguito con Excel è stato fondamentale per eseguire un corretto best fit.

Infatti ora si voglia ottenere la conferma che i valori ottenuti con MATHCAD siano corretti. Per fare questo si crei un secondo foglio di Excel in cui si eseguano le stesse operazioni fatte per il primo, ma a differenza del caso precedente si mettano come valori dei parametri direttamente quelli ottenuti grazie alla funzione genfit di MATHCAD. Si ottiene dunque il seguente grafico.

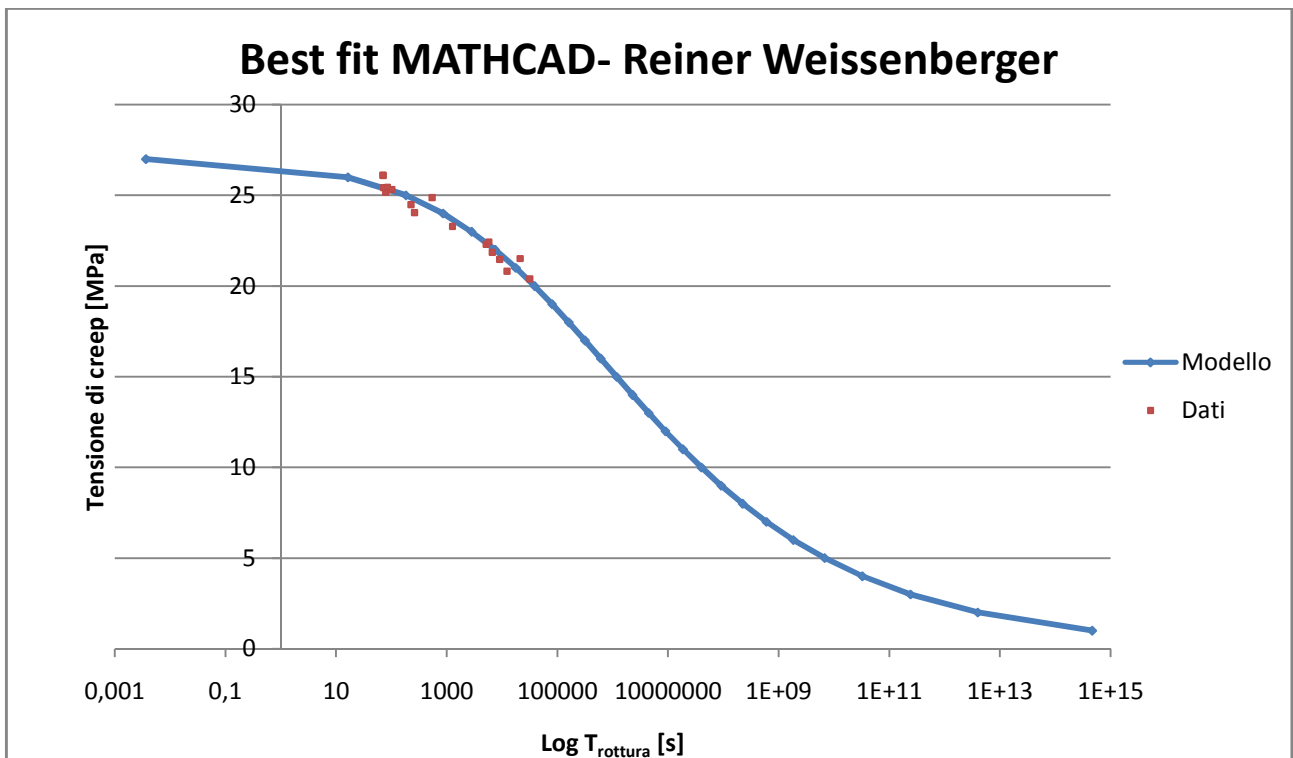


Figura 8 - Grafico del best fit ottimizzato con MATHCAD del criterio di R-W

Si può dunque notare che i parametri forniti dalla funzione di genfit forniscono effettivamente i valori corretti per ottenere il best fitting tra la curva del modello e i dati sperimentali.

Criterio di Reiner-Weissenberg modificato

Questo modello implementato con MATHCAD 14 si comporta nello stesso modo del criterio presentato nel caso precedente. L'equazione numerica che caratterizza il criterio modificato di R-W è la seguente:

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_D = \left(\frac{1}{1 - 2^{n-1}}\right)^{1/n} \left[\frac{1}{2} \frac{D_0}{C} \frac{(\sigma_R - \sigma_0)}{\sigma_0}\right]^{1/n}$$

E come si può vedere è molto simile a quella originale. Anche in questo caso, per facilitare le operazioni computazionali del programma, si consideri il rapporto tra le costanti D_0 e C pari ad un'unica costante A : in questo modo si riducono le funzioni necessarie per il vettore di fitting $f(z,u)$.

La derivata parziale rispetto al parametro n è:

$$\frac{d(t_r)}{dn} = \left[\frac{\ln\left(-\frac{1}{2^{n-1}-1}\right) \left(-\frac{1}{2^{n-1}-1}\right)^{\frac{1}{n}}}{n^2} - \frac{2^{n-1} \ln(2) \left(-\frac{1}{2^{n-1}-1}\right)^{\frac{1}{n}-1}}{n(2^{n-1}-1)^2} \right] \left[-\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)}{2\sigma_0} \right]^{\frac{1}{n}} - \frac{\ln\left[-\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)}{2\sigma_0}\right] \left(-\frac{1}{2^{n-1}-1}\right)^{\frac{1}{n}} \left[-\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)}{2\sigma_0}\right]^{\frac{1}{n}}}{n^2}$$

E la derivata parziale della funzione di tempo a rottura rispetto all'altro parametro A è:

$$\frac{d(t_r)}{dA} = -\frac{(\sigma_0 - \sigma_r) \left(-\frac{1}{2^{n-1}-1}\right)^{\frac{1}{n}} \left[-\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)}{2\sigma_0}\right]^{\frac{1}{n}-1}}{2n\sigma_0}$$

Anche in questo caso il valore della tensione di rottura è considerato uguale a quello della tensione di snervamento, i parametri n e A si sostituiscono con u_0 e u_1 per creare il vettore dei parametri u da inserire nel vettore di funzioni di fitting e si considerino i dati di tempo e tensione di rottura a creep come nel caso precedente. Riassumendo si ha:

$$\sigma_r = 27,1 \text{ MPa}$$

$$u = (u_0, u_1)$$

data :=

	0	1
0	$3.163 \cdot 10^4$	20.4
1	$1.224 \cdot 10^4$	20.82
2	$9.041 \cdot 10^3$	21.47
3	$2.124 \cdot 10^4$	21.52
4	$6.646 \cdot 10^3$	21.86
5	$5.138 \cdot 10^3$	22.3
6	$5.788 \cdot 10^3$	22.43
7	$1.267 \cdot 10^3$	23.29
8	260.9	24.05
9	225.9	24.49
10	543.42	24.88
11	79.3	25.17
12	102.1	25.32
13	72.96	25.42
14	84.9	25.45
15	71.5	26.1
16	69.96	26.11

$$Y := \text{data}^{(0)}$$

$$X := \text{data}^{(1)}$$

$$f(z, u) := \begin{bmatrix} (Tr) \\ \frac{d}{du_0}(Tr) \\ \frac{d}{du_1}(Tr) \end{bmatrix}$$

Dove i parametri del vettore u hanno la seguente corrispondenza:

$$u_0 = n$$

$$u_1 = A$$

Per quanto riguarda il vettore di tentativo da impostare, si procede come nel caso precedente. Seguendo gli stessi passaggi in Excel si ottengono i valori dei parametri di tentativo: vengono riportati nella tabella (...), e sono evidenziati in azzurro i valori dei parametri n e A .

PARAMETRI "GUESS" - NEW REINER WEISSENBERGER		
TENSIONE ROTTURA	1° PARAMETRO	2° PARAMETRO
[MPa]	n	A
27.1	0.27	39

Il vettore di tentativo che viene quindi fornito al software MATHCAD è il seguente:

$$guess = \begin{pmatrix} 0.27 \\ 39 \end{pmatrix}$$

E scrivendo la funzione di genfit nel seguente modo,

$$GEN := genfit(X, Y, guess, f)$$

Ottingo il vettore definitivo pari a:

$$GEN = \begin{pmatrix} 0.261 \\ 35.531 \end{pmatrix}$$

Si riportino ora i due grafici a confronto: il primo (fig.(9)) è il grafico utile a determinare il valore di tentativo del vettore "guess" e quindi ad eseguire il best fit grafico, mentre il secondo grafico (fig.(10)) rappresenta il risultato del best fit generato dalla funzione genfit.

Anche per il best fit eseguito per questo modello si traggano le stesse conclusioni fatte per quello precedente, sottolineando il fatto che la funzione genfit riesce ad andare a convergenza e quindi a fornire risultati corretti dei parametri atti a caratterizzare il modello del materiale.

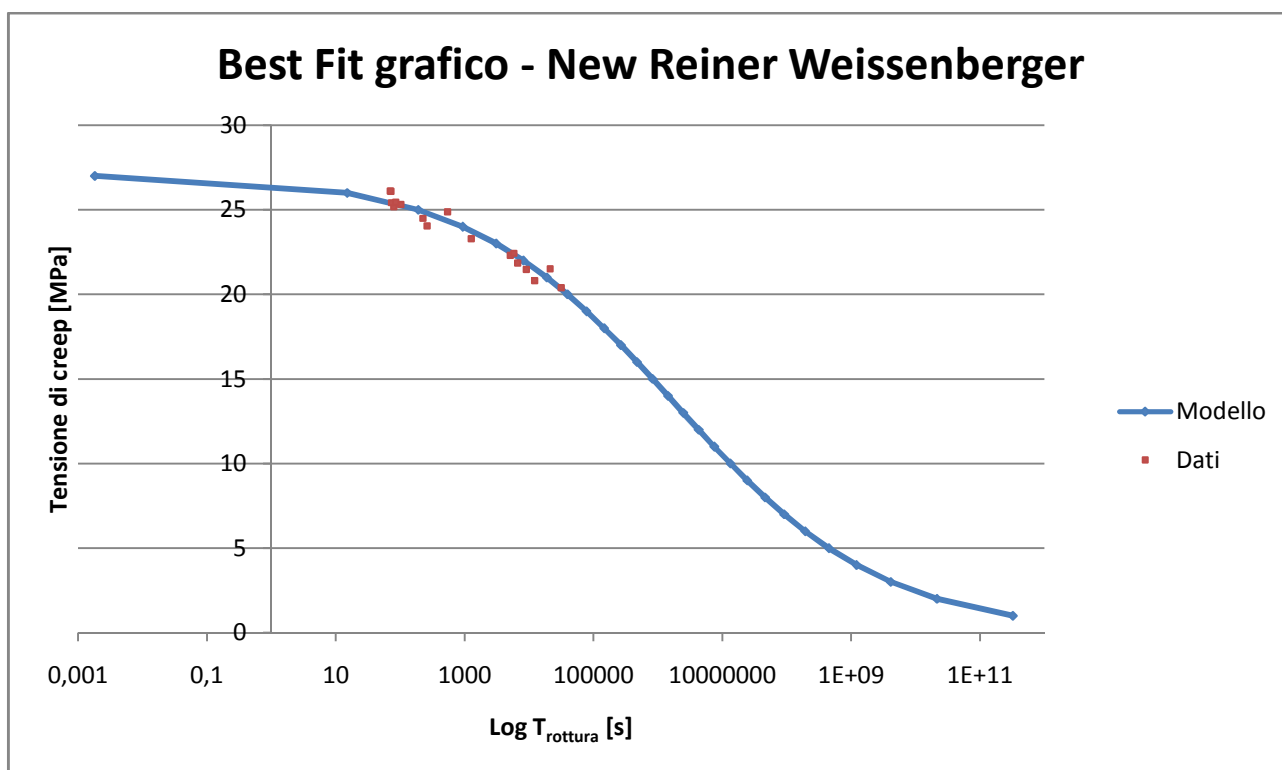


Figura 9 - Grafico del best fit preliminare implementato con Excel del criterio di R-W modificato

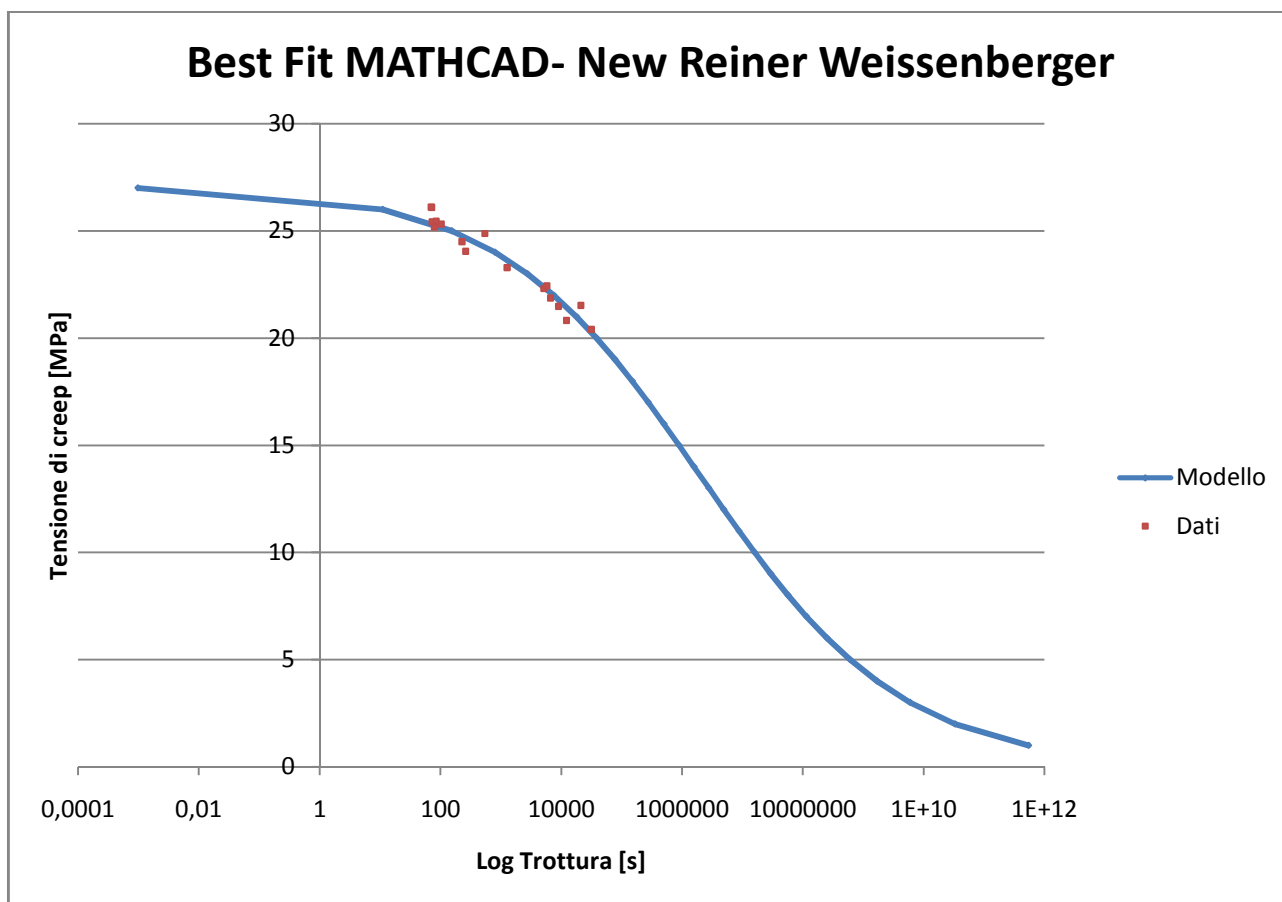


Figura 10 - Grafico del best fit ottimizzato con MATHCAD del criterio di R-W modificato

Criterio della deformazione massima

Questo criterio si basa, come i precedenti, sulla l'energia libera del materiale. In questo caso si fa riferimento alla deformazione massima che può subire il materiale prima che si rompa. L'equazione con cui si determina il tempo di rottura a creep in funzione del carico applicato è:

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_C = \left[\frac{D_0}{C} \frac{(\sigma_R - \sigma_0)}{\sigma_0}\right]^{1/n}$$

Anche in questo caso conviene considerare il rapporto tra i parametri D_0 e C pari alla costante A . Si proceda ora con il determinare le derivate parziali di questa funzione rispetto ai parametri n e A ottenendo rispettivamente.

$$\frac{d(t_r)}{dn} = - \frac{\ln \left[-\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)}{\sigma_0} \right] \left[-\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)}{\sigma_0} \right]^{\frac{1}{n}}}{n^2}$$

e

$$\frac{d(t_r)}{dA} = - \frac{(\sigma_0 - \sigma_r) \left[-\frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)}{\sigma_0} \right]^{\frac{1}{n}-1}}{n\sigma_0}$$

Anche in questo caso il valore della tensione di rottura è considerato uguale a quello della tensione di snervamento, i parametri A e n si sostituiscano con u_0 e u_1 per creare il vettore dei parametri u da inserire nel vettore di funzioni di fitting e si considerino i dati di tempo e tensione di rottura a creep come nel caso precedente. Riassumendo si ha:

$$\sigma_r = 27,1 \text{ MPa}$$

$$u = (u_0, u_1)$$

data :=

	0	1
0	$3.163 \cdot 10^4$	20.4
1	$1.224 \cdot 10^4$	20.82
2	$9.041 \cdot 10^3$	21.47
3	$2.124 \cdot 10^4$	21.52
4	$6.646 \cdot 10^3$	21.86
5	$5.138 \cdot 10^3$	22.3
6	$5.788 \cdot 10^3$	22.43
7	$1.267 \cdot 10^3$	23.29
8	260.9	24.05
9	225.9	24.49
10	543.42	24.88
11	79.3	25.17
12	102.1	25.32
13	72.96	25.42
14	84.9	25.45
15	71.5	26.1
16	69.96	26.11

$$Y := \text{data}^{(0)}$$

$$X := \text{data}^{(1)}$$

$$f(z, u) := \begin{bmatrix} (\text{Tr}) \\ \frac{d}{du_0}(\text{Tr}) \\ \frac{d}{du_1}(\text{Tr}) \end{bmatrix}$$

Dove i parametri del vettore u hanno la seguente corrispondenza:

$$u_0 = n$$

$$u_1 = A$$

Anche in questo caso si determini il vettore di tentativo attraverso un'analisi grafica di best fit eseguita con Excel. Alla fine di questa analisi preliminare sono stati ottenuti i seguenti valori per generare il vettore di tentativo "guess". Questi sono riportati nella seguente tabella:

PARAMETRI "GUESS" - DEFORMAZIONE MASSIMA		
TENSIONE ROTTURA	1° PARAMETRO	2° PARAMETRO
[MPa]	n	A
27.1	0.27	50

Con questi parametri si ottiene il seguente grafico, in cui è visibile il best fit dei dati sperimentali con la curva del modello.

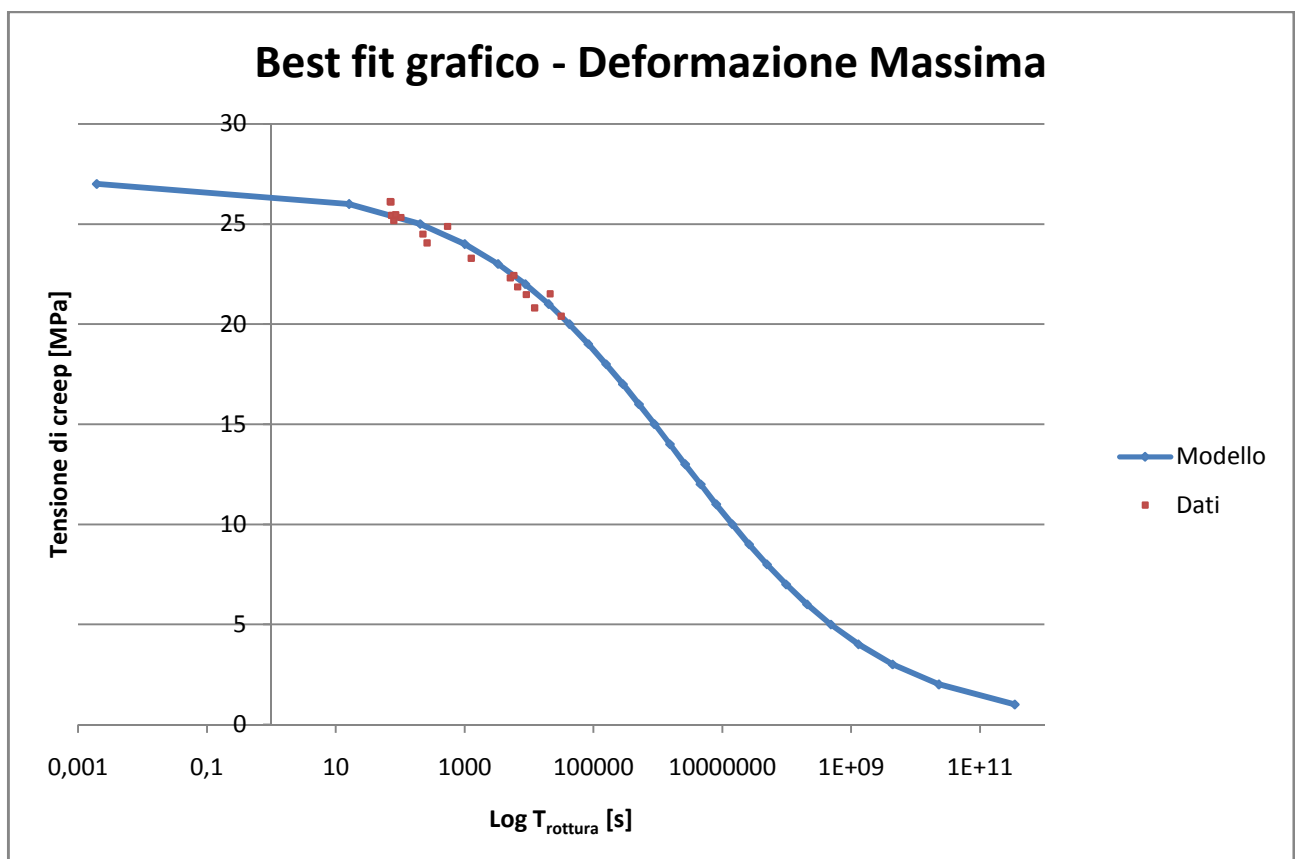


Figura 11 - Grafico del best fit preliminare implementato con Excel del criterio della deformazione massima

Il vettore di tentativo è dunque:

$$guess = \begin{pmatrix} 0.27 \\ 50 \end{pmatrix}$$

E scrivendo la funzione di genfit nel seguente modo,

$$GEN := \text{genfit}(X, Y, \text{guess}, f)$$

Otengo il vettore definitivo pari a:

$$GEN = \begin{pmatrix} 0.261 \\ 44.342 \end{pmatrix}$$

Come nei casi precedenti anche per questo modello si riesce a giungere a convergenza, come si può vedere dal seguente grafico, in cui si mostra il best fit ottimale con i parametri ottenuti attraverso MATHCAD.

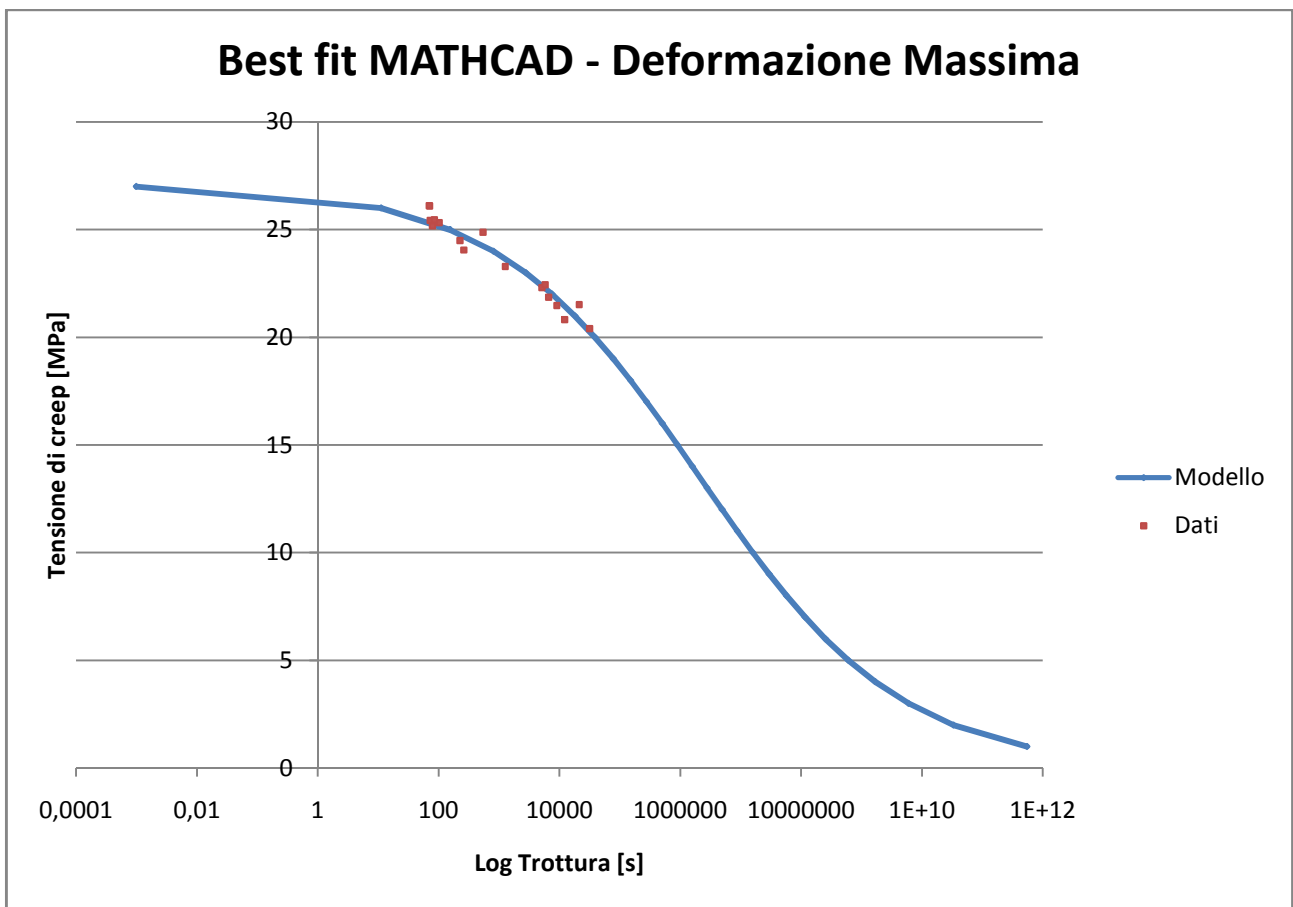


Figura 12 - Grafico del best fit ottimizzato con MATHCAD del criterio della deformazione massima

Criterio della tensione massima

Anche questo criterio si basa sull'energia libera del materiale, ma a differenza dei casi precedenti si considera che la rottura giunga nel momento in cui viene raggiunto il valore della tensione massima applicabile al materiale. Quindi l'equazione di questo criterio è:

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_B = \left[\frac{1}{2} \frac{D_0}{C} \frac{(\sigma_R - \sigma_0)(\sigma_R + \sigma_0)}{\sigma_0^2} \right]^{1/n}$$

Come nei casi precedenti, anche in questo si consideri il rapporto tra i parametri D_0 e C pari alla costante A . E quindi si proceda a determinare le derivate parziali dell'equazione del modello rispetto ai due parametri n e A da ricavare per il materiale studiato. Si ottengono dunque:

$$\frac{d(t_r)}{dn} = - \frac{\ln \left[- \frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)(\sigma_0 + \sigma_r)}{2\sigma_0^2} \right] \left[- \frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)(\sigma_0 + \sigma_r)}{2\sigma_0^2} \right]^{\frac{1}{n}}}{n^2}$$

$$\frac{d(t_r)}{dA} = - \frac{(\sigma_0 - \sigma_r)(\sigma_0 + \sigma_r) \left[- \frac{A(\sigma_0 - \sigma_r)(\sigma_0 + \sigma_r)}{2\sigma_0^2} \right]^{\frac{1}{n}-1}}{2\sigma_0^2 n}$$

Anche in questo caso il valore della tensione di rottura è considerato uguale a quello della tensione di snervamento, i parametri A e n si sostituiscano con u_0 e u_1 per creare il vettore dei parametri u da inserire nel vettore di funzioni di fitting e si considerino i dati di tempo e tensione di rottura a creep come nel caso precedente. Riassumendo si ha:

$$\sigma_r = 27,1 \text{ MPa}$$

$$u = (u_0, u_1)$$

data :=

	0	1
0	$3.163 \cdot 10^4$	20.4
1	$1.224 \cdot 10^4$	20.82
2	$9.041 \cdot 10^3$	21.47
3	$2.124 \cdot 10^4$	21.52
4	$6.646 \cdot 10^3$	21.86
5	$5.138 \cdot 10^3$	22.3
6	$5.788 \cdot 10^3$	22.43
7	$1.267 \cdot 10^3$	23.29
8	260.9	24.05
9	225.9	24.49
10	543.42	24.88
11	79.3	25.17
12	102.1	25.32
13	72.96	25.42
14	84.9	25.45
15	71.5	26.1
16	69.96	26.11

$$X := \text{data}^{(1)}$$

$$Y := \text{data}^{(0)}$$

$$f(z, u) := \begin{bmatrix} (\text{Tr}) \\ \frac{d}{du_0}(\text{Tr}) \\ \frac{d}{du_1}(\text{Tr}) \end{bmatrix}$$

Dove i parametri del vettore u hanno la seguente corrispondenza:

$$u_0 = n$$

$$u_1 = A$$

Ora si provveda a determinare il vettore di tentativo come nei casi precedenti, usufruendo di Excel per eseguire il best fit grafico preliminare. I risultati dei parametri determinati sono riportati nella seguente tabella, e sono evidenziati in azzurro.

PARAMETRI "GUESS" - TENSIONE MASSIMA		
TENSIONE ROTTURA	1° PARAMETRO	2° PARAMETRO
[MPa]	n	A
27.1	0.29	52

Inoltre si può vedere il risultato del best fit preliminare nel seguente grafico, dov'è riportata la curva di tentativo del modello che fitta graficamente la nuvola di dati sperimentali.

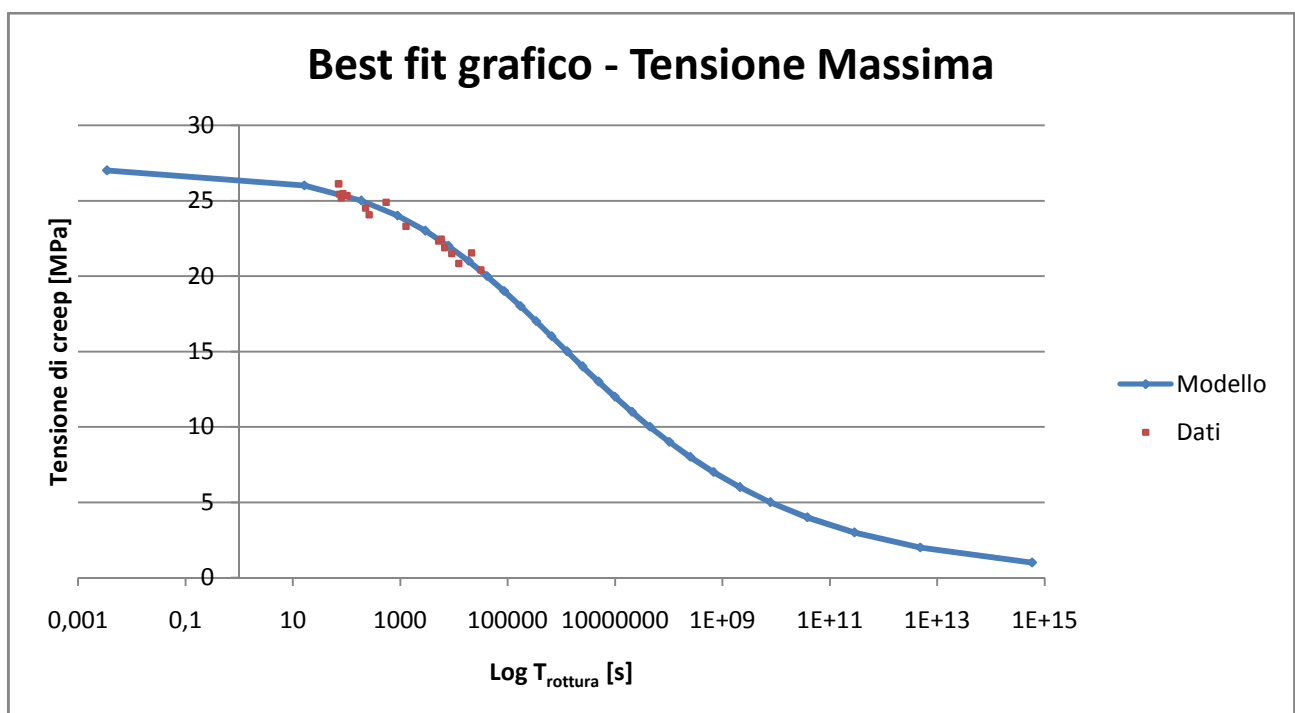


Figura 13 - Grafico del best fit preliminare implementato con Excel del criterio della tensione massima

Il vettore di tentativo "guess" da inserire in MATHCAD sarà dunque pari a:

$$guess = \begin{pmatrix} 0.29 \\ 52 \end{pmatrix}$$

E scrivendo la funzione di genfit nel seguente modo,

$$GEN := genfit(X, Y, guess, f)$$

Otengo il vettore definitivo pari a:

$$GEN = \begin{pmatrix} 0.292 \\ 52.307 \end{pmatrix}$$

Si riporti ora il grafico che mostra il best fit ottimale proposto dalla funzione genfit di MATHCAD.

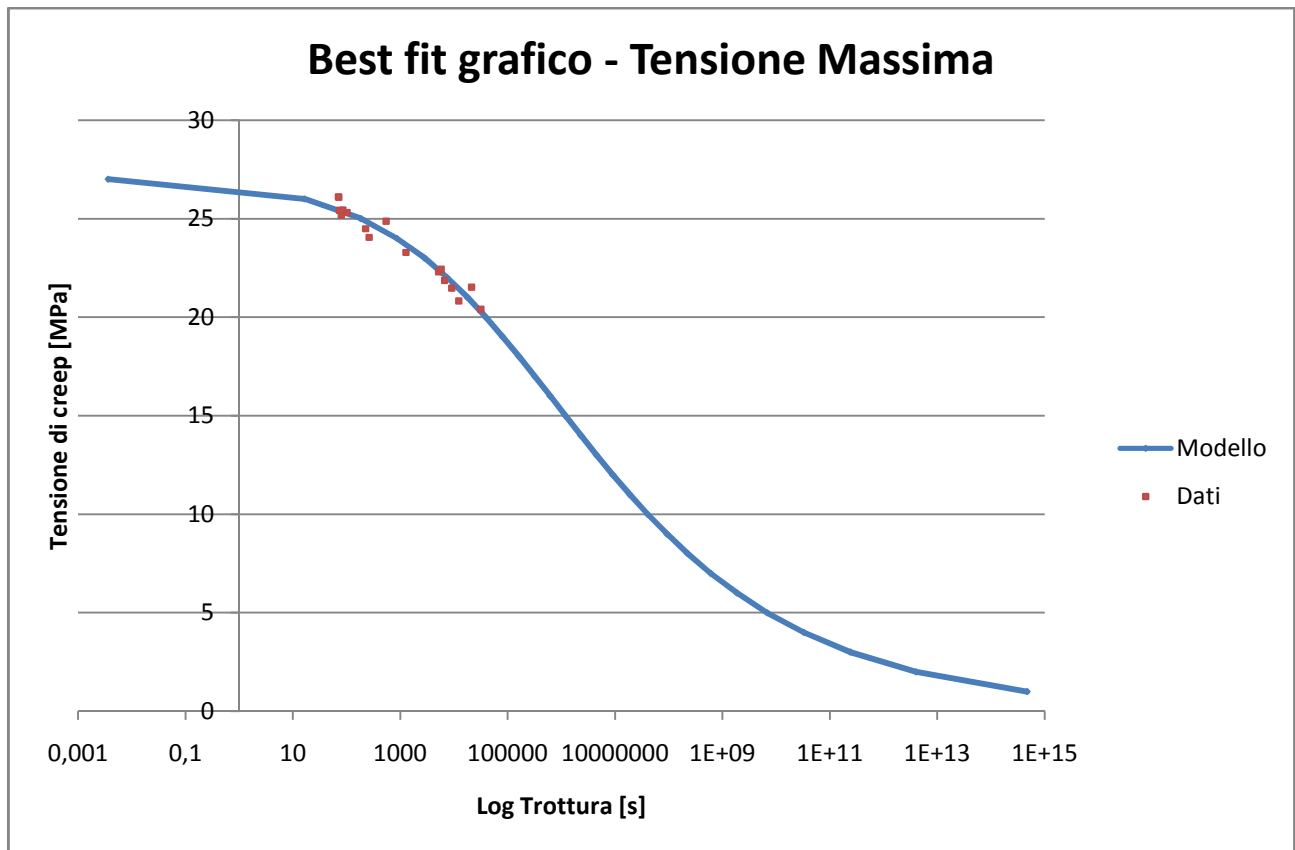


Figura 14 - Grafico del best fit ottimizzato con MATHCAD del criterio della tensione massima

Si noti che anche in questo caso si giunge a convergenza con la funzione genfit, ottenendo i valori dei parametri sopracitati, i quali (a meno di grandi variazioni dei parametri di tentativo) risultano costanti e invariati.

Criterio di Crochet

Questo criterio risulta essere notevolmente più complesso di quelli precedenti, per quanto riguarda l'analisi di best fit. Infatti, mentre gli altri due modelli avevano solamente due parametri da variare per eseguire questa analisi, in questo caso i parametri sono ben cinque, complicando notevolmente il problema. L'equazione rappresentativa del modello è:

$$\frac{t_c}{\tau_0} = \left[\frac{1}{C} \sigma_f \frac{1}{D_1 \sqrt{1 + 2\nu^2}} \ln \left(\frac{b}{\sigma_f - a} \right) \right]^{1/n}$$

Si noti che è possibile fare come nei casi precedenti, cioè riunire in un'unica costante tutte le costanti che risultano moltiplicare tra loro. Questo accorgimento può essere applicato nel caso del prodotto tra le costanti C e D_1 : in questo caso si consideri il parametro A come l'inverso del prodotto tra i due, così da ridurre a quattro il numero di parametri da individuare.

$$A = \frac{1}{C D_1}$$

Innanzitutto è necessario eseguire le derivate parziali della funzione del modello rispetto ai parametri. La derivata rispetto ad A è:

$$\frac{d(t_r)}{d A} = \frac{\sigma_f \ln\left(-\frac{b}{a - \sigma_f}\right) \left(\frac{A \ln\left(-\frac{b}{a - \sigma_f}\right)}{\sqrt{1 + 2v^2}}\right)^{\frac{1}{n}-1}}{n \sqrt{1 + 2v^2}}$$

$$\frac{d(t_r)}{d a} = - \frac{A \sigma_f \left(\frac{A \ln\left(-\frac{b}{a - \sigma_f}\right)}{\sqrt{1 + 2v^2}}\right)^{\frac{1}{n}-1}}{n \sqrt{1 + 2v^2} (a - \sigma_f)}$$

$$\frac{d(t_r)}{d b} = - \frac{A \sigma_f \left(\frac{A \ln\left(-\frac{b}{a - \sigma_f}\right)}{\sqrt{1 + 2v^2}}\right)^{\frac{1}{n}-1}}{n \sqrt{1 + 2v^2} (a - \sigma_f)}$$

$$\frac{d(t_r)}{d n} = - \frac{\ln\left(\frac{A \sigma_f \ln\left(-\frac{b}{a - \sigma_f}\right)}{\sqrt{1 + 2v^2}}\right) \left(\frac{A \sigma_f \ln\left(-\frac{b}{a - \sigma_f}\right)}{\sqrt{1 + 2v^2}}\right)^{\frac{1}{n}}}{n^2}$$

In questo caso non è necessario considerare il valore della tensione di rottura in quanto non è presente nella funzione rappresentativa del modello. I parametri A, a, b e n si sostituiscono con u_0 , u_1 , u_2 e u_3 per creare il vettore dei parametri u da inserire nel vettore di funzioni di fitting. Inoltre si considerino i dati di tempo e tensione di rottura a creep come nel caso precedente. Riassumendo si ha:

$$u = (u_0, u_1, u_2, u_3)$$

$$f(z, u) := \begin{bmatrix} (Tr) \\ \frac{d}{du_0}(Tr) \\ \frac{d}{du_1}(Tr) \end{bmatrix} \begin{matrix} X := \text{data}^{\langle 1 \rangle} \\ Y := \text{data}^{\langle 0 \rangle} \end{matrix}$$

data :=

	0	1
0	$3.163 \cdot 10^4$	20.4
1	$1.224 \cdot 10^4$	20.82
2	$9.041 \cdot 10^3$	21.47
3	$2.124 \cdot 10^4$	21.52
4	$6.646 \cdot 10^3$	21.86
5	$5.138 \cdot 10^3$	22.3
6	$5.788 \cdot 10^3$	22.43
7	$1.267 \cdot 10^4$	23.29
8	260.9	24.05
9	225.9	24.49
10	543.42	24.88
11	79.3	25.17
12	102.1	25.32
13	72.96	25.42
14	84.9	25.45
15	71.5	26.1
16	69.96	26.11

Dove i parametri del vettore u hanno la seguente corrispondenza:

$$u_0 = A$$

$$u_1 = v$$

Ora si provveda a determinare il vettore di tentativo come nei casi precedenti, usufruendo di Excel per eseguire il best fit grafico preliminare. I risultati dei parametri determinati sono riportati nella seguente tabella, e sono evidenziati in azzurro.

PARAMETRI "GUESS" - CROCHET				
COEFF. DI POISSON	1° PARAMETRO	2° PARAMETRO	3° PARAMETRO	4° PARAMETRO
v	A	a	b	n
0.35	0.00221	0.16	2.6E+08	-0.041

Si riporti di seguito il grafico ottenuto implementando questo modello in Excel imponendo i sopracitati valori dei parametri. Si noti che l'assenza del valore di cedimento del materiale, a differenza dei casi precedenti, non porta ad un plateau orizzontale in corrispondenza del tempo tendente a zero ma mostra bensì un andamento esponenziale.

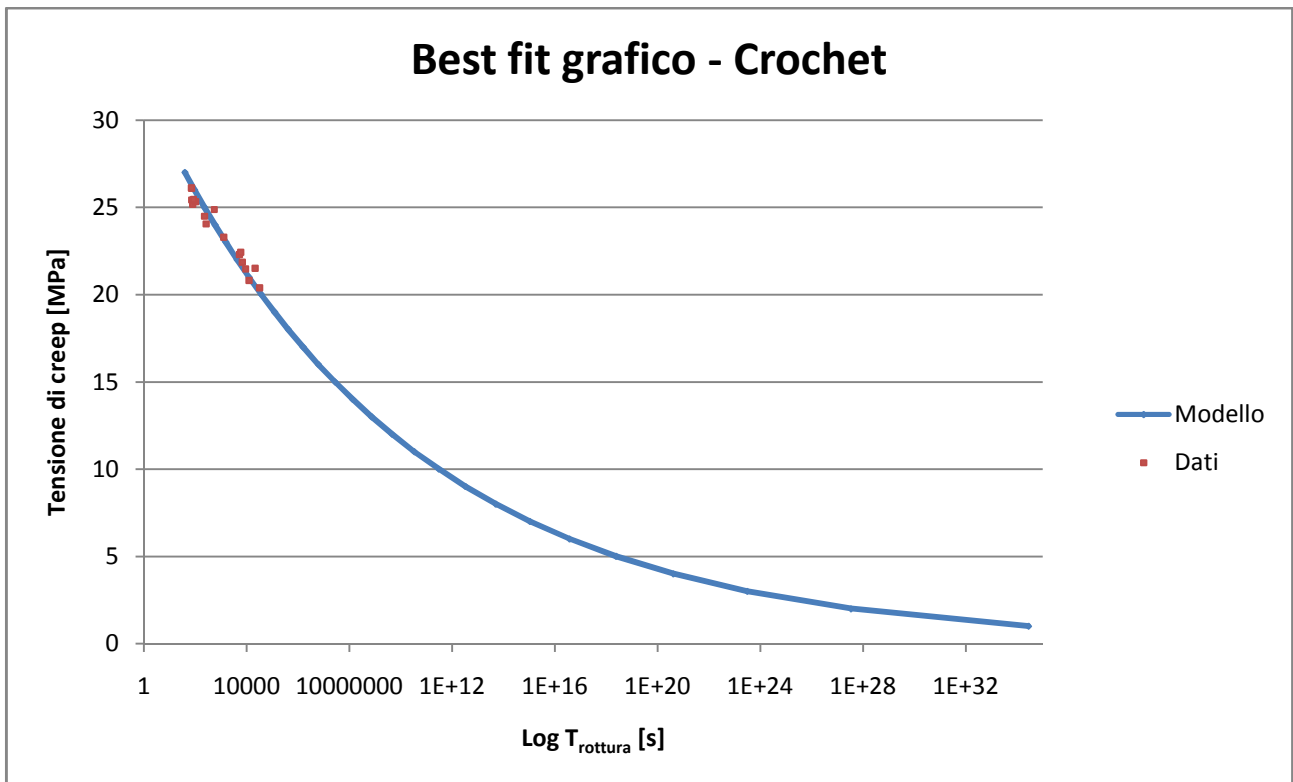


Figura 15 - Grafico del best fit preliminare implementato con Excel del criterio di Crochet

È ora possibile eseguire il best fit ottimale con MATHCAD inserendo il valore di tentativo "guess" generato riportando i valori dei parametri ottenuti attraverso l'analisi di best fit preliminare.

$$guess = \begin{pmatrix} 0.00221 \\ 0.16 \\ 2.6E + 08 \\ -0.041 \end{pmatrix}$$

Si scriva la funzione di genfit nel seguente modo,

$$GEN := genfit(X, Y, guess, f)$$

Ora si dovrebbe ottenere il vettore GEN che fornisca in output i valori ottimali di fitting della curva del modello attraverso la nuvola di dati sperimentali. Purtroppo però deve esserci qualche problema con i dati proposti nel vettore di tentativo in quanto si genera un errore in genfit: il software sostiene che la funzione $f(z, u)$ non può essere usata in questo caso. Probabilmente con il vettore di tentativo dato la funzione non va a convergenza. Per questo motivo si considerino come validi i valori dei parametri ottenuti con l'analisi preliminare eseguita con Excel, in quanto graficamente è apprezzabile il fitting della curva con i dati sperimentali.

Anche questo criterio, come il precedente, non considera la tensione di rottura del materiale e si basa sul danneggiamento continuo e progressivo del materiale in seguito all'applicazione del carico costante. L'equazione che rappresenta il comportamento di creep a rottura di questo modello è la seguente:

$$t_c = \frac{1}{A(1+\nu)\sigma_0^\nu}$$

Si osservi che A e ν sono dei parametri del materiale e che ν , sebbene il simbolo sembri indicare il contrario, non rappresenta il valore del coefficiente di Poisson del materiale.

Si riportino di seguito quindi le derivate parziali dell'equazione rispetto ai parametri da cercare per eseguire il best fit. La derivata rispetto a C è:

$$\frac{d(t_r)}{d C} = -\frac{1}{A^2 \sigma_0^\nu (1+\nu)}$$

Mentre la derivata rispetto a ν è:

$$\frac{d(t_r)}{d \nu} = -\frac{1}{A \sigma_0^\nu (1+\nu)^2} - \frac{\ln(\sigma_0)}{A \sigma_0^\nu (1+\nu)}$$

In questo caso non è necessario considerare il valore della tensione di rottura in quanto non è presente nella funzione rappresentativa del modello. I parametri A e ν si sostituiscono con u_0 e u_1 per creare il vettore dei parametri u da inserire nel vettore di funzioni di fitting. Inoltre si considerino i dati di tempo e tensione di rottura a creep come nel caso precedente. Riassumendo si ha:

$$u = (u_0, u_1)$$

data :=

	0	1
0	3.163·10 ⁴	20.4
1	1.224·10 ⁴	20.82
2	9.041·10 ³	21.47
3	2.124·10 ⁴	21.52
4	6.646·10 ³	21.86
5	5.138·10 ³	22.3
6	5.788·10 ³	22.43
7	1.267·10 ³	23.29
8	260.9	24.05
9	225.9	24.49
10	543.42	24.88
11	79.3	25.17
12	102.1	25.32
13	72.96	25.42
14	84.9	25.45
15	71.5	26.1
16	69.96	26.11

$$X := \text{data}^{(1)}$$

$$Y := \text{data}^{(0)}$$

$$f(z, u) := \begin{bmatrix} (\text{Tr}) \\ \frac{d}{du_0}(\text{Tr}) \\ \frac{d}{du_1}(\text{Tr}) \end{bmatrix}$$

Dove i parametri del vettore u hanno la seguente corrispondenza:

$$u_0 = A$$

$$u_1 = \nu$$

Ora si provveda a determinare il vettore di tentativo come nei casi precedenti, usufruendo di Excel per eseguire il best fit grafico preliminare. I risultati dei parametri determinati sono riportati nella seguente tabella, e sono evidenziati in azzurro.

PARAMETRI "GUESS" - DANNEGGIAMENTO CONTINUO	
1° PARAMETRO	2° PARAMETRO
A	ν
2.50E-39	24.9



Figura 16 - Grafico del best fit preliminare implementato con Excel del criterio di danneggiamento continuo

A questo punto dunque si generi il vettore di tentativo da inserire in MATHCAD per completare l'analisi di best fit attraverso la funzione di genfit.

$$guess = \begin{pmatrix} 2.50E-39 \\ 24.9 \end{pmatrix}$$

E scrivendo la funzione di genfit nel seguente modo,

$$GEN := \text{genfit}(X, Y, \text{guess}, f)$$

Otengo il vettore definitivo pari a:

$$GEN = \begin{pmatrix} 0 \\ 18.479 \end{pmatrix}$$

Il vettore così generato è palesemente in errore, infatti non è possibile attribuire al parametro A un valore nullo, in quanto è presente al denominatore dell'equazione. Per questo motivo si può dire che la funzione non giunge a convergenza correttamente e che quindi è necessario anche in questo caso considerare il best fit grafico eseguito preliminarmente con Excel.

Meccanismo di frattura

Si procede ora come nei casi precedenti per la determinazione dei parametri ottimali di best fit. Questo modello si basa sull'estensione ai materiali viscoelastici dell'analisi del meccanismo di frattura per predire le modalità di crescita di difetti e cricche. L'equazione che caratterizza questo modello è la seguente:

$$\left(\frac{t_f}{\tau_0}\right) = \left[2\left(1 + \frac{1}{n}\right) + 1\right] (\beta \sigma_0)^{-2\left(1 + \frac{1}{n}\right)}$$

Per procedere con l'analisi di best fit in MATHCAD è necessario determinare le derivate parziali di questa funzione rispetto ai parametri del materiale da determinare. Anche in questo caso si eseguiranno le derivate rispetto a 2 parametri: β e n .

La derivata rispetto a n è:

$$\frac{d(t_r)}{d n} = \frac{2 \ln(\beta \sigma_0) \left(\frac{2}{n} + 3\right)}{n^2 (\beta \sigma_0)^{\frac{2}{n}+2}} - \frac{2}{n^2 (\beta \sigma_0)^{\frac{2}{n}+2}}$$

E quella rispetto a β è:

$$\frac{d(t_r)}{d \beta} = - \frac{\sigma_0 \left(\frac{2}{n} + 2\right) \left(\frac{2}{n} + 3\right)}{(\beta \sigma_0)^{\frac{2}{n}+3}}$$

A questo punto si proceda come per i casi precedenti, inserendo la tabella di dati sperimentali da fittare, generando da essa i vettori X e Y da utilizzare in genfit e la funzione $f(z,u)$.

Anche in questo caso il valore della tensione di rottura non viene considerato, i parametri n e β si sostituiscano con u_0 e u_1 per creare il vettore dei parametri u da inserire nel vettore di funzioni di fitting e si considerino i dati di tempo e tensione di rottura a creep come nel caso precedente.

Riassumendo si ha:

$$u = (u_0, u_1)$$

data :=

	0	1
0	$3.163 \cdot 10^4$	20.4
1	$1.224 \cdot 10^4$	20.82
2	$9.041 \cdot 10^3$	21.47
3	$2.124 \cdot 10^4$	21.52
4	$6.646 \cdot 10^3$	21.86
5	$5.138 \cdot 10^3$	22.3
6	$5.788 \cdot 10^3$	22.43
7	$1.267 \cdot 10^3$	23.29
8	260.9	24.05
9	225.9	24.49
10	543.42	24.88
11	79.3	25.17
12	102.1	25.32
13	72.96	25.42
14	84.9	25.45
15	71.5	26.1
16	69.96	26.11

$X := \text{data}^{(1)}$
 $Y := \text{data}^{(0)}$

$$f(z, u) := \begin{bmatrix} (Tr) \\ \frac{d}{du_0}(Tr) \\ \frac{d}{du_1}(Tr) \end{bmatrix}$$

Dove i parametri del vettore u hanno la seguente corrispondenza:

$$u_0 = n$$

$$u_1 = \beta$$

Ora si provveda a determinare il vettore di tentativo come nei casi precedenti, usufruendo di Excel per eseguire il best fit grafico preliminare. I risultati dei parametri determinati sono riportati nella seguente tabella, e sono evidenziati in azzurro.

PARAMETRI "GUESS" - MECCANISMO DI FRATTURA	
1° PARAMETRO	2° PARAMETRO
n	β
0.085	0.037

Inoltre si può vedere il risultato del best fit preliminare nel seguente grafico, dov'è riportata la curva di tentativo del modello che fitta graficamente la nuvola di dati sperimentali.

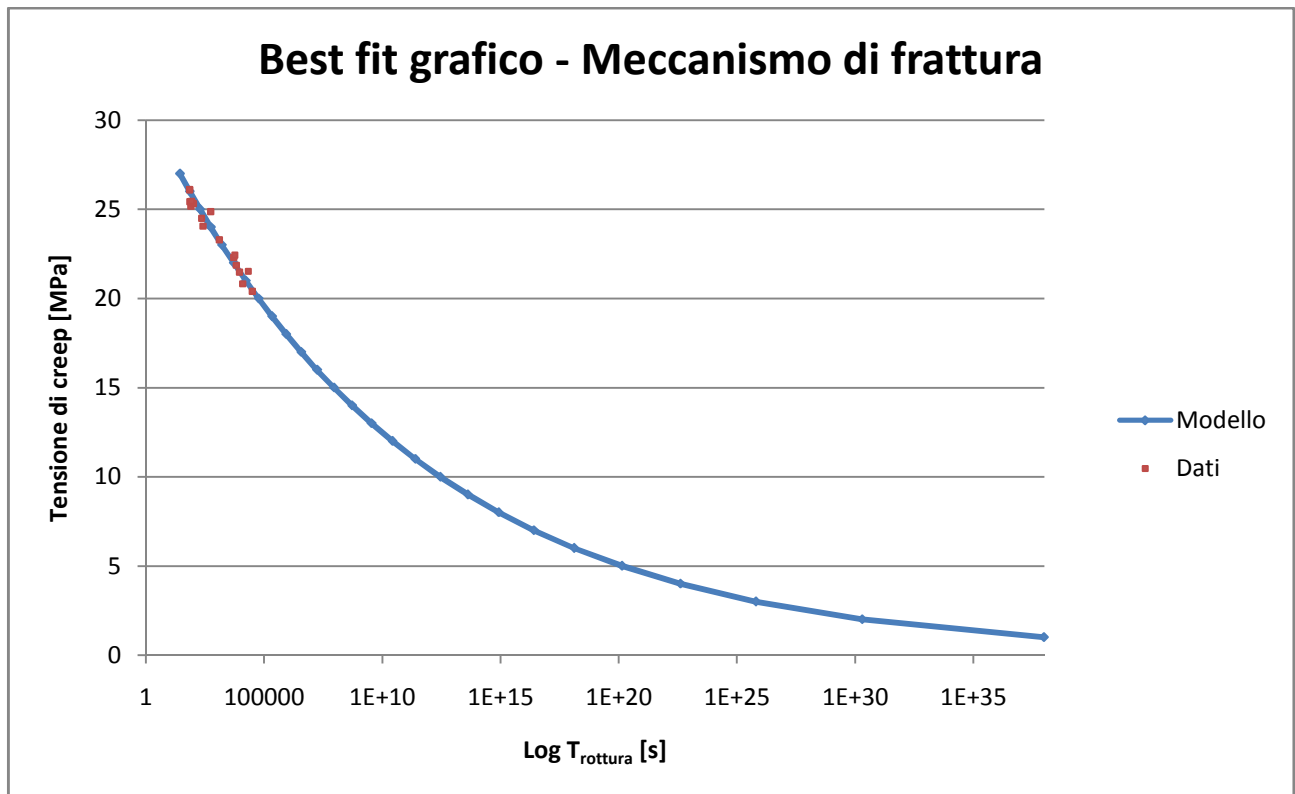


Figura 17 - Grafico del best fit preliminare implementato con Excel del criterio del meccanismo di frattura

A questo punto si hanno i valori di tentativo dei parametri ed è quindi possibile generare il vettore "guess" da inserire in MATHCAD.

$$guess = \begin{pmatrix} 0.085 \\ 0.037 \end{pmatrix}$$

E scrivendo la funzione di genfit nel seguente modo,

$$GEN := genfit(X, Y, guess, f)$$

Otengo il vettore definitivo pari a:

$$GEN = \begin{pmatrix} 0.121 \\ 0.033 \end{pmatrix}$$

In questo caso, rispetto ai due precedenti, si ha una convergenza della funzione genfit. Si noti inoltre che le operazioni di fitting preliminare eseguite con Excel si sono dimostrate molto utili in quanto con una variazione dei parametri di tentativo di qualche decimo genera un errore di convergenza e non si ottiene alcun risultato. A questo punto si verifichi la bontà dei parametri forniti dal MATHCAD implementando il modello stesso in Excel con i nuovi parametri ottenuti. Come si può osservare dal grafico di figura (...), e confrontandolo con quello di figura (...), sembra che il best fit migliore risulti essere quello ottenuto preliminarmente con Excel.

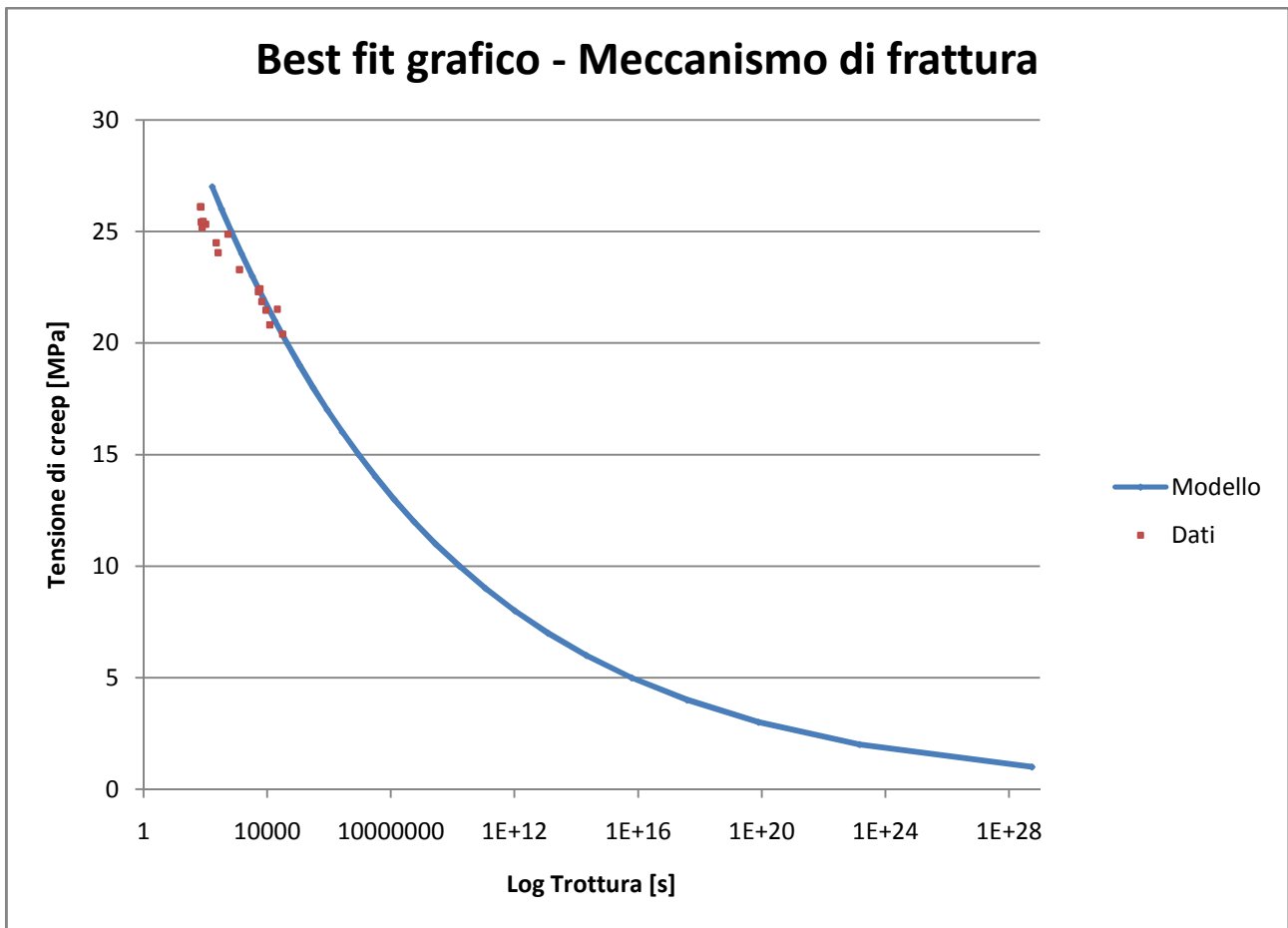


Figura 17 - Grafico del best fit ottimizzato con MATHCAD del criterio del meccanismo di frattura

CONFRONTO TRA MODELLI TEORICI

A questo punto è stato eseguito il best fit per ciascun criterio proposto e si può quindi procedere alla individuazione del più valido per questo materiale. Per fare questo si determini quale dei criteri presenti la minore sommatoria degli errori. Per fare questo si proceda nel seguente modo per ciascun criterio analizzato:

1. Si prenda l'equazione del modello e si determinino i valori del tempo a rottura per i valori di tensione di creep che si hanno a disposizione dai dati sperimentali.

$$t_{rottura, n, modello}$$

Dove n indica l'ennesimo livello di carico.

2. A questo punto per ciascun livello di carico sperimentale (tensione di creep) si hanno a disposizione dei valori di tempo a rottura ricavati dal modello e dei valori ricavati sperimentalmente. Questi sono:

$$t_{rottura, n, modello}$$

$$t_{rottura, n, dati}$$

3. Si esegua ora per ciascun livello di carico la differenza tra i tempi di rottura a creep ottenuti dal modello e sperimentali, e si definisca come errore.

$$errore_n = t_{rottura, n, modello} - t_{rottura, n, dati}$$

4. Si sommino i valori assoluti degli errori degli n livelli di carico e si divida la sommatoria per il numero di dati (n). Si ottiene così dunque il valore dell'errore medio per il criterio considerato.

$$\varepsilon = errore_{medio} = \frac{\sum_{i=1}^n errore_n}{n}$$

A questo punto si esegua un confronto tra gli errori generati tra i vari modelli per stabilire quale criterio riporti un errore minimo. Il modello che rispetterà questa condizione può essere considerato come quello che meglio interpola la nuvola di dati sperimentali e quindi quello che può essere scelto come riferimento per il materiale preso in considerazione (blend PBT/PC).

A titolo d'esempio si riportino le operazioni eseguite per il primo criterio analizzato, cioè quello di Reiner - Weissenberger. Considerazioni e operazioni analoghe sono state fatte anche per gli altri criteri, ma per quelli successivi al primo ci si limiterà solo a riportare i risultati tralasciando i passaggi di elaborazione dati.

Si riporti quindi di seguito la tabella (...) in cui si hanno sia i dati relative ai test di creep a rottura, sia i dati di creep a rottura ottenuti implementando l'equazione del modello.

DATI SPERIMENTALI		REINER-WEISSENBERGER				
TENSIONE	TEMPO	TENSIONE ROTTURA	1° PARAMETRO	2° PARAMETRO	TEMPO	ERRORE
[MPa]	[s]	[MPa]	n	A	[s]	[s]
20.40	31635.00	27.1	0.292	20.278	28617.77	3017.23
20.82	12239.90				20517.49	8277.59
21.47	9040.70				11914.66	2873.96
21.52	21244.70				11465.42	9779.28
21.86	6645.90				8488.83	1842.93
22.30	5137.90				5628.785	490.89
22.43	5787.70				4983.563	804.14
23.29	1267.34				2041.292	773.95
24.05	260.90				803.0857	542.19
24.49	225.90				427.7428	201.84
24.88	543.42				228.2686	315.15
25.17	79.30				131.1687	51.87
25.32	102.10				96.84683	5.25
25.42	72.96				77.59739	4.64
25.45	84.90				72.65284	12.25
26.10	71.50				11.63313	59.87
26.11	69.96				10.9845	58.98
					ERRORE MEDIO	1712.47

Tabella 12 - procedura di calcolo dell'errore medio per il criterio di Reiner-Weissenberger

Osservando la tabella (12) si facciano le seguenti considerazioni:

- Le prime due colonne riguardano i dati sperimentali di creep a rottura per valori crescenti di tensione.
- Sono riportate la costante del valore della tensione di rottura del materiale e quelle dei valori dei parametri ottenuti eseguendo il best fit ottimale tramite MATHCAD.
- La penultima colonna è quella dei valori del tempo di rottura a creep ottenuta inserendo il corrispondente valore di tensione di creep presente nella prima colonna all'interno dell'equazione del modello preso in considerazione.
- L'ultima colonna è relativa al valore assoluto dell'errore, corrispondente alla differenza tra il tempo a rottura fornito dal modello e il tempo a rottura ottenuto per l'ennesimo dato sperimentale.
- Infine è riportato l'errore medio, ricavato nel modo spiegato precedentemente.

Ora si ripetano le stesse operazioni per tutti i modelli, con l'obiettivo di determinare quale di quelli studiati fornisce il valore minimo dell'errore medio. Si utilizzi questo metodo per determinare quale dei modelli proposti interpola nel migliore dei modi la nuvola di dati sperimentali.

Si riporti di seguito una tabella riassuntiva in cui si presentino i valori dell'errore medio per ciascun modello di rottura a creep.

CRITERIO - CREEP A ROTTURA	ERRORE MEDIO
	[s]
REINER-WEISSENBERGER	1712.470287
NEW REINER-WEISSENBERGER	1716.306624
DEFORMAZIONE MASSIMA	1716.804669
TENSIONE MASSIMA	1712.845932
CROCHET	2011.808755
MECCANISMO DI FRATTURA - a	1802.471204
MECCANISMO DI FRATTURA - b	1833.419165
CONTINUUM DAMAGE	2037.351031

Osservando questa tabella si possono fare le seguenti considerazioni:

- Il criterio di danneggiamento continuo risulta essere quello che peggio interpola la nuvola di dati sperimentali, quindi viene escluso immediatamente insieme a quello di Crochet che dimostra anch'esso un comportamento analogo.
- Un'approssimazione del comportamento di rottura a creep leggermente migliore (rispetto ai modelli appena citati) è data dal criterio del meccanismo di frattura esteso ai materiali viscoelastici. Per questo criterio sono state riportate due configurazioni. La configurazione a è quella relativa ai valori dei parametri ottenuti tramite best fit "grafico" preliminare, mentre quella b è relativa ai valori ottenuti in seguito al procedimento di best fitting eseguito con MATHCAD. Sono state riportate entrambe proprio per dimostrare che in questo caso, come era

stato fatto notare precedentemente, l'interpolazione preliminare ha fornito un risultato migliore rispetto all'interpolazione ottimale in quanto l'errore medio risulta essere inferiore.

- Si noti che l'approssimazione migliore è data generalmente dai primi quattro criteri, i quali si basano sull'energia libera del materiale. In particolare il modello che meglio interpola i dati sperimentali per un blend polibutilentereftalato/policarbonato, avente al suo interno delle cavità generate in fase di stampaggio ad iniezione, è quello basato sul criterio di Reiner-Weissenberger. Si decide dunque di assumere questo criterio come quello di riferimento per il suddetto materiale nelle condizioni operative appena citate.

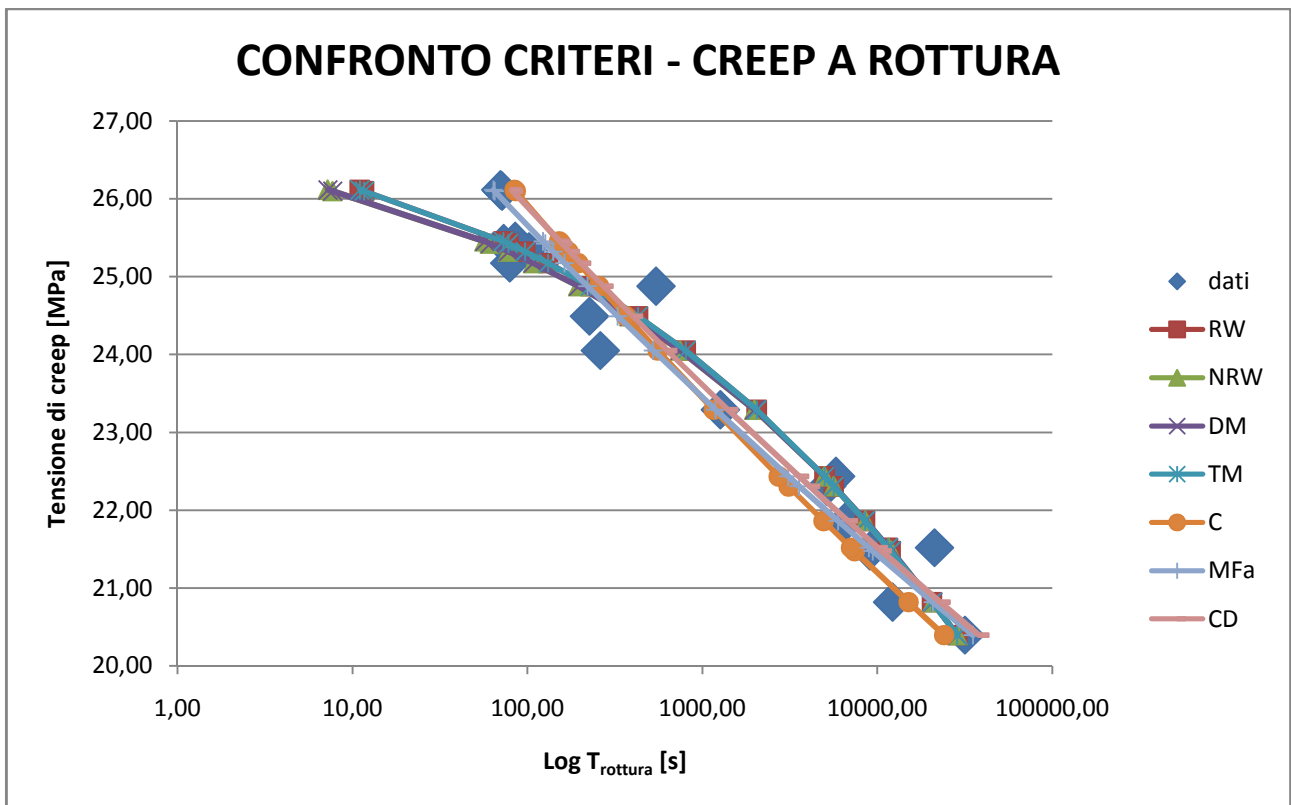


Figura 18 - Grafico comparativo tra dati sperimentali e curve dei modelli tra 20 e 27 MPa in scala logaritmica

Si riporti dunque il grafico in figura (18) in cui è rappresentato l'andamento delle curve dei vari modelli per il range di tensione utilizzato in fase di test in scala logaritmica. Inoltre si noti che sono riportati (punti blu grossi) i punti sperimentali dei test eseguiti e presi in considerazione. È opportuno fare un'osservazione riguardo al modello scelto: il modello di Reiner-Weissenberger (come pure tutti i modelli basati sull'energia libera) è caratterizzato dal valore minimo dell'errore medio, ma per valori della tensione particolarmente alti i valori di tempo di rottura a creep sono di un ordine di grandezza inferiori. Questo fatto è apprezzabile nel grafico soprastante, dove il punto sperimentale più alto (tensione massima) non viene fittato dai modelli basati sull'energia libera, mentre risulta molto vicino ai modelli di Crochet, di Meccanica della frattura estesa a materiali viscoelastici e di danneggiamento continuo. Ma se si guarda il seguente grafico di figura (19), dove il tempo non è espresso in scala logaritmica, si può invece capire che per i carichi elevati le differenze effettive non sono molto rilevanti; mentre le differenze diventano sempre più rilevanti man mano che ci si sposta verso carichi più bassi. È proprio al calare della tensione di creep che i modelli basati sull'energia libera risultano essere più efficaci nell'interpolazione della nuvola di dati sperimentali.

Infine si osservi per convalidare la bontà della scelta fatta sarebbe opportuno, avendo la possibilità di fare dei test di durata superiore alle 10 ore, eseguire test di più giorni per arrivare a tempi di 10^6 secondi. In alternativa, disponendo di una cella climatica, si potrebbero eseguire dei test a temperature maggiori per poter sfruttare il principio di equivalenza tempo-temperatura: in questo caso si possono eseguire test della durata inferiore alle 10 ore a temperature più elevate. Successivamente si utilizzi l'equazione di W-L-F, con opportuni valori delle costanti caratteristiche del materiale, per traslare i valori a temperature maggiori e generare così un'opportuna serie di valori per un creep test a rottura.

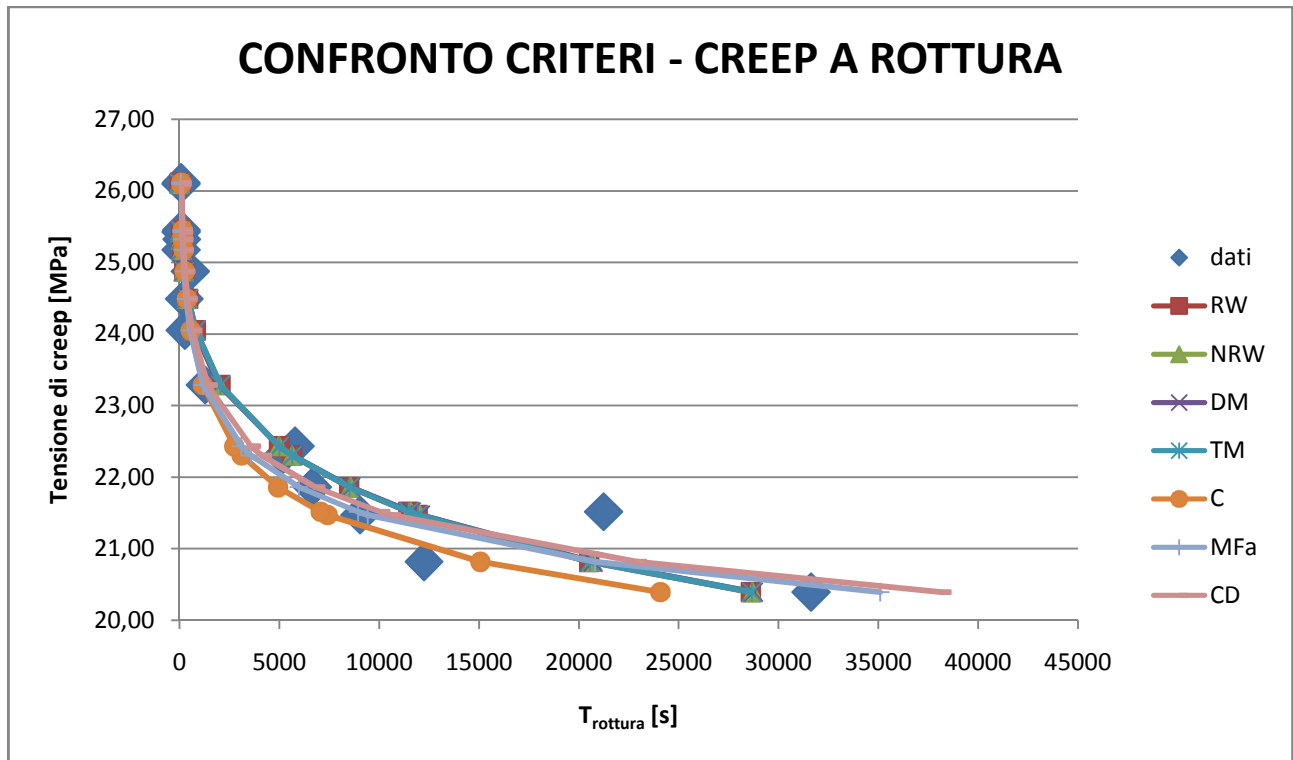


Figura 19 - Grafico comparativo tra dati sperimentali e curve dei modelli tra 20 e 27 MPa in scala lineare

ANALISI CREEP A ROTTURA MEDIANTE FEM

A questo punto è stato determinato il comportamento a creep a rottura del materiale identificandolo con il criterio di Reiner-Weissenberger. L'obiettivo ora è di trovare un modo per riuscire ad utilizzare questo modello per fare delle previsioni sul comportamento a creep usufruendo di un software ad elementi finiti. In questo caso si utilizzi ABAQUS.

L'idea è quella di determinare un coefficiente correttivo che permetta di ottenere un risultato di creep a rottura il più possibile reale (e comunque in vantaggio di sicurezza) eseguendo una semplice analisi statica con il software ad elementi finiti. Il vantaggio di questo è che un'analisi statica permette di giungere a convergenza molto più facilmente e in tempo molto minore rispetto ad un'analoga analisi viscoelastica (necessaria per eseguire un creep test).

PROCEDIMENTO

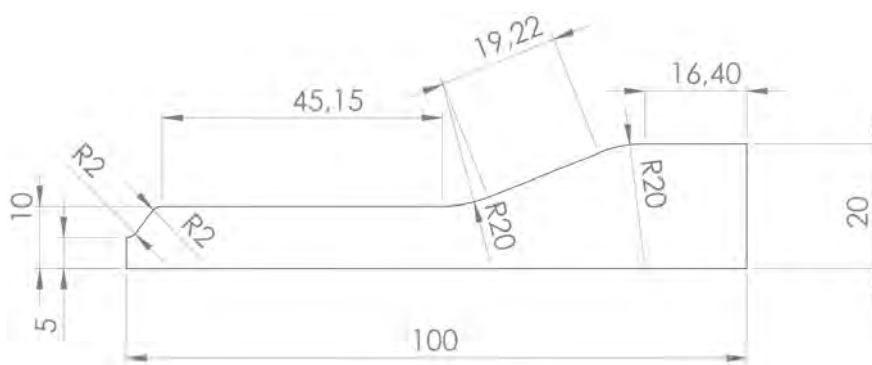
Per determinare questo coefficiente correttivo si proceda nel seguente modo:

1. Scegliere una geometria per il provino che permetta di generare una variazione di tensione lungo il provino: si utilizzi un modello di un provino avente un intaglio a metà del tratto utile;
2. Eseguire un'analisi statica sulla parte proposta fornendo opportuni valori per caratterizzare il materiale in ABAQUS.
3. Come risultato dell'analisi statica si ha la distribuzione delle tensioni sul pezzo: per determinare la vita del pezzo a creep si consideri il punto con la tensione massima. Si consideri la tensione equivalente massima poiché teoricamente quel punto sarà il primo a cedere e a rompersi a causa della sollecitazione a creep.
4. A questo punto, supponendo che il componente nella realtà venga sollecitato con carico costante e pari a quello applicato nell'analisi statica, si conosce la tensione di creep massima applicata nel punto più sollecitato. Si prenda questo valore e lo si inserisca nell'equazione del criterio scelto.
5. In questo modo si ottiene come risultato il valore del tempo di rottura a creep partendo dall'analisi statica con ABAQUS.
6. Si passi ora a generare un'analisi viscoelastica (con il software FEM) sulla stessa parte assunta precedentemente. In questo caso il materiale deve essere caratterizzato viscoelasticamente mediante dati ottenuti da creep test.
7. Si esegua quindi l'analisi viscoelastica caratterizzata da una durata pari al tempo a rottura determinato al punto 5, per valutare come si deforma il componente e come si ridistribuiscono le tensioni al suo interno.
8. Ci si aspetta che il punto più sollecitato sia corrispondente a quello precedente identificato al punto 3. Si valuti dunque il suo valore e si inserisca nuovamente nell'equazione del criterio di R-W per avere una nuova stima del tempo di rottura a creep. Interessante è valutare quant'è la differenza tra le tensioni massime e i tempi di rottura a creep ottenuti.
9. Il coefficiente correttivo può essere posto pari al rapporto tra il tempo a rottura ottenuto inserendo nell'equazione del criterio R-W la tensione massima valutata con l'analisi statica e quello ottenuto considerando la tensione massima valutata invece con l'analisi viscoelastica.

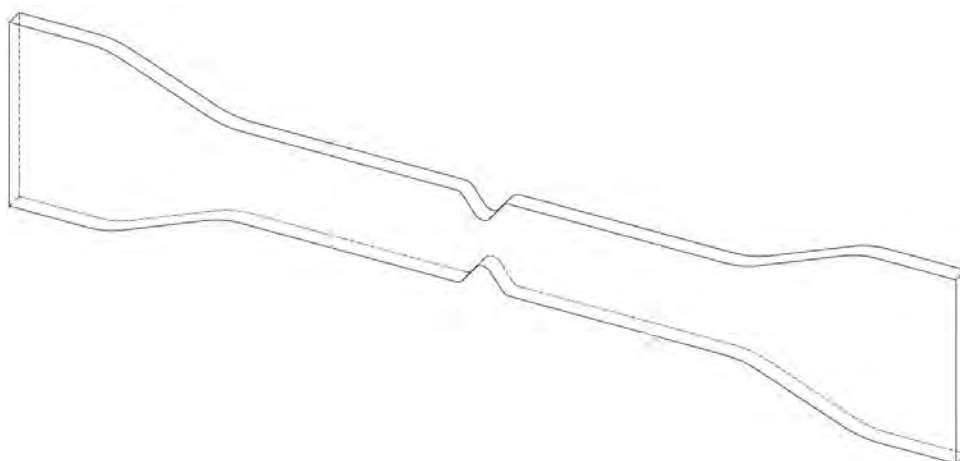
L'obiettivo è quello di determinare un coefficiente correttivo che sia adatto non solo a questo caso specifico, ma che possa essere utilizzato come metodologia per eseguire un dimensionamento a creep a rottura quantomeno preliminare valido anche per componenti prodotti industrialmente.

SCELTA DELLA FORMA DELLA PARTE

Il modello che si decide di considerare è un provino che presenti una variazione di sezione e che quindi generi una redistribuzione delle tensioni nel momento in cui viene sollecitato con una condizione di carico assiale. Si riporti di seguito il disegno del provino preso in considerazione.



Quello presentato è il profilo laterale di un ottavo di provino, in cui tutte le misure sono espresse in mm. È stato scelto di considerare solo questa porzione in quanto è stata considerata la geometria simmetrica sia rispetto al piano longitudinale passante per il centro del provino e ortogonale all'asse y, sia lungo il piano di sezione trasversale passante sempre per il centro del provino e ortogonale all'asse longitudinale, sia lungo il piano di sezione ancora longitudinale ma ortogonale all'asse z uscente dal foglio. Inoltre non sono state riportate le altre proiezioni in quanto il provino intero presenta uno spessore totale costante e pari a 4 mm, mentre la porzione di provino considerata in queste analisi ad elementi finiti ha uno spessore appunto di 2mm. Si mostri di seguito il provino intero che si vorrebbe utilizzare per queste analisi.



La scelta di considerare solo un ottavo del provino è da ricollegarsi sia alla simmetria della geometria, com'è stato detto precedentemente, sia alla simmetria del carico applicato. Infatti, essendo la simulazione di un test di trazione si può supporre che lo sforzo sia simmetrico sia rispetto al piano di

mezzzeria longitudinale sia rispetto il piano di simmetria trasversale, sia rispetto al piano di simmetria longitudinale e ortogonale all'asse uscente dal foglio (asse z).

Si facciano le seguenti osservazioni per giustificare la geometria scelta:

- Per avere un valore di tensione costante lungo il tratto utile è necessario che esso sia di lunghezza adeguata rispetto alla larghezza.
- Inoltre per lo stesso motivo è consigliato considerare la larghezza del provino in prossimità degli estremi che sia almeno il doppio di quella del tratto utile.

Infatti si osservi che queste due condizioni sono state rispettate nel provino preso in considerazione.

A questo punto è possibile procedere alla definizione delle analisi che si intendono eseguire per determinare il coefficiente correttivo di rottura a creep. Si inizi con il determinare l'analisi statica, caratterizzandone il materiale e definendone lo step static, i carichi applicati e gli opportuni vincoli. Successivamente si eseguano le stesse operazioni per l'analisi viscoelastica, ponendo particolare attenzione nel determinare correttamente il comportamento del materiale (in questo caso viscoelastico).

ANALISI STATICA

Si crei un primo modello denominato "static" che verrà poi utilizzato per generare dei risultati su un'analisi statica del componente proposto. La parte analizzata (l'ottavo di provino) viene importata in ABAQUS partendo da un disegno 3D creato precedentemente in ambiente Solidworks 2013.

Creazione della mesh

Una volta che la parte è stata importata in ABAQUS dal disegno CAD eseguito precedentemente con Solidworks, si può creare la mesh relativa al provino. Per creare una mesh opportuna è necessario considerare che lungo la sezione costante del provino le tensioni sono soggette solamente a delle piccole variazioni. Il punto in cui si ha un picco di tensione corrisponde al punto in cui la sezione è minima e cioè in corrispondenza della valle dell'intaglio a V creato: sarà proprio questa la regione da considerare, e quindi di maggiore interesse, in questo tipo di analisi.

Infatti, lo scopo delle due analisi è quello di verificare che tipo di ridistribuzione delle tensioni si incontra in seguito ad un'analisi visco in corrispondenza della sezione minima, rispetto alla semplice analisi statica.

Si proceda dunque alla creazione della mesh nel seguente modo:

- Si definisca come dimensione globale media degli elementi della mesh pari a 2, considerando che lo spessore è di 2 mm. In questo modo lungo lo spessore si cercherà di non avere più di un elemento, in quanto lungo lo spessore la tensione rimane pressoché costante.
- Selezionando la regione della sezione minima e quella intorno alla valle dell'intaglio presente sul provino, si esegua un infittimento della mesh in modo tale che vengano forniti dei risultati più veritieri in prossimità dell'area di maggiore interesse. In queste regioni di interesse si è scelto di prendere una dimensione media degli elementi pari a 0.3, così da infittire significativamente la maglia. Inoltre a seguito di diverse analisi si è riscontrata la necessità di

infittire la mesh anche lungo lo spessore passando da 1 elemento a 8 elementi, in quanto si ottengono così risultati più vicini alla realtà.

- A causa della presenza di superfici curve in prossimità dell'incisione sono stati scelti gli elementi tetragonali per la costruzione della mesh.
- La mesh generata è presentata di seguito in figura (1).

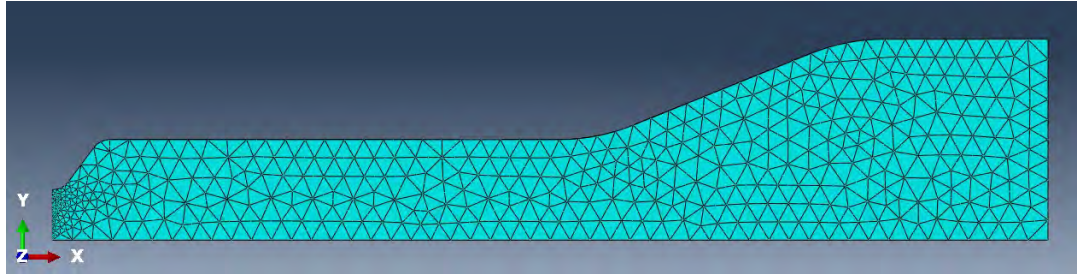


Figura 1 - vista su piano x-y della mesh dell'elemento

L'immagine presentata qui di fianco (fig.(2)) mostra l'infittimento della mesh in corrispondenza della sezione minima e dell'incisione in generale.

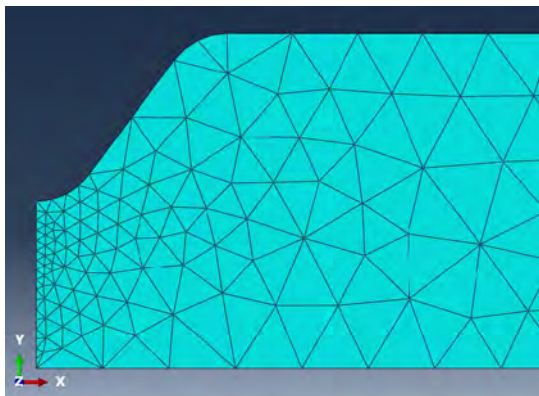


Figura 2 - dettaglio della mesh in corrispondenza dell'incisione

È di interesse infatti valutare come si distribuisce il carico lungo questa sezione minima.

Inoltre è necessario eseguire la verifica della mesh per valutare se così com'è fatta è accettabile e giunge a convergenza. Come si può osservare dalla figura (3) la verifica della mesh porta ad un risultato positivo, infatti tutti i criteri di verifica della mesh sono rispettati al 100%; per questo motivo può essere accettata per eseguire le analisi proposte.

```
Part: Ottavo di provino_simmtriassiale
Tet elements: 1204, Shape factor < 0.0001: 0 (0%)
Average shape factor: 0.510381, Worst shape factor: 0.004220

Part: Ottavo di provino_simmtriassiale
Tet elements: 1204, Min angle < 5: 0 (0%)
Average min angle: 29.58, Worst min angle: 5.87

Part: Ottavo di provino_simmtriassiale
Tet elements: 1204, Max angle > 170: 0 (0%)
Average max angle: 96.03, Worst max angle: 153.50

Part: Ottavo di provino_simmtriassiale
Tet elements: 1204, Aspect ratio > 10: 0 (0%)
Average aspect ratio: 2.12, Worst aspect ratio: 5.75
```

Figura 3 - Criteri di verifica della mesh: risultato positivo

Caratterizzazione del materiale

Per determinare il comportamento del materiale per l'analisi statica è sufficiente dare una caratterizzazione hyperelastica. In questo caso sono stati considerati i dati ottenuti sperimentalmente attraverso i test di trazione eseguiti in fase di determinazione della tensione di snervamento. Si prenda dunque il test di trazione eseguito sul provino T3 in PBT/PC ottenuto per stampaggio ad iniezione

considerando i dati fino allo snervamento, in quanto ABAQUS, per la caratterizzazione hyperelastic del materiale consente di inserire solo una serie crescente di valori di tensione e deformazione. Inoltre i dati disponibili sono in numero eccessivo e non perfettamente allineati da generare una curva accettata dal software. Per questo motivo è stata creata una linea di tendenza sui dati del test in Excel polinomiale di grado 4 che interpola al meglio i dati sperimentali. L'equazione polinomiale della linea di tendenza è quindi riportata nel seguente grafico.

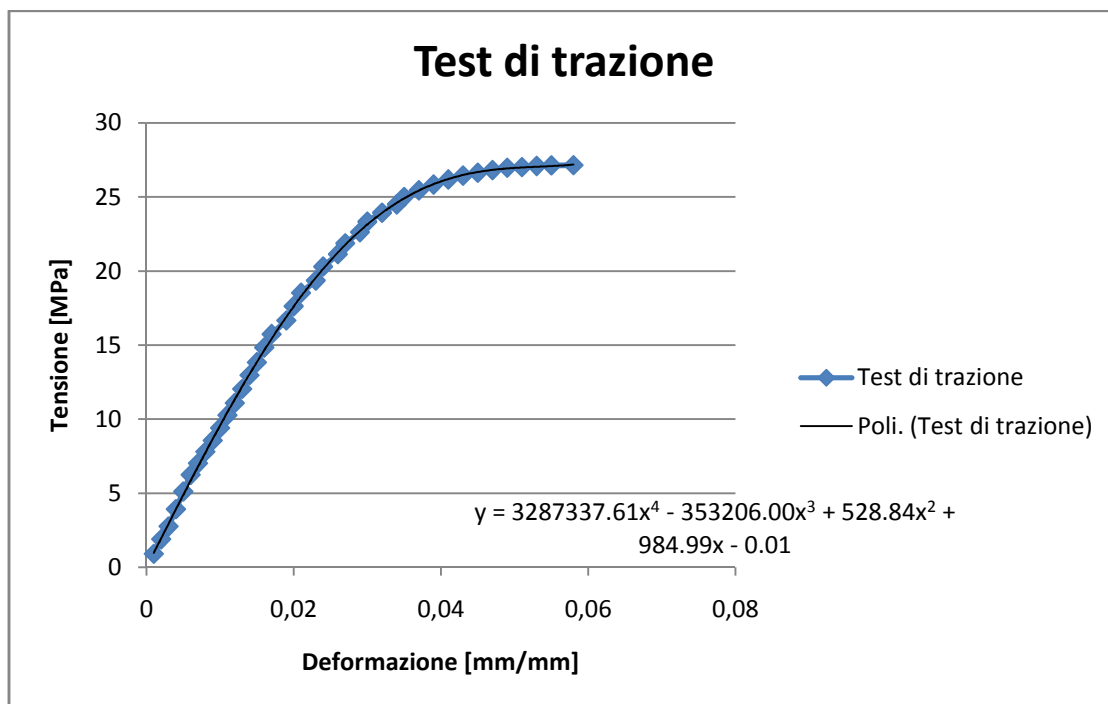


Figura 4 - Diagramma di un test di trazione del materiale PBT/PC con equazione polinomiale

Con la suddetta equazione è possibile ottenere una serie di dati sperimentali corretta e perfettamente accettata da ABAQUS per caratterizzare il materiale. Nella seguente tabella sono riportati i dati sperimentali che devono essere forniti al software.

DEFORMAZIONE [mm/mm]	TENSIONE [MPa]
X	Y
0	0
0.005	4.890075
0.01	9.576451
0.015	13.86219
0.02	17.60566
0.025	20.71455
0.03	23.14584
0.035	24.90583
0.04	26.05014
0.045	26.68369
0.05	26.96071
0.055	27.08474
0.06	27.30862

Tabella 1 - punti della curva dell'equazione del test di trazione

Inoltre è necessario selezionare il criterio da utilizzare per lo strain energy potential. Per questo tipo di materiale viene suggerito l'utilizzo del criterio di Marlow. Infine è necessario fornire un valore indicativo del modulo di Poisson, il quale è stato ricavato in letteratura per questo tipo di materiale ed è pari a 0.44. Si riportano di seguito lo screenshot inerente alla caratterizzazione del materiale hyperelastico per l'analisi statica.

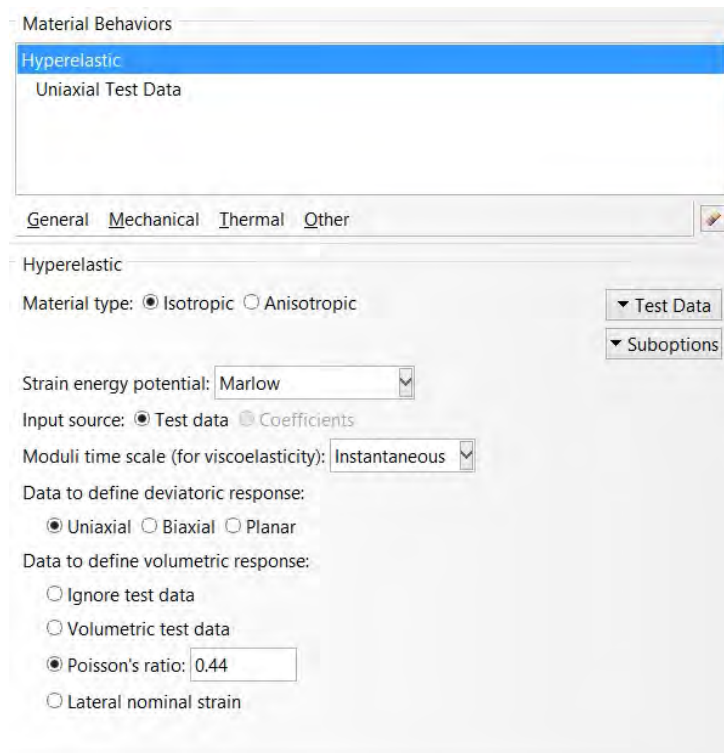


Figura 5 - finestra per la caratterizzazione del materiale hyperelastico

Definizione dello step

Per definirlo bisogna aver chiaro in mente cosa si vuole far simulare al software. In questo caso si voglia determinare la risposta immediata del provino in seguito all'applicazione del carico prestabilito supponendo il materiale hyperelastico. Per questo motivo è sufficiente eseguire un'analisi di tipo STATIC, GENERIC in cui sarà necessario determinare il carico applicato, le condizioni di vincolo e i parametri necessari per definire i limiti degli incrementi e degli errori per ottenere la convergenza dell'analisi. Non sarà quindi necessario indicare il tempo virtuale dell'analisi, cosa che invece sarà richiesta nel caso di analisi VISCO.

Per definire i vincoli, si consideri sia la simmetria del carico applicato nella realtà, sia la triplice simmetria della geometria del provino. Per questo motivo si decide di impostare:

- un vincolo di spostamento (nella direzione x) del piano ortogonale all'asse x su cui giace la superficie

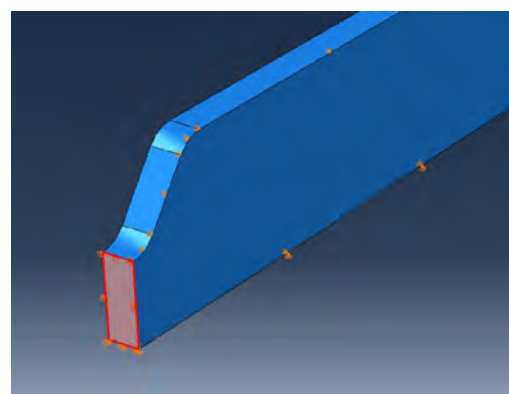


Figura 6 - piano su cui è applicato il primo vincolo nella direzione x

della sezione minima, lasciando libere le rotazioni e lo spostamento lungo la direzione dell'asse y e z , così da permettere la contrazione del provino. Si riporti il piano in figura (6).

- Un vincolo sempre di spostamento nella direzione y del piano su cui giace l'asse di simmetria longitudinale e l'asse x . In questo modo la parte risulta essere opportunamente vincolata in modo tale che la sezione sul piano x - z non possa traslare lungo l'asse delle y . Il piano è riportato in figura (7).

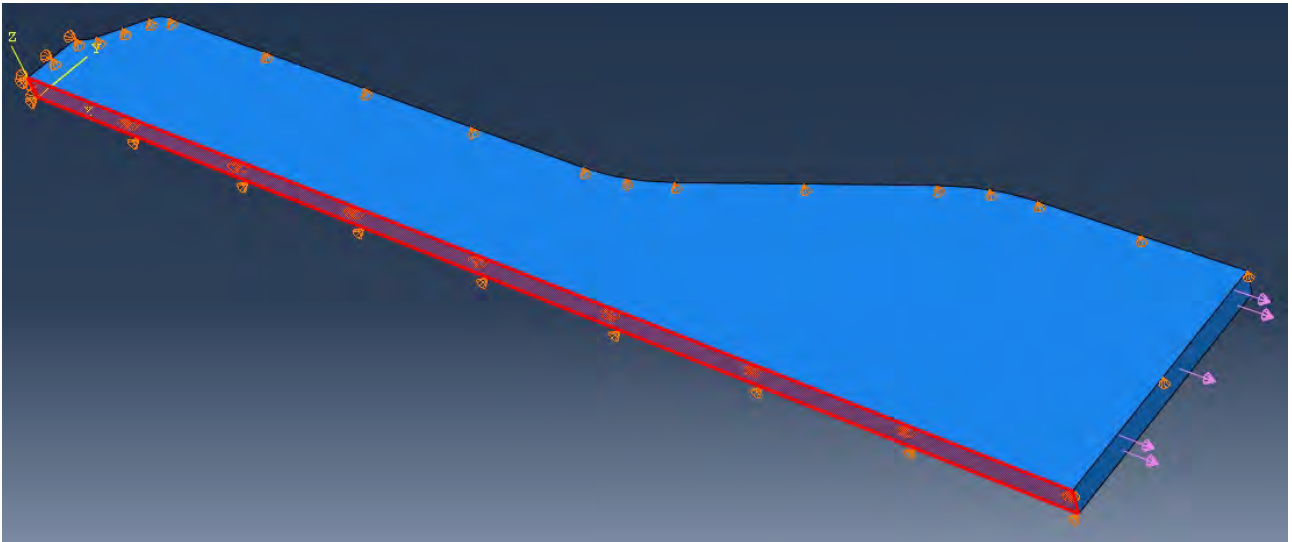


Figura 7 - piano vincolato nella direzione y

- Infine l'ultimo vincolo imposto è quello relativo alla traslazione lungo la direzione z dell'angolo che divide a metà il provino lungo il suo spessore. Sul piano indicato in figura (8) si imponga un vincolo di spostamento nullo in direzione z , lasciando libera la contrazione e l'allungamento del provino nelle direzioni rispettivamente y e x .

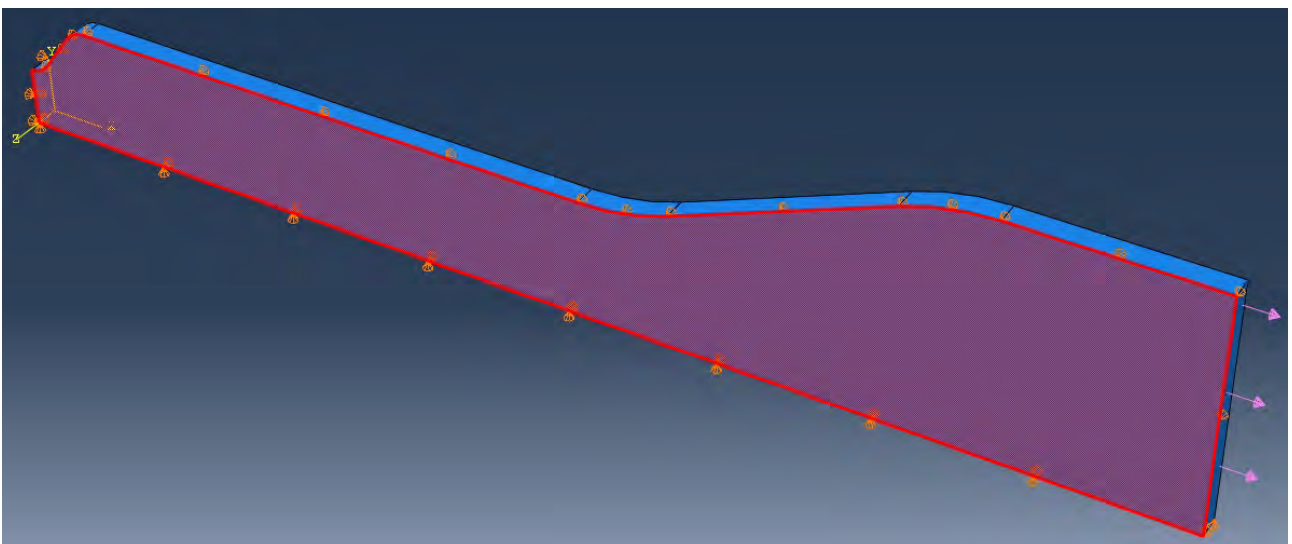


Figura 8 - piano vincolato lungo la direzione z

Per quanto riguarda il carico, si è deciso di impostare (dopo alcuni tentativi) un carico sulla superficie ortogonale all'asse delle x e corrispondente alla sezione massima del provino, pari a -90 N. In questo modo si garantisce che non ci sia un picco di tensione che superi quella di snervamento, in

corrispondenza della sezione di valle dell'intaglio. Il carico è visibile sia in figure (7) e (8) ed è indicato con le frecce viola.

Analisi STATIC, GENERIC

A questo punto è possibile generare un JOB per poter lanciare l'analisi e ottenere i primi risultati. Per quanto riguarda il JOB si selezioni come modello di riferimento quello denominato "static", creato seguendo le indicazioni sopra riportare. Una volta completata l'analisi e verificato nel file data che non ci siano stati problemi di convergenza, si passi all'analisi dei risultati.

Innanzitutto si visioni l'andamento delle tensioni lungo il provino, facendo riferimento alla tensione di equivalente di Von - Mises. Infatti in letteratura è ritenuta un'approssimazione plausibile quella di considerare accettabile il criterio di Von - Mises per determinare lo stato di tensione equivalente per materiali polimerici.

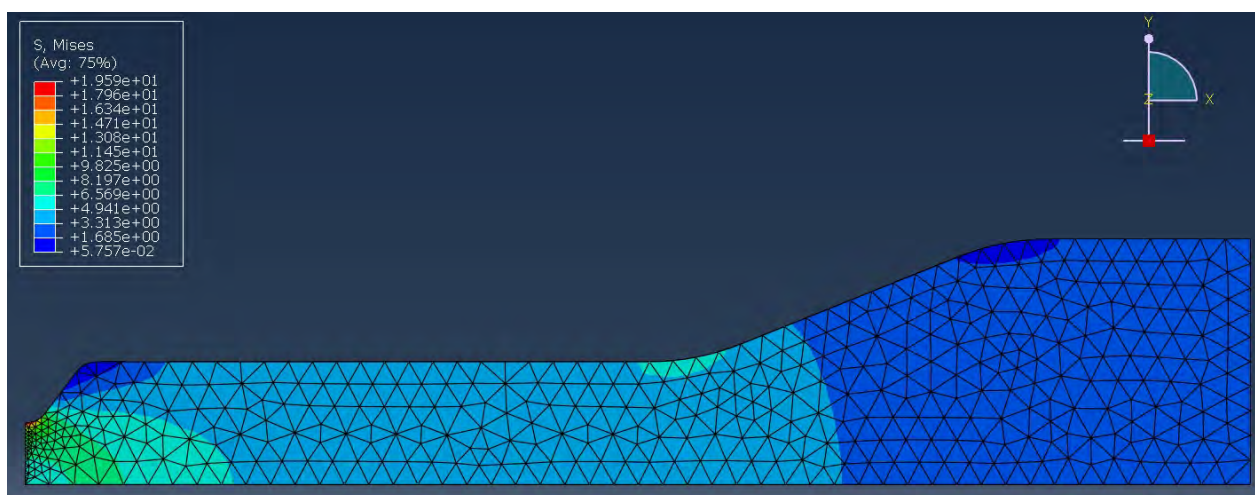


Figura 9 - risultato della tensione equivalente dell'analisi statica in vista laterale (piano x-y)

Si osservino le figure (9) e (10) e si traggano le seguenti conclusioni:

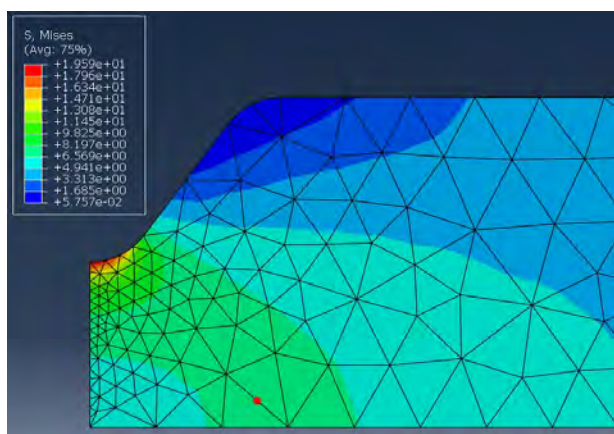
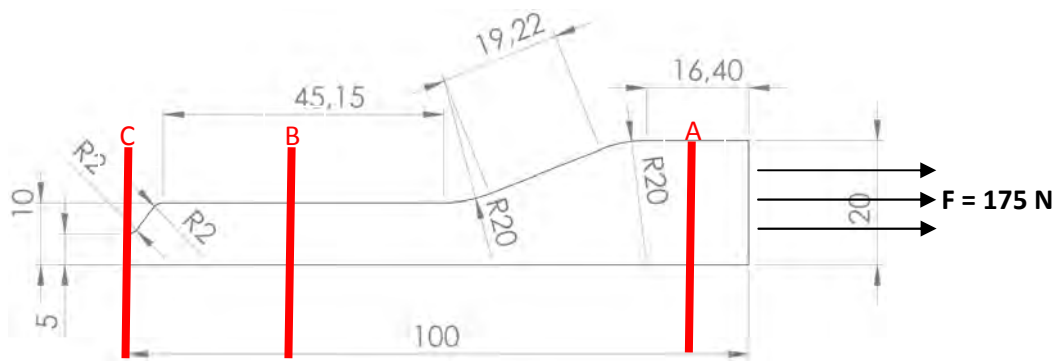


Figura 10 - Particolare del risultato della tensione equivalente dell'analisi statica

- Innanzitutto si noti che nei tratti a sezione costante la tensione rimane all'incirca costante, come giustamente ci si aspettava.
- In corrispondenza dell'intaglio c'è una variazione della tensione, in particolare è presente un'intensificazione della tensione.
- Il picco di tensione è presente in corrispondenza della sezione minima del provino; Inoltre il valore massimo di tensione è maggiore di quello che ci si aspetterebbe conoscendo la forza applicata al provino e l'area della sezione minima.

Questo è dovuto alla presenza dell'intaglio.

Ora si riporti un confronto tra i risultati ottenuti con questa analisi "STATIC, GENERIC" con i risultati ottenuti analiticamente per questo caso di studio.



Si consideri innanzitutto il disegno del provino da studiare. In particolare si prendano 3 sezioni di riferimento:

- A: sezione in corrispondenza dell'area massima;
- B: sezione in corrispondenza dell'area costante del tratto utile in assenza di intaglio;
- C: sezione in corrispondenza della gola dell'intaglio in cui l'area è minima.

Per ciascuna sezione di determini lo sforzo teorico, in funzione del carico applicato e dell'area corrispondente alla sezione. Utilizzando la semplice formula

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Si riportino nella seguente tabella i valori della tensione corrispondenti alle varie sezioni.

SEZIONE	CARICO	AREA	TENSIONE NOMINALE
	[N]	[mm ²]	[MPa]
A	90	40	2.25
B	90	20	4.5
C	90	10	9

Tabella 2 - valori delle tensioni teoriche in corrispondenza delle sezioni A, B e C

Ora si individuino i valori di tensione ottenuti in seguito all'analisi statica sul modello "static" creato in ABAQUS. Considerando nel modello sviluppato nel software le stesse sezioni del modello teorico, si riportino nella seguente tabella i valori della tensione nei diversi nodi presenti lungo le linee corrispondenti ad ogni sezione.

SEZIONE A		SEZIONE B		SEZIONE C	
NODO	TENSIONE [MPa]	NODO	TENSIONE [MPa]	NODO	TENSIONE [MPa]
4	2.25	11357	4.5	18	19.59
269	2.25	4482	4.51	210	10.38
267	2.28	11700	4.51	207	7.83
265	2.34	12780	4.51	205	7.02
263	2.39	11930	4.51	203	6.52
21	2.41	7570	4.51	200	6.11
MEDIA	2.32	MEDIA	4.508	MEDIA	9.575

Tabella 3 - Valori delle tensioni individuate in corrispondenza delle sezioni A, B e C tramite l'analisi statica

Come si può notare in corrispondenza della sezione A e della sezione B i valori di tensione media ricavati dall'analisi statica corrispondono ai valori ricavati teoricamente in corrispondenza della stessa

sezione. Per quanto riguarda la sezione C invece si ha un picco di tensione dovuto proprio all'effetto della presenza dell'intaglio. Prendendo i valori delle due tensioni in corrispondenza della sezione minima C, è possibile determinare il coefficiente di intaglio (o fattore di concentrazione delle tensioni):

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

Dove:

- σ_{nom} è la tensione nominale calcolata teoricamente in corrispondenza della sezione minima.
- σ_{max} è la tensione massima effettiva che si ha in corrispondenza della valle dell'intaglio (sezione minima).

Si ottiene dunque:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = 2.176$$

Determinazione del tempo di rottura a creep

Ora si individui il punto in cui si ha la massima tensione presente nel pezzo. Questo punto è quello più sollecitato e quindi è quello che per primo dovrebbe cedere in caso di sollecitazione a creep. Inserendo il valore di tensione massima nell'equazione del modello di rottura a creep selezionato per questo materiale, si può ricavare il tempo di rottura a creep corrispondente e quindi il tempo di cedimento del provino per creep.

Il criterio considerato è quello di Reiner - Weissenberger, a cui corrisponde la seguente equazione:

$$\left(\frac{t_R}{\tau_0}\right)_{RW} = \left(\frac{1}{1 - 2^{n-1}}\right)^{1/n} \left[\frac{1}{2} \frac{D_0}{C} \frac{(\sigma_R - \sigma_0)(\sigma_R + \sigma_0)}{\sigma_0^2} \right]^{1/n}$$

Inserendo il valore della tensione massima pari a $\sigma_0 = 20.42 \text{ MP}$, posso ottenere il corrispondente valore del tempo di rottura a creep. Si ottiene dunque il seguente risultato.

Tempo di rottura a creep	52442 secondi
---------------------------------	----------------------

D'ora in poi per semplicità si identifichi con VISCO l'analisi di tipo viscoelastico che e con STATIC quella statica che possono essere effettuate con ABAQUS. Infatti le due tipologie di analisi si differenziano per la tipologia di step impostata: per quanto riguarda quella statica appunto si imposta uno step "STATIC, GENERIC" mentre per quella viscoelastica se ne impone uno "VISCO".

Il dato di tempo a rottura a creep calcolato è importante per determinare la durata dello step VISCO nel caso di analisi su materiale viscoelastico. Infatti ponendo una durata dell'analisi pari al tempo di rottura a creep è possibile comparare i valori di tensione massima tra l'analisi STATIC e quella VISCO. Si determini il tempo di rottura a creep nel caso dell'analisi VISCO e si ricavi il coefficiente correttivo dato dal rapporto tra il tempo di rottura per l'analisi STATIC e quello per l'analisi VISCO. In questo modo per tutti i casi simili a quello preso in considerazione è possibile eseguire un'analisi STATIC e determinare un valore di tempo di rottura a creep più veritiero moltiplicando il tempo ottenuto da questa analisi per il coefficiente correttivo di rottura a creep.

ANALISI VISCO

Si crei ora un modello denominato "creep", così da eseguire un'analisi VISCO e valutare la tensione al tempo a rottura stimato al termine dell'analisi STATIC eseguita precedentemente. La parte considerata in questo caso è uguale a quella importata nell'analisi precedente, cioè si tratta dell'ottavo del provino con intaglio doppio.

Creazione della mesh

La creazione della mesh è avvenuta nello stesso identico modo del caso dell'analisi presentata precedentemente, per questo motivo se ne tralasci la descrizione. Per i dettagli si legga il paragrafo relativo alla questione relativo all'analisi STATIC, GENERIC.

Caratterizzazione del materiale

La prima sostanziale differenza rispetto all'analisi statica è la caratterizzazione del materiale. In quel caso è stato scelto di assumere il materiale hyperelastico e di fornirne il comportamento attraverso dati di un test di trazione monoassiale e il coefficiente di Poisson. In questo caso invece si definisca il comportamento del materiale riportando il modulo elastico istantaneo iniziale e il coefficiente di Poisson, per quanto riguarda il comportamento elastico, e una serie di dati relativi ad una curva di creep, per caratterizzare il comportamento viscoelastico del blend PBT/PC.

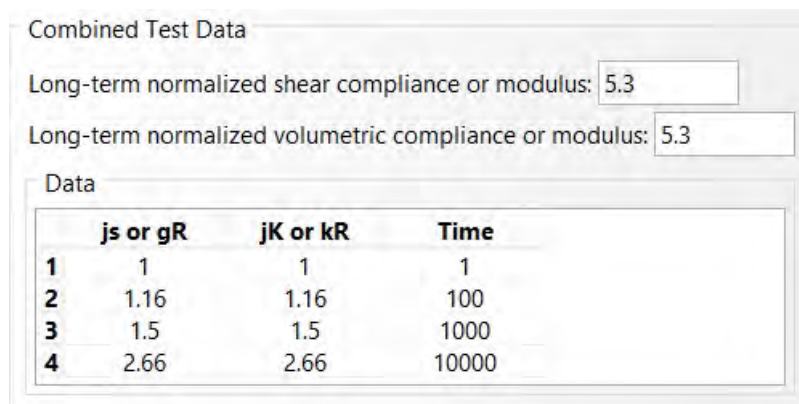
Il modulo elastico istantaneo che si possiede non può ritenersi del tutto preciso, in quanto per i test di trazione eseguiti in laboratorio non era a disposizione un estensometro per valutare le deformazioni reali. Il valore del modulo elastico è stato quindi valutato come la pendenza iniziale della curva di trazione di riferimento, pur conoscendo i limiti di questo valore.

Per quanto riguarda il coefficiente di Poisson invece il suo valore è stato tratto dalla letteratura, basandosi su un materiale molto simile.

La parte più complicata per questa analisi è stata quella relativa alla determinazione del comportamento viscoelastico del materiale. Per fare questo, com'è già stato detto, si è deciso di considerare un creep test effettuato in laboratorio. Purtroppo però, a causa della natura non lineare della viscoelasticità dei materiali polimerici, è stato opportuno operare la scelta più conveniente del test eseguito. Infatti, volendo indagare il comportamento di creep a rottura in prossimità della tensione massima, è bene considerare un creep test che abbia una tensione di creep il più possibile a quella massima presente nel pezzo.

Si scelga dunque di attingere dai dati del test creep eseguito sul provino C21, in quanto ha la tensione di prova molto vicina a quella massima rilevata con l'analisi statica. Dopo alcuni tentativi, ci si accorge che il software non accetta tutti i dati: inserendo la serie di dati completa che si ha a disposizione non permette ad ABAQUS di portare a convergenza l'analisi VISCO, in quanto non riesce a fare una valutazione del materiale. Per risolvere questo problema si ha optato per considerare solamente alcuni

valori rappresentativi della prova di creep a rottura eseguita sul provino C21. Si riportino di seguito, nella figura dello screenshot, i valori considerati, tenendo conto del fatto che il software mostrava (in analisi eseguite precedentemente) la tendenza ad andare a convergenza inserendo una coppia di dati (tempo, tensione) per ogni ordine di grandezza del tempo.



Combined Test Data

Long-term normalized shear compliance or modulus: 5.3

Long-term normalized volumetric compliance or modulus: 5.3

Data

	js or gR	jK or kR	Time
1	1	1	1
2	1.16	1.16	100
3	1.5	1.5	1000
4	2.66	2.66	10000

Figura 11 - finestra per l'inserimento dei combined test data da creep test

Nell'immagine si può vedere che sono stati forniti dei dati combinati di share e volumetric compliance.

Di seguito si riportino in tabella (4) i calcoli effettuati per determinare i valori del "normalized volumetric compliance" (jK) e del "normalized shear compliance" (js).

Tempo	Et	Poisson	Gt	Js(t)	Kt	Jk(t)	js(t)	jk(t)
[s]	[MPa]		[MPa]		[MPa]			
1	737	0.44	255.90	0.003908	2047.22	0.000488	1	1
100	630	0.44	218.75	0.004571	1750	0.000571	1.169	1.169
1000	480	0.44	166.66	0.006	1333.33	0.00075	1.535	1.535
10000	270	0.44	93.75	0.010667	750	0.001333	2.729	2.729

Tabella 4 - processo per la determinazione dei valori normalizzati del modulo di creep

I parametri della tabella sono:

- Tempo: il primo dato di creep è il tempo in secondi;
- E_t : il modulo elastico al tempo corrispondente della prima colonna;
- Poisson: è il coefficiente che lega la contrazione laterale all'allungamento longitudinale (ν);
- G_t : è lo shear modulus, noto anche con il nome di modulo di rigidità, e corrisponde al rapporto tra tensione di taglio e deformazione di taglio. È possibile ricavarne il valore partendo dal modulo elastico E_t e dal coefficiente di Poisson, grazie alla seguente relazione.

$$G_t = \frac{E_t}{2(1 + \nu)}$$

- $J_s(t)$: è l'inverso del modulo di rigidità;
- K_t : è il valore del bulk modulus e rappresenta la resistenza del materiale ad una sollecitazione di compressione uguale in ogni direzione;
- $J_k(t)$: è il valore dell'inverso del bulk modulus;
- $js(t)$: è il valore normalizzato dello shear modulus, e si calcola nel seguente modo.

$$js(t) = J_s(t) \times G_{t=0}$$

- $j_k(t)$: il valore normalizzato dello shear modulus, e si calcola nel seguente modo.

$$j_k(t) = J_k(t) \times K_{t=0}$$

Infine si spieghi cosa s'intende con "long term normalized compliance": esso indica il valore normalizzato del bulk modulus e dello shear modulus a tempi tendenti all'infinito.

Definizione dello step

Ora si proceda con la definizione dello step. A differenza dell'analisi precedente, in questo caso bisogna sfruttare la viscoelasticità del materiale e quindi è necessario generare un'analisi VISCO. Questa tipologia di analisi si differenzia da quella precedente in quanto fornisce come risultato l'andamento della deformazione nel tempo, basandosi sui dati di creep forniti in fase di caratterizzazione del materiale. Infatti è necessario definire il tempo di durata dello step, che deve corrispondere al tempo di creep che si vuole analizzare.

Lo scopo di questo studio è quello di valutare la differenza tra i risultati forniti da un'analisi statica e i risultati di un'analisi visco che abbia una durata pari al tempo a rottura determinato attraverso il modello di Reiner-Weissenberger per una tensione corrispondente a quella massima agente sul provino.

La durata dello step, che è stata valutata precedentemente, è quindi pari a:

$$t_{step} = 52442 \text{ secondi}$$

Per quanto riguarda la definizione dei vincoli e del carico applicato si proceda esattamente con le stesse modalità applicate al caso dell'analisi statica presentata precedentemente. Si applichino quindi 3 vincoli, uno per ciascun piano di simmetria del provino, impedendone per ciascuno la traslazione lungo una sola direzione. Il carico sarà applicato di pari intensità e sulla stessa superficie dell'analisi precedente, così da avere le stesse identiche condizioni di vincolo/carico per entrambe le analisi.

Analisi VISCO

Una volta che è stato impostato lo step si può procedere all'esecuzione dell'analisi creando un opportuno JOB tra i risultati. In questo caso si noti innanzitutto che la durata dell'analisi viscoelastica è di gran lunga maggiore rispetto a quella statica. Infatti nel caso dell'analisi STATIC,GENERIC si ha avuto una durata totale di elaborazione della CPU pari a 2.8 secondi; per quanto riguarda l'analisi VISCO invece si ha avuto una durata complessiva di 16.8 secondi. Il risparmio di tempo è dell'83.3%, che per analisi molto più complesse può portare ad un notevole risparmio di tempo.

Ad ogni modo i risultati che si ottengono in termini di tensione sono molto simili, mentre per quanto riguarda la deformazione si riscontrano allungamenti molto maggiori, com'è giusto aspettarsi. Si riportino nella seguente tabella innanzitutto le tensioni in corrispondenza delle tre diverse sezioni (A, B e C).

SEZIONE A		SEZIONE B		SEZIONE C	
NODO	TENSIONE [MPa]	NODO	TENSIONE [MPa]	NODO	TENSIONE [MPa]
4	2.25	141	4.55	18	20.35
12676	2.25	760	4.56	210	10.92
268	2.26	2759	4.57	207	8.20
12727	2.30	4761	4.57	205	7.33
265	2.34	5838	4.56	203	6.80
12806	2.37	5809	4.56	200	6.36
MEDIA	2.295	MEDIA	4.562	MEDIA	9.993

Tabella 5 - Valori delle tensioni individuate in corrispondenza delle sezioni A, B e C tramite l'analisi viscoelastica

Anche in questo caso è possibile determinare il coefficiente di intaglio come rapporto tra la tensione massima presente nella sezione minima e la tensione nominale teorica in corrispondenza sempre della sezione minima.

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = 2.261$$

Determinazione del tempo rottura a creep

Si proceda ora a determinare una nuovo tempo di rottura a creep, in quanto questa analisi porta ad un valore di tensione massima in corrispondenza dell'intaglio, che è leggermente superiore a quella dell'analisi statica.

Per fare questo si ricorra nuovamente al criterio di Reiner-Weissenberger: si prenda il valore della tensione massima e si inserisca nell'equazione del modello che ci fornisce il seguente tempo di rottura a creep.

Tempo di rottura a creep	29634 secondi
---------------------------------	----------------------

Si noti immediatamente che il tempo di rottura a creep in questo caso si è quasi dimezzato, di conseguenza si può constatare che in seguito ad una piccola variazione di tensione (circa 0.75 MPa), si hanno grandi differenze di tempi di rottura a creep.

ANALISI COMPARATIVA STATIC - VISCO

A questo punto si deve fare un confronto tra le due tipologie di analisi utilizzate. Lo scopo è quello di determinare un coefficiente correttivo che permetta di eseguire delle analisi statiche e di fornire delle risposte veritiere per quanto riguarda la resistenza a rottura a creep del materiale, senza la necessità di effettuare delle lunghe e difficili analisi visco.

Innanzitutto si noti che l'analisi statica fornisce dei valori di tensione leggermente inferiori rispetto al caso dell'analisi visco. Questo è dovuto principalmente al fatto che nel caso della seconda analisi si ha una deformazione sostanzialmente maggiore: in questo modo si ha una riduzione di sezione maggiore (a causa della contrazione laterale), che porta ad un innalzamento della tensione sia di picco che

media, soprattutto in corrispondenza della sezione minima. Dato che il materiale è stato caratterizzato come viscoelastico, esso prevede la possibilità di analizzare condizioni di large-strain, cioè di grandi deformazioni: in questo caso la matrice di rigidezza tiene conto della deformazione degli elementi della mesh.

A causa di deformazioni maggiori si ha un tempo di rottura a creep minore rispetto a quanto si potrebbe ricavare da una semplice analisi statica. In particolare è possibile valutare un coefficiente correttivo per questo materiale e questo caso specifico che mi permetta di ottenere il tempo di rottura a creep. Considerando la grande differenza di tempo di rottura ricavato per un'analisi piuttosto che l'altra, si suggerisce di definire due coefficienti correttivi, uno relativo alla tensione applicata, mentre il secondo relativo al tempo a rottura.

Il coefficiente correttivo relativo alla tensione si ottiene con il rapporto tra la tensione massima rilevata con l'analisi visco e quella rilevata con l'analisi static:

$$K_{\sigma \text{ creep rupture}} = \frac{\sigma_{\max \text{ visco}}}{\sigma_{\max \text{ static}}}$$

Mentre il coefficiente correttivo proposto relativo al tempo si ottiene con il rapporto tra il tempo di rottura a creep stimato con l'analisi visco e quello stimato con l'analisi static:

$$K_{t \text{ creep rupture}} = \frac{t_{\text{rupture visco}}}{t_{\text{rupture static}}}$$

I valori calcolati vengono riportati di seguito:

$$K_{\sigma \text{ creep rupture}} = 1.038795$$

$$K_{t \text{ creep rupture}} = 0.565081$$

Grazie ai coefficienti correttivi calcolati è dunque possibile determinare il tempo effettivo di rottura a creep.

Si osservi nuovamente che una piccola differenza di tensione tra un'analisi e l'altra porta ad un'enorme differenza di tempo di rottura a creep. Infatti, osservando la tabella (6) si noti che un aumento del 3% del valore di tensione massima porta ad una riduzione del tempo di rottura a creep del 40.1%.

Dato che per piccole variazioni di tensione ottengo risultati di tempo a rottura molto diversi è necessario verificare che i risultati forniti dal software FEM siano corretti. Per fare ciò si deve dimostrare che la sommatoria delle reazioni vincolari dei nodi posti in corrispondenza della superficie della sezione minima, che è quella vincolata nella direzione di applicazione del carico, fornisca un valore pari e opposto al valore di carico impostato (cioè -90N). Per fare questo sono stati selezionati tutti i punti della mesh presenti sulla superficie presa in considerazione e sono stati scritti i risultati delle reazioni vincolari in un file Excel appositamente creato da ABAQUS in cui è riportato anche il valore della sommatoria delle reazioni vincolari di tutti i punti selezionati.

Il valore della sommatoria è pari esattamente a 90N dimostrando che i risultati forniti dal software FEM sono corretti.

Per fornire valori ancora più corretti e per verificare che il tempo di rottura a creep abbia un certo valore di convergenza, si eseguano altre analisi visco, senza variare nessun parametro a parte il tempo

di durata dell'analisi. Si compia quindi un procedimento iterativo che consiste nell'eseguire n analisi visco consecutive, fornendo per ogni analisi i-esima il tempo di rottura a creep calcolato conoscendo la tensione massima rilevata con l'analisi (i-1)-esima. Si prosegue in questo modo finché la differenza tra i valori di rottura a creep di un'analisi e quella successiva può ritenersi trascurabile.

Anche in questo caso sono state eseguite delle analisi visco in sequenza per valutare di convergenza del tempo di rottura a creep. Si riportino nella seguente tabella i risultati così ottenuti.

ANALISI	TENSIONE [MPa]	TEMPO CREEP A ROTTURA [s]
Static	19.59	52442
Visco 1	20.35	29634
Visco 2	20.30	30797
Visco 3	20.30	18433

Tabella 6 - andamento della tensione e del tempo di rottura a creep per le diverse analisi

In questo caso dopo la 3 iterazione dell'analisi visco si è giunti a convergenza. Ad ogni modo la differenza tra la prima analisi visco e l'ultima è molto piccola rispetto alla differenza tra quella statica e la prima visco. Inoltre, dato che il tempo di rottura a creep cala tra l'analisi statica e quella visco è corretto aspettarsi che per analisi visco successive la tensione cali e sia più vicina a quella dell'analisi statica, dato che il carico rimane costante e la sezione non si restringe meno per tempi di analisi visco inferiori.

Ad ogni modo si può ricalcolare entrambi i coefficienti correttivi sulla base dei dati presentati alla quarta iterazione. Inoltre di seguito, oltre ai valori corretti, se ne inseriscano altri che corrispondano a dei valori dei coefficienti correttivi scelti: questi dovranno essere leggermente maggiori (o minori) affinché si abbiano dei valori in vantaggio di sicurezza.

$$K_{\sigma \text{ creep rupture}} = 1.0388$$

$$K_{\sigma \text{ creep rupture}}^* = 1.04$$

$$K_{t \text{ creep rupture}} = 0.565$$

$$K_{t \text{ creep rupture}}^* = 0.5$$

Si osservi che i coefficienti correttivi suggeriti per lavorare in favore di sicurezza sono quelli asteriscati.

Si facciano ora alcune osservazioni importanti. Il risultato ottenuto non è corretto per ogni livello di carico a cui è sottoposto il provino. Infatti al diminuire della tensione rilevata nel caso dell'analisi statica aumenterà il tempo di rottura a creep. Il modello fornito nella caratterizzazione viscoelastica del materiale prevede di inserire un valore del modulo di creep normalizzato a tempo infinito. Questo però porta ad avere un comportamento non lineare del materiale, per cui la differenza tra la tensione massima nel caso di analisi visco e la tensione massima nel caso di analisi statica tenderà a ridursi con il diminuire del carico applicato e quindi con l'aumentare del tempo di rottura a creep. Di conseguenza i coefficienti di rottura a creep determinati sono decisamente in vantaggio di sicurezza. Questo significa che è possibile dare una stima preliminare abbastanza corretta di resistenza a creep a rottura nel caso in cui il carico applicato generi nel componente delle tensioni relativamente alte (superiori al 70%)

della tensione di snervamento del materiale. Se il carico è inferiore a questo valore, si è ancora in vantaggio di sicurezza ma si rischia di esserlo troppo, sovradimensionando la struttura per resistere alla rottura per creep.

Infine è doveroso riportare che i risultati ottenuti sono validi per questa specifica geometria del provino e dell'intaglio. Sarebbe interessante eseguire altre analisi mantenendo la geometria del provino uguale, modificando solamente la forma e le dimensioni dell'intaglio: in questo modo si potrebbe valutare l'influenza della forma dell'intaglio sul valore del coefficiente correttivo di rottura a creep.

CONCLUSIONI

L'obiettivo del lavoro di tesi era quello di analizzare il comportamento a creep del blend polibutilentereftalato e policarbonato, occupandosi in particolare, in base alle risorse disponibili, del creep a rottura. La tesi è stata svolta in collaborazione con l'ing. Marco Salvador dell'azienda STEP ENGINEERING s.n.c. avente sede ad Asolo (TV).

I CRITERI DI CREEP A ROTTURA

Inizialmente si è compiuta una ricerca bibliografica che ha permesso di individuare le caratteristiche del materiale, il comportamento a creep e il creep a rottura. In particolare è stato possibile trovare i criteri di creep a rottura più significativi.

I modelli che sono stati trovati si suddividono in diverse categorie in base al concetto di base da cui essi si sono sviluppati. In particolare i criteri di Reiner-Weissenberger (anche il nuovo), della tensione massima e della deformazione massima si basano sull'energia libera: il materiale prima di essere deformato ha una certa quantità di energia libera. Dopo deformazione la componente elastica tende ad essere recuperata, mentre la componente plastica viene dissipata e ricade parte di energia libera a disposizione per il materiale. Quando la deformazione è eccessiva o si accumula una deformazione plastica eccessiva (che supera il limite di energia libera) allora si arriverà alla rottura del materiale.

Il criterio di Crochet si basa sul concetto di snervamento dipendente dal tempo; è stato individuato un modello detto di danneggiamento continuo, secondo il quale durante il creep si ha un danneggiamento del materiale progressivo e continuo nel tempo. Infine si è preso in considerazione il criterio che si basa sul meccanismo di frattura esteso ai materiali viscoelastici.

Inoltre con la ricerca bibliografica è stato possibile individuare le normative utilizzate per eseguire test sui materiali polimerici. In particolare sono state consultate le norme ISO 527 per i test di trazione e ISO 899 inerenti i test a creep.

TEST DI TRAZIONE

L'azienda STEP ENGINEERING ha messo a disposizione diverse risorse per eseguire i test sul materiale. Innanzitutto era disponibile una serie di 10 selle da bicicletta da cui poter ricavare provini per eseguire i test di trazione; inoltre era disponibile anche un sacco da 25kg del blend PBT/PC con cui poter stampare i provini per eseguire altri test di trazione. L'obiettivo di questa prima fase di test era quello di determinare il valore della tensione di snervamento del materiale in particolare e gli altri valori significativi come la tensione di rottura e gli allungamenti a snervamento e rottura. Purtroppo non si disponeva di un estensometro, per cui non è stato possibile determinare correttamente il modulo elastico del materiale. Infatti i valori ottenuti sono stati in entrambi i casi inferiori rispetto a quelli suggeriti nella scheda tecnica del materiale. Alla fine dei test di trazione compiuti, sia sui provini ricavati dalle selle sia su quelli ottenuti da stampaggio, si è deciso di optare per i provini ricavati dallo stampaggio, in quanto hanno rivelato una maggiore ripetibilità al comportamento allo snervamento. Purtroppo però, probabilmente a causa di un problema durante la fase di stampaggio dei provini,

questi ultimi presentavano una cavità all'interno del tratto utile: in questo modo tutti i provini si sono rotti in corrispondenza della cavità (quasi sempre presente) compromettendo il comportamento a rottura.

CREEP A ROTTURA - TEST

Dopo aver individuato la tensione di snervamento è stato possibile procedere con i test di creep a rottura. È stato deciso di cominciare i test con valori molto elevati di tensione (vicino allo snervamento) in modo tale da ottenere un tempo di rottura molto breve; successivamente si è abbassato il carico fino a raggiungere durate di test di massimo 10 ore, in quanto questo era il tempo massimo di operatività della macchina UTM per ragioni di sicurezza. Alla fine sono stati individuati 8 livelli di carico significativi. Per ciascuno di essi sono stati fatti 3 test per avere dei valori mediati per ogni livello di tensione. In realtà, a causa della presenza della cavità, i valori di tensione non sono mai risultati uguali. Di conseguenza è stato necessario suddividere i test di creep a rottura in classi di appartenenza in base alla tensione effettiva di creep, cioè la tensione calcolata sulla sezione al netto della cavità. Per determinare l'area della cavità è stato utilizzato un microscopio ottico e un software ad esso collegato che ha permesso di analizzare l'immagine dell'ingrandimento e di determinare l'area della cavità appunto.

Tutti i test di trazione e di rottura a creep sono stati eseguiti usufruendo di una UTM (universal testing machine) progettata e realizzata dagli ingegneri dello studio STEP ENGINEERING.

CREEP TEST - ANALISI DATI

Una volta ultimata la parte relativa ai test è stata eseguita l'analisi dei dati: sono stati organizzati i vari test in ordine crescente di tensione. I valori significativi di ogni test e utili per identificare il criterio che meglio interpola i dati sperimentali sono: la tensione di creep e il tempo di rottura a creep. Diagrammando le curve di creep (tempo - deformazione) è stato possibile osservare che per tensioni molto vicine (differenze inferiori a 0.5MPa) la pendenza della curva di creep e i tempi di rottura differiscono molto, e talvolta le differenze arrivano al 100% circa. Per questo motivo è stato scelto di considerare solamente le curve aventi la pendenza media per ogni classe di appartenenza, scartando le altre.

Anche in questo caso è stato evidenziato il problema più importate incontrato durante lo svolgimento della tesi: la presenza della cavità all'interno della sezione utile del provino. Innanzitutto si è cercato di dare una spiegazione della presenza della cavità. Molto probabilmente la cavità si è generata durante la fase di stampaggio dei provini a causa di un settaggio non preciso e adeguato dei parametri del processo produttivo. Infatti in letteratura è riportato il problema dello stampaggio del policarbonato: se le temperature di stampaggio non sono corrette entro una certa tolleranza, c'è il pericolo che si generino dei vuoti all'interno del componente in seguito al ritiro del materiale in fase di raffreddamento dopo l'iniezione. Inoltre se la temperature di stampaggio non è adeguata si può avere un infragilimento del materiale o comunque dette caratteristiche meccaniche inferiori alle attese. Questi sono stati proprio i problemi che si sono riscontrati: infatti oltre alla presenza della cavità all'interno del provino, si hanno valori di tensione di rottura inferiori a quelli attesi dalla scheda tecnica. Nonostante questa diversità si è deciso comunque di procedere con i test utilizzando i provini

stampati in quanto erano disponibili in grandi quantità e soprattutto in quanto la geometria era molto più regolare rispetto a quelli ritagliati, i quali mostravano una certa discontinuità nei profili dovuta al processo di taglio con seghetto. Per dimostrare la maggiore ripetibilità di risultati è stata eseguita una breve analisi statistiche in cui si è calcolata la varianza: i test con i provini hanno mostrato una minore varianza, quindi un comportamento più regolare rispetto ai test eseguiti su quelli ritagliati dalle selle.

CRITERIO DI ROTTURA A CREEP - BEST FIT

Dopo i test e l'analisi dei dati, che ha permesso di individuare quelli più significativi per il creep a rottura, si è passati alla determinazione del criterio di creep a rottura che meglio interpola i dati sperimentali. Per fare ciò sono stati determinati i coefficienti di ciascun modello attraverso un'analisi incrociata tra Excel e il software MATHCAD. Con Excel si è ottenuta una stima preliminare dei parametri del modello preso in considerazione, in modo tale che la curva del criterio interpolasse visivamente la nuvola di dati sperimentali. Questo è stato fatto per facilitare la convergenza dei parametri del modello in MATHCAD. In seguito è stato fatto un best fit tramite la funzione genfit presente in MATHCAD, inserendo come valori del vettore di tentativo quelli ottenuti in Excel. In questo modo si ottengono i valori dei parametri tali da soddisfare appieno il best fitting dei dati. Dopo avere eseguito il best fitting con tutti i criteri si è individuato il modello che meglio interpolava la nuvola di dati: per fare questo è stata calcolata la somma degli errori, cioè le differenze tra il valore di tempo a rottura calcolato tramite l'equazione del modello per una certa tensione e il tempo a rottura che si ha a disposizione tra i dati sperimentali per il medesimo livello di tensione. Bisogna però considerare che questo criterio interpola al meglio i dati ottenuti sperimentalmente, cioè per livelli di carico elevati (dal 70% della tensione di snervamento in su) e quindi per tempi di rottura brevi (intorno alle 6/7 ore massimo). Per avere la conferma che questo sia il modello che meglio rappresenta questo materiale, sarebbe stato necessario eseguire test di lunghezza superiore (dalle 48 ore in poi) oppure a temperature più elevate, così da ottenere dati sperimentali anche per tempi più lunghi e verificare il best fitting su altri tratti della curva del criterio.

Dopo avere eseguito quest'analisi di best fit è stato possibile individuare il modello di Reiner Weissenberger classico come quello che meglio interpola i dati sperimentali. Per questo motivo si può dire che questo criterio corrisponde a quello che meglio descrive il comportamento a creep a rottura del blend polibutilentereftalato/policarbonato, preso in considerazione per questo lavoro di tesi, per livelli di tensione superiori a 20 MPa.

ANALISI - ROTTURA A CREEP MEDIANTE FEM

Infine si è cercato di trovare una metodologia che aiuti a verificare un componente realizzato con il blend PBT/PC a rottura per creep usufruendo di un software ad elementi finiti, in particolare ABAQUS. L'ambiente industriale richiede delle analisi il più possibile rapide e che forniscano dei risultati il più possibile precisi. In questo lavoro di tesi è stato presentato un metodo per ottenere una stima preliminare del tempo a rottura per creep sfruttando semplicemente un'analisi statica. Per fare questo si è deciso di cercare di determinare un coefficiente correttivo di rottura a creep: si eseguono due analisi consecutive, entrambe su un provino caratterizzato dalla presenza di un intaglio lungo il tratto utile, così da indurre una variazione di tensione all'interno del materiale. La prima, statica, mi fornisce il valore di tensione massima che corrisponde al primo punto in cui si potrà avere il cedimento per

creep. Grazie al valore della tensione così ricavato è possibile ottenere, usufruendo dell'equazione del criterio di R-W, il tempo a rottura relativo a questo livello di carico. Successivamente si esegua un'analisi viscoelastica che abbia le stesse caratteristiche di quella statica a differenza del fatto che il materiale e la tipologia di step sono cambiati. La geometria del provino preso in considerazione, la mesh, i carichi e i vincoli sono gli stessi. Per questa seconda analisi, essendo viscoelastica, è stato necessario impostare un tempo di durata: esso corrisponde al tempo di rottura a creep valutato precedentemente. Questo è stato fatto per calcolare la differenza di tensione massima (e quindi di tempo a rottura) rispetto a quella ottenuta con l'analisi statica. Successivamente sono state compiute 3 iterazioni della stessa analisi viscoelastica cambiando di volta in volta il valore della durata, fino a giungere alla convergenza del valore di tensione. Alla fine quindi sono stati ottenuti due valori della tensione massima e due valori ad essi legati del tempo a rottura a creep, uno per ogni tipologia di analisi. Da questi dati sono stati generati due coefficienti correttivi:

- Il coefficiente correttivo della tensione di rottura a creep, che consiste in un rapporto tra la tensione massima ottenuta con l'analisi statica e la tensione massima ottenuta con l'analisi viscoelastica.
- Il coefficiente correttivo del tempo di rottura a creep, che consiste nel rapporto tra il tempo di rottura ottenuto con l'analisi statica e quello ottenuto con l'analisi viscoelastica.

Si è notato che piccole variazioni di tensione comportano enormi differenze di tempi di rottura. In generale all'aumentare della tensione massima si ha una riduzione del tempo di rottura a creep.

Una volta ottenuti i coefficienti correttivi in teoria è possibile eseguire una semplice analisi statica e moltiplicare la tensione massima ottenuta sul pezzo (o il tempo di rottura ad essa relativa) per l'opportuno coefficiente correttivo e ottenere un valore più vicino alla realtà della resistenza a creep a rottura del componente in materiale polibutilenetereftalato/policarbonato. Si è notato che al diminuire del carico il divario tra la tensione massima ottenuta con l'analisi statica e quella ottenuta con l'analisi viscoelastica tende a diminuire. Utilizzando i valori dei coefficienti ottenuti in questo lavoro di tesi si lavora quindi in sicurezza; ma per un carico eccessivamente basso (sotto il 70% della tensione di snervamento) si rischia di lavorare eccessivamente in sicurezza, sovrastimando troppo il tempo di rottura a creep. Inoltre non è stato verificato se al variare della geometria dell'intaglio si abbiano delle variazioni dei coefficienti. Di conseguenza sono stati determinati dei coefficienti correttivi per la rottura a creep validi per le geometrie considerate e per carichi superiori al 70% della tensione di snervamento e per il blend polibutilenetereftalato/policarbonato.

BIBLIOGRAFIA

- "Time-dependent failure criteria for polymer matrix composites: a review", Rui Miranda Guedes
- "Mathematical Analysis of Energies for Viscoelastic Materials and Energy Based Failure Criteria for Creep Loading", R. M. Guedes
- "Relationship between lifetime under creep and constant stress rate for polymer-matrix composites", R. M. Guedes, *composites Science and Technology* 69 (2009) 1200–1205
- "Lifetime predictions of polymer matrix composites under constant or monotonic load", R.M. Guedes, *Composites: Part A* 37 (2006) 703–715
- "Durability of polymer matrix composites: Viscoelastic effect on static and fatigue loading", R. M. Guedes, *Composites Science and Technology* 67 (2007) 2574–2583
- "Creep failure time prediction of polymers and polymer composites", G. Spathis, E. Kontou, *Composites Science and Technology* 72 (2012) 959–964
- "Failure-Mechanism Models for Creep and Creep Rupture", Junhui Li Abhijit Dasgupta, *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY*, VOL. 42, NO. 3, 1993 SEPTEMBER
- "Analysis of a delayed fracture criterion for lifetime prediction of viscoelastic polymer materials", R.M. Guedes, *Mech Time-Depend Mater* (2012) 16:307–316
- "Long-term creep assessment of Viscoelastic polymerby Time-temperature-stress superposition", Wenbo Luo Chuhong Wang Xiaoling Hu Tingqing Yang, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 25, No. 6, December, 2012
- "Appunti di costruzione di macchine", B. Atzori, Cortina, 2001
- Appunti delle lezioni del corso "Progetto del prodotto in materiale polimerico", M. Ricotta.
- NORMA ISO 527-1; ISO 527-2
- NORMA ISO 899-1
- NORMA ASTM D 2990-09

RINGRAZIAMENTI

Dopo tutti questi anni di studio (ben 20), passando negli anni da una scuola all'altra ho avuto l'opportunità di conoscere molte persone che hanno, chi più chi meno, influenzato la mia vita. Le persone da ringraziare sono quindi innumerevoli. Non riuscirò di sicuro a ringraziare e ricordarmi di tutti, per questo innanzitutto rivolgo un GRAZIE generale a tutti coloro che hanno condiviso o incrociato il mio percorso: per ognuno di voi ho un motivo unico per ringraziarvi.

Un ringraziamento sentito al professore Ricotta, per l'attenzione, la professionalità e la gentilezza con cui mi ha seguito durante il lavoro di tesi. E un ringraziamento doveroso all'ing. Marco Salvador per la collaborazione e per avermi permesso di utilizzare le risorse messe a disposizione da Step Engineering.

Grazie a tutti gli amici che ho conosciuto e che per un periodo più o meno lungo mi hanno accompagnato in questi anni. Il cugino Nick, per le estati dai nonni. Vise per tanti motivi (estati a San Gaetano, Palace e giochi da tavolo). Zuber per le elementari, le medie e la scuola della "strada" dove con Vise e Pava siamo diventati dei b-boy. Chicca per aver condiviso molte esperienze dell'infanzia (scuola, faticoso sci, vacanze e vari) e non solo. Menez per la compagnia in molti anni di scuola e per avermi sfamato con i suoi cracker. Filip, Alice e tutti i compagni delle elementari che ho poi incontrato.

I BITRAGICI+B (parafrasando, B3GC): Baldo, il sottoscritto, Gerla, Grollo e Codemo; per le innumerevoli avventure vissute, anche a bordo dei nostri potenti mezzi, e per aver reso più divertenti le giornate al liceo. Baldo per la meditazione, Gerla per il mare, Grollo per la montagna e Claudio per la saggezza. Claudio&Vale per le serate divertenti, per Merano e per la grande amicizia. Un grazie grande e particolare a Silvia, per avermi supportato e aiutato nei momenti impegnativi e per aver condiviso per molto tempo quelli più belli (vacanze, patenti, maturità, laurea e feste varie).

Tutti gli amici del Viet Vo Dao. Il maestro Denis per le conoscenze trasmesse e la precisione della tecnica. Rachele, Simo e Giulia per il sorriso in palestra e la festa fuori. Paolo per l'impegno, per il pane alla zucca, per lo shopping e per le serate divertenti. Michael, Schiavi, Naccio, Sara, Vale, per la fatica spesa insieme negli anni e per le uscite del sabato sera (per questo devo aggiungere anche Ori, Batti e il Red). Un ringraziamento speciale per Michela, mia compagna di Viet Vo Dao, che nell'ultimo periodo mi è stata molto vicina aiutandomi a superare le ultime difficoltà dell'università. Tra una snowboardata e un giro in montagna (in compagnia di Fabio e Valentina.. grazie!), tra un film divertente e una serata comica e festaiola (Grazie Giusy), tra una forma e un suon lyen, tra un trasloco e una cena vegetariana, abbiamo condiviso un sacco di momenti divertenti e ha sempre saputo darmi la giusta carica: grazie.

Un grazie ai polimerai di Rovigo. In particolare a Mario per il matrimonio siculo: un'esperienza indimenticabile insieme a Fede e Ruggero. E appunto un super grazie a Ruggero, grande compagno e amico all'università e di avventure.

Ringrazio i nonni Teresina e Primo per avermi fatto passare delle splendide estati a San Gaetano. La nonna Maria per avermi fatto scoprire le bellezze di Bibione. Tutte le zie, gli zii, cugini e cugine per avermi regalato innumerevoli momenti speciali.

Ringrazio mia sorella Beatrice per avermi fatto compagnia mentre crescevo e per avermi fatto divertire nelle serate a casa. Infine, dulcis in fundo, un grazie enorme ai miei genitori Enrico e Elena: hanno sempre

creduto nelle mie scelte e mi hanno sempre lasciato la massima libertà (o almeno così mi hanno fatto credere) di prendere la mia strada. È solo grazie a loro, alla loro pazienza e al loro sostegno che sono riuscito a raggiungere questo importante traguardo. Li ringrazio, sapendo che non riuscirò mai a ripagare ciò che loro hanno fatto per me. GRAZIE.