

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Aerospaziale**

Tesi di Laurea Magistrale

Titolo della Tesi



Relatore/i

Ing. Carlo Giovanni Ferro

Prof. Paolo Maggiore

Candidato

Andrea Mazza

Anno Accademico 2021-2022

Un esperto è una persona che evitando tutti i piccoli errori punta dritto alla catastrofe.

(Arthur Bloch, La legge di Murphy, Definizione di Weinberg)

Sommario

La progettazione degli aeromobili sta attraversando in questi anni una nuova era di innovazione e sviluppo. Grazie alla potenza dei calcolatori e alle nuove tecnologie di realizzazione la ricerca aerospaziale è quanto mai attiva e trainante. Lo scopo originale di aumentare le performance dei velivoli e ridurre il peso dei componenti oggi è mutato radicalmente. Il goal finale è ora non solo orientato alla performance ma anche alla sostenibilità del processo produttivo e del prodotto aeromobile in sé. L'industria aerospaziale, come quella automotive e quella meccanica, sta evolvendo verso soluzioni più green e a implementata autonomia decisionale che guidino l'aerospazio verso una nuova era. Lo scopo di questa tesi è inserito nella core research del Team Astra di cui faccio parte da 3 anni come studente e borsista. Lo sviluppo di un nuovo metodo di progettazione che sia volto alla integrazione delle strutture nei sistemi dell'aeromobile inserendo elementi tecnologici di sensorizzazione attiva e anche utilizzando tecnologie avanzate per la realizzazione manifatturiera. In questo solco questa tesi si occuperà della metodologia di progettazione di un pannello sandwich a duplice finalità: strutturale e sistemistica (scambiatore di calore tra aria calda interna e esterno). Il pannello è realizzato in un singolo componente mediante Additive Manufacturing (AM) senza bisogno di saldature e incollaggi tra core e skin. Basandoci sulle prove sperimentali effettuate su test article andremo a sviluppare una metodologia sintetica di progettazione per il core trabecolare basata su modelli Reologici.

Nei primi due capitoli della tesi si andrà a trattare il pannello anti-ghiaccio, le tecnologie già esistenti ed il motivo per cui è un sistema necessario al velivolo. Viene introdotto il pannello antighiaccio integrato e contestualizzato all'interno del progetto di ricerca.

Nel capitolo tre viene trattata la reologia, un'introduzione e vengono esposti modelli semplici basati su elementi meccanici: Molla, Smorzatore e Massa. Vengono successivamente introdotti dei modelli più articolati come quelli di Prandtl, Kelvin e Maxwell formati da combinazione di due elementi semplici. Infine viene trattata la matematica dietro al modello Kelvin-Voigt che successivamente sarà utilizzata per la correlazione. Un breve descrizione di modelli complessi viene fornita e successivamente ripresa per sviluppi futuri.

Nel capitolo 4 sono descritte le prove sperimentali: materiali e metodi. L'impostazione delle prove a partire dal DOE per leghe di alluminio e titanio. La geometria dei provini e le rispettive caratteristiche; macchine utilizzate per il test e acquisizione dati. Inoltre sono fornite le curve di compressione per tutti i provini analizzati ed una descrizione dei fenomeni di rottura.

Nel capitolo 5 si approfondisce il modello realizzato in Simulink, descritte le tipologie di prova e le variabili e parametri in gioco. Viene discussa l'impostazione del tool di "Parameter Estimation" ed esposte le performance raggiunte dal modello. Vengono esposti e discussi le variabili principali di interesse.

Nell'ultimo capitolo sono esposte le conclusioni e gli sviluppi futuri del lavoro di questa tesi,

Ringraziamenti

Indice

1	Introduzione	1
2	Pannello Antighiaccio Multifunzione	2
2.1	Formazione ghiaccio.....	2
2.2	Sistemi antighiaccio.....	3
2.2.1	Antighiaccio termoelettrico	3
2.2.2	Antighiaccio termo-pneumatico	4
2.2.3	Antighiaccio pneumatico.....	5
2.2.4	Antighiaccio chimico	Errore. Il segnalibro non è definito.
2.2.5	Sistemi antighiaccio sperimentali.....	6
2.3	Brevetto Polito	7
2.4	Additive Manufacturing	8
2.5	Strutture Cellulari.....	10
3	Reologia e Modelli Sintetici.....	13
3.1	Descrizione	13
3.2	Literature Review	13
3.3	Modelli utilizzati e confronto analitico	18
3.4	Case Study e Applicazione al pannello multifunzione.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.4.1	Scelta del modello e discussione.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
4	Prove Meccaniche sperimentali.....	26
4.1	Prove di compressione	26
4.1.1	Rombic.....	27
4.1.2	BCCZ	35
5	Risultati Confronto	41
5.1	Risultati e confronto numerico-sperimentale.....	46
5.1.1	Rombic.....	46
5.1.2	BCCZ	52
5.1.3	BCCZ Non lineare.....	58
5.2	Confronto coefficienti	63
5.2.1	K.....	63
5.2.2	C.....	64
5.2.3	R.....	65
6	Conclusione e Sviluppi Futuri	67
7	Bibliografia	73

Lista delle figure

Figure 1: trusses structures: a) cold plate for iss [1]	1
Figure 2 micro-thruster reactor[3]	1
Figure 3 Tipi di Nubi	2
Figure 4 Anti- ghiaccio termoelettrico	4
Figure 5 Antighiaccio termopneumatico.....	4
Figure 6 P180 Impianto Antighiaccio [11]	5
Figure 7 Impianto antighiaccio pneumatico.....	6
Figure 8 Antighiaccio chimico	6
Figure 9 Antighiaccio EIDI e SPEED.....	7
Figure 10 Viste isometriche e in sezione del pannello multifunzione	8
Figure 11 Schema della deposizione a letto di polveri mediante tecnologia SLM (Source VDI 3404)....	9
Figure 12 Celle stocastiche	10
Figure 13 Celle deterministiche	10
Figure 14 BCCZ cell (a), AUXETIC cell (b), OCTETLAT cell (c), RHOMBIC DODECAHEDRON cell (d), SCHWARTZ cell (e).....	12
Figure 15 Solido elastico ideale (Molla) come visualizzata in Simulink.....	13
Figure 16 Sostanza viscosa ideale (Smorzatore) come visualizzata in Simulink	14
Figure 17 Solido perfettamente plastico (sliding weight) come visualizzato in Simulink	14
Figure 18 Modello Kelvin-Voigt come visualizzato in Simulink	14
Figure 19 Modello Maxwell come visualizzato in Simulink.....	15
Figure 20 Modello Prandtl come visualizzato in Simulink.....	15
Figure 21 A sinistra modello Schema del modello Prandtl modificato, a destra curva Sigma-Epsilon..	16
Figure 22 Modello Prandtl modificato	17
Figure 23 Modello Kelvin-Voigt.....	18
Figure 24 Grafico di risposta del modello di Kelvin-Voigt.....	19
Figure 25 Schema di un sistema libero smorzato ad un grado di libertà.....	19
Figure 26 Risposta di un sistema libero smorzato ad un grado di libertà.....	21
Figure 27 Risposta di un sistema libero ad un grado di libertà nei tre casi	22
Figure 28 Risposta di un sistema libero ad un grado di libertà dove è evidenziato il decremento della risposta.....	23
Figure 29 Modello Kelvin-Voigt realizzato in ambiente Simscape	23
Figure 30 Provini delle celle analizzate da Varetti	26
Figure 31 Setup del DOE, a sinistra Full Factorial, a destra Latin Hypercube	28
Figure 32 A sinistra: Zuick Roell, A Destra: Instron	29
Figure 33 Provini ROM in AlSi10Mg da 3mm, 5mm e 7mm.....	30
Figure 34 A sinistra piano di rottura innescato sul lato del provino. A destra vista del piano di rottura di 45°	30
Figure 35 Risultati compressione ROM 3-25.....	30
Figure 36 Risultati compressione ROM 3-30.....	31
Figure 37 Risultati compressione ROM 3-35	31
Figure 38 Risultati compressione ROM 5-25.....	32
Figure 39 Risultati compressione ROM 5-30.....	32
Figure 40 Risultati compressione ROM 5-35.....	33
Figure 41 Risultati compressione ROM 7-25.....	33
Figure 42 Risultati compressione ROM 7-30.....	34
Figure 43 Risultati compressione ROM 7-35.....	34
Figure 44 Provini BCCZ in AlSi10Mg con taglia di cella 3mm, 5mm e 7mm.....	35

Figure 45 Piani di rottura delle celle BCCZ con i due piani di rottura a 45° in evidenza	35
Figure 46 Risultati compressione BCCZ 3-25	36
Figure 47 Risultati compressione BCCZ 3-30	36
Figure 48 Risultati compressione BCCZ 3-35	37
Figure 49 Risultati compressione BCCZ 5-25	37
Figure 50 Risultati compressione BCCZ 5-30	38
Figure 51 Risultati compressione BCCZ 5-35	38
Figure 52 Risultati compressione BCCZ 7-25	39
Figure 53 Risultati compressione BCCZ 7-30	40
Figure 54 Risultati compressione BCCZ 7-35	40
Figure 55 Provini Rom in Ti6Al4V con taglia di cella 3mm, 5mm e 7mm.....	41
Figure 56 Risultati compressione Rom 3-25 Ti6Al4V.....	41
Figure 57 Risultati compressione Rom 5-35 Ti6Al4V.....	42
Figure 58 Risultati compressione Rom 7-30 Ti6Al4V.....	42
Figure 59 Provini BCCZ in Ti6Al4V con taglia di celle 3mm, 5mm e 7mm.....	43
Figure 60 Risultati compressione BCCZ 3-30 Ti6Al4V.....	43
Figure 61 Risultati compressione BCCZ 5-25 Ti6Al4V.....	44
Figure 62 Risultati compressione BCCZ 7-35 Ti6Al4V.....	44
Figure 63 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 3-25	46
Figure 64 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 3-30	47
Figure 65 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 3-35	47
Figure 66 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 5-25	48
Figure 67 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 5-30	48
Figure 68 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 5-35	49
Figure 69 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 7-25	49
Figure 70 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 7-30	50
Figure 71 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 7-35	50
Figure 72 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 3-25 Ti6Al4V	51
Figure 73 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 5-35 Ti6Al4V	51
Figure 74 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 7-30 Ti6Al4V	52
Figure 75 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-25	52
Figure 76 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-30	53
Figure 77 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-35	53
Figure 78 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-25	54
Figure 79 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-30	54
Figure 80 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-35	55
Figure 81 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-25	55
Figure 82 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-30	56
Figure 83 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-35	56
Figure 84 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-30 in Ti6Al4V	57
Figure 85 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-25 in Ti6Al4V	57
Figure 86 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-35 in Ti6Al4V	58
Figure 87 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-25 per grandi spostamenti.....	58
Figure 88 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-30 per grandi spostamenti.....	59
Figure 89 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-35 per grandi spostamenti.....	59
Figure 90 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-25 per grandi spostamenti.....	60
Figure 91 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-30 per grandi spostamenti.....	60
Figure 92 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-35 per grandi spostamenti.....	61
Figure 93 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-25 per grandi spostamenti.....	61

Figure 94 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-30 per grandi spostamenti	62
Figure 95 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-35 per grandi spostamenti	62
Figure 96 Grafico di superficie di K in funzione della densità e della cell size per celle BCCZ	63
Figure 97 Grafico di superficie di K in funzione della densità e della cell size per celle ROM	64
Figure 98 Grafico di superficie di C in funzione della densità e della cell size	64
Figure 99 Grafico di superficie di C in funzione della densità e della cell size	65
Figure 100 Grafico scatter dei valori di R in funzione della cell size per celle ROM	66
Figure 101 Grafico scatter dei valori di R in funzione della cell size per celle BCCZ	66
Figure 102 Grafico scatter dei valori di R in funzione della cell size per celle BCCZ in condizioni di non-linearità	67
Figure 103 Rappresentazione grafica del metodo per calcolare il modulo elastico	67
Figure 104 Correlazione tra sforzo distribuito e carico sugli elementi della cella	74

Lista delle tabelle

Table 1 Coefficienti modello Kelvin-Voigt	24
Table 2 DOE Full Factorial per AlSi10Mg per test di compressione	27
Table 3 Latin Hypercube per test addizionali su AlSi10Mg.....	27
Table 4 Valori calcolati di E per celle ROM in AlSi10Mg.....	68
Table 5 Valori calcolati di E per celle BCCZ in AlSi10Mg.....	68
Table 6 Valori calcolati di E per celle BCCZ in AlSi10Mg per valutazioni non lineari.....	69
Table 7 Valori di Errore relativo per E su celle ROM in AlSi10Mg	69
Table 8 Valori di Errore relativo per E su celle BCCZ in AlSi10Mg	69
Table 9 Valori di Errore relativo per E su celle ROM in AlSi10Mg per valutazioni non lineari	70
Table 10 Valori calcolati di E per celle ROM in Ti6Al4V.....	70
Table 11 Valori calcolati di E per celle BCCZ in Ti6Al4V.....	70
Table 12 Valori di Errore relativo per E su celle ROM in Ti6Al4V	70
Table 13 Valori di Errore relativo per E su celle BCCZ in Ti6Al4V	71

*The fool doth think he is wise, but the wise man
knows himself to be a fool.*

[WILLIAM SHAKESPEARE, As You Like It]

1 Introduzione

La progettazione degli aeromobili sta attraversando in questi anni una nuova era di innovazione e sviluppo. Grazie alla potenza dei calcolatori e alle nuove tecnologie di realizzazione la ricerca aerospaziale è quanto mai attiva e trainante. Lo scopo originale di aumentare le performance dei velivoli e ridurre il peso dei componenti oggi è mutato radicalmente. Il goal finale è ora non solo orientato alla performance ma anche alla sostenibilità del processo produttivo e del prodotto aeromobile in sé. L'industria aerospaziale, come quella automotive e quella meccanica, sta evolvendo verso soluzioni più green e a implementata autonomia decisionale che guidino l'aerospazio verso una nuova era.

Lo scopo di questa tesi è inserito nella *core research* del Team Astra di cui faccio parte da 3 anni come studente e borsista. Lo sviluppo di un nuovo metodo di progettazione che sia volto alla integrazione delle strutture nei sistemi dell'aeromobile inserendo elementi tecnologici di sensorizzazione attiva e anche utilizzando tecnologie avanzate per la realizzazione manifatturiera. In questo solco questa tesi si occuperà della metodologia di progettazione di un pannello sandwich a duplice finalità: strutturale e sistemistica (scambiatore di calore tra aria calda interna e esterno). Il pannello è realizzato in un singolo componente mediante Additive Manufacturing (AM) senza bisogno di saldature e incollaggi tra core e skin. Basandoci sulle prove sperimentali effettuate su *test article* andremo a sviluppare una metodologia sintetica di progettazione per il core trabecolare.

È già stato provato che le strutture trabecolari realizzate con questa tecnologia possono dare un vantaggio rilevante per gli scambiatori di calore installati a bordo di veicoli spaziali [1] e aeromobili [2]. Anche per la costruzione di micro-thrusters per uso spaziale sono allo studio reattori chimici che potrebbero beneficiare delle strutture trabecolari per i letti catalitici interni[3].

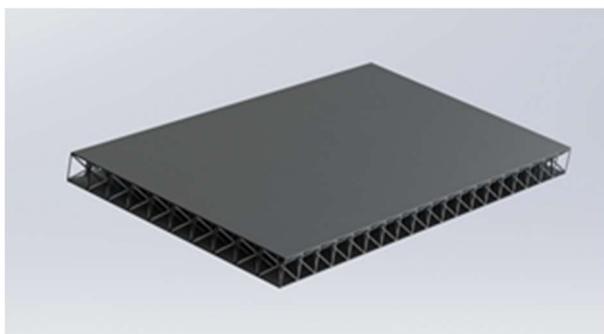


Figure 1: trusses structures: a) cold plate for iss [1]

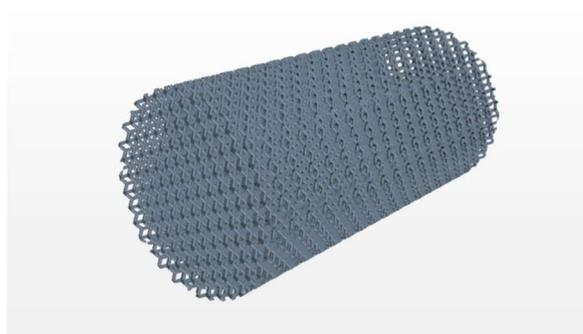


Figure 2 micro-thruster reactor[3]

2 Pannello Antighiaccio Multifunzione

In questo capitolo verrà descritto il brevetto sviluppato dal Team di ricerca ASTRA. Per rendere più chiara l'esposizione si tratterà in prima battuta del problema della formazione del ghiaccio a bordo degli aeromobili, passando poi a una descrizione generale dei vari sistemi di protezione dal ghiaccio. Infine verrà descritto l'impianto brevettato da Politecnico di Torino insieme alle strutture cellulari che lo compongono.

2.1 Formazione ghiaccio

Il ghiaccio si forma sulle superfici bagnate degli aeromobili a una temperatura compresa tra -40°C e 4°C in presenza di umidità in atmosfera[4]. A variare di temperatura e umidità sono evidenziabili diverse tipologie di ghiaccio ottenibili. A influenzare il tipo di ghiaccio formantesi è il diametro medio della goccia (water droplet) che può variare da $1\mu\text{m}$ fino a $100\mu\text{m}$. Le droplet più grandi sono causate dai cumulonembi, tipiche formazioni dei temporali mentre gocce intorno ai $50\mu\text{m}$ vengono osservate nei nubi cumuliformi (cumuli e stratocumuli). Infine, le gocce più piccole si ritrovano solitamente nelle nubi stratiformi, come i cirrostrati, non convettive e più alte.

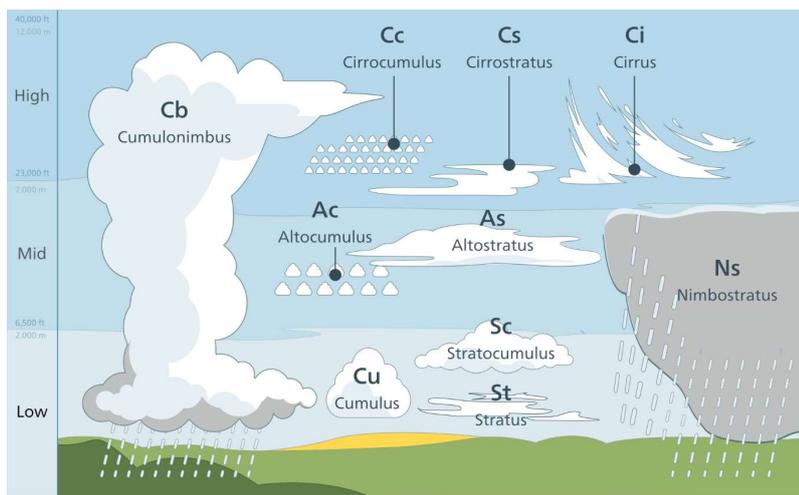


Figure 3 Tipi di Nubi

Il diametro medio della goccia dipende dalle temperature esterne. Con temperature alte (fino a 4°C) si possono evidenziare nubi con gocce di grandi dimensioni mentre riducendo la temperatura si osserva una riduzione proporzionale della goccia media. Un fenomeno a parte si riscontra per le cosiddette Super Cooled Large Droplets (SCLD) [5] che sono grandi gocce d'acqua mantenute allo stato liquido, internamente dalla tensione superficiale esterna. Esse ghiacciano istantaneamente a seguito dell'impatto con l'aeromobile. Se consideriamo come variabile il diametro della goccia (funzione come visto della temperatura) si possono evidenziare 3 diverse tipologie di ghiaccio:

- Rime ice: è il ghiaccio realizzato dall'impatto con gocce più piccole a temperature più basse (da -40°C a -15°C); questo ghiaccio è di rapida solidificazione e, crescendo, intrappola al suo interno particelle di aria che ne conferiscono il classico colore bianco. È un ghiaccio strutturalmente fragile e di facile rimozione. Tende a accumularsi verticalmente in forme piramidali piuttosto che espandersi bi-dimensionalmente;

- Mixed ice: si forma tra -15°C e -10°C . ha caratteristiche simile al precedente ma presenta una marcata tendenza alla espansione dovuta alla temperatura maggiore che ne rallenta la solidificazione.
- Clear Ice: è caratterizzato dalla creazione di un film acquoso che solidifica progressivamente. In questo modo la matrice solida è esente da particelle d'aria generando un ghiaccio più tenace alla rottura e più ampio nella copertura delle superfici. È anche noto come *ghiaccio vetrone* a causa della sua trasparenza che rende anche difficoltosa l'individuazione visiva.

Il ghiaccio formatosi può danneggiare l'aeromobile sia internamente che esternamente [6]–[8]. Internamente ricordiamo nei motori a pistoni la possibilità di avere ghiaccio nel corpo farfallato del carburatore. Esternamente invece notiamo un aumento della resistenza aerodinamica, una riduzione della portanza, l'ostruzione dei sensori dati aria e infine, più catastrofico, il bloccaggio delle superfici mobili di controllo del mezzo aereo.

2.2 Sistemi antighiaccio

Per prevenire la formazione di ghiaccio (*anti icing*) o per eliminarlo una volta formato (*de icing*) vengono correntemente installati sulle superficie esposte degli aeromobili diversi sistemi che si differenziano per la tipologia di sorgente termica e per la loro installazione. Nel presente paragrafo descriveremo in maniera critica i vari sistemi utilizzati

2.2.1 Antighiaccio termoelettrico

L'anti ghiaccio termoelettrico sfrutta l'effetto Joule per riscaldare le superficie esposte. La potenza termica irradiata è proporzionale al quadrato della corrente moltiplicata per la resistenza del mezzo.

$$W = R \cdot i^2 \quad (1)$$

A causa della richiesta di alte correnti questa tipologia di anti ghiaccio è solitamente relegata a superfici di modesta entità come ad esempio tubi di pitot, antenne e sensoristica esposta[9]. Recentemente questa filosofia di impianto sta prendendo piede anche per i bordi di attacco delle pale di elicotteri e degli impennaggi degli aeromobili seguendo la filosofia *more electric aircraft* e sfruttando l'integrazione nel laminato composito dell'*heating material*, come riportato anche in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

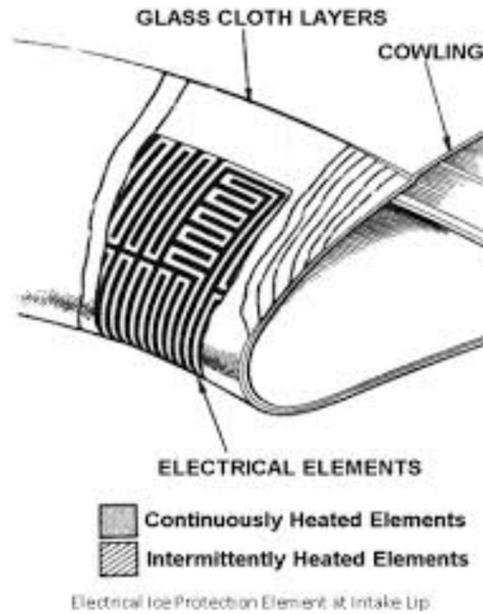


Figure 4 Anti- ghiaccio termoelettrico

Sebbene questa soluzione sia interessante come integrazione di sistemi e struttura è da riscontrare una scarsa robustezza del design soprattutto in componenti esposti a urti con altri oggetti volanti (*i.e. birdstrike*) che ne interromperebbero irreversibilmente il funzionamento.

2.2.2 Antighiaccio termo-pneumatico

Questo impianto è di gran lunga il più diffuso e utilizzato nei liner moderni. Prende aria calda spillata dai motori (p3) e la dirige mediante appositi condotti nel lato interno del bordo di attacco per riscaldarlo per convezione forzata. Uno schema dell'impianto è riportato in **Errore**. L'origine riferimento non è stata trovata.

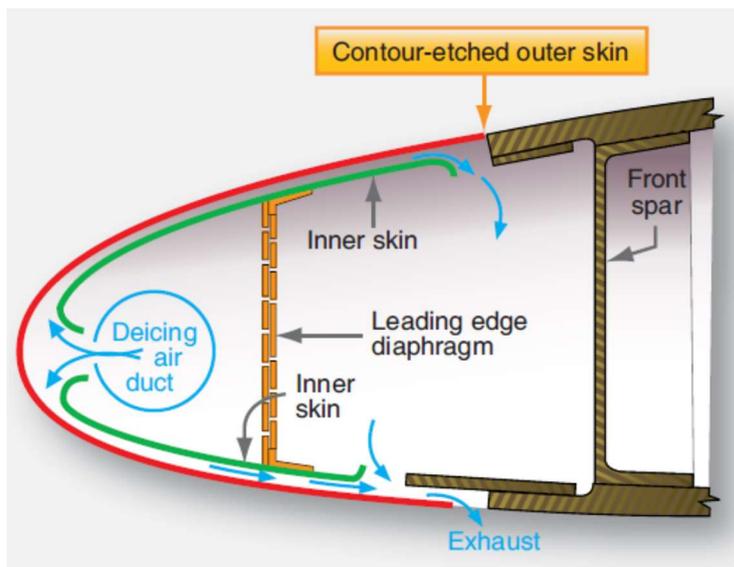


Figure 5 Antighiaccio termopneumatico

Questa tipologia di impianto si suddivide in due macrocategorie:

- Full evaporative: la temperatura della skin esterna viene mantenuta sufficientemente alta per vaporizzare le gocce che si infrangono;
- Running wet: la temperatura non vaporizza ma mantiene liquide le gocce che impattano;

nel secondo caso l'energia richiesta è minore ma vi è senza dubbio la possibilità di un fenomeno di ghiacciamento a valle della parte riscaldata in prossimità di superfici mobili o cerniere. Questo impianto è stato proposto per la prima volta da Clarence L Johnson [10] nel 1943. L'aria calda spillata dai motori viene portata in prossimità del bordo di attacco con dei sistemi di tubazioni rigide e semirigide e insuffla mediante piccolo holes direttamente sulla skin interna del bordo.

Il sistema complessivo è realizzato mediante giunzioni rivettate saldate o incollate solitamente in lega di alluminio. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è riportato un esempio per un velivolo business class executive in corrente utilizzo.

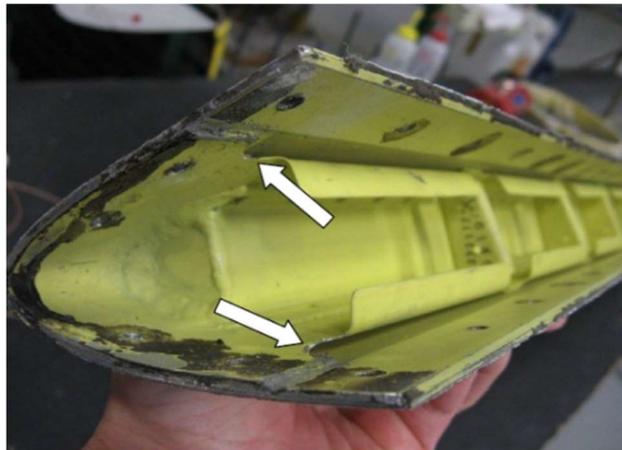


Figure 6 P180 Impianto Antighiaccio [11]

Senza dubbio questo impianto riporta alcuni punti deboli: lo spillamento di aria riduce la efficienza propulsiva sottraendo alla espansione aria pre compressa. In seconda battuta essendo questo impianto realizzato mediante giunzione di diversi componenti le dilatazioni termiche durante l'esercizio agiscono come carichi ciclici sulle giunzioni innescando problemi quali cricche, scollamenti o dissaldature.

2.2.3 Antighiaccio pneumatico

L'impianto di tipo pneumatico a sacche è storicamente il più installato nel secondo dopoguerra. Vesciche di materiale polimerico vengono incollate sopra al bordo di attacco del profilo alare e vengono gonfiate periodicamente utilizzando il sistema aria per eliminare attraverso il distacco da rottura, il ghiaccio formatosi. La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta lo schema di installazione e una sezione esplosa delle appendici incollate. Tra i vantaggi vi sono la pressoché invasività del sistema e la sua relativa semplicità di installazione e sostituzione. Al contrario negli svantaggi della tipologia di impianto annoveriamo senza dubbio il peggioramento delle performance aerodinamiche cambiando sia la rigidità che la forma del leading edge; oltre a questo si riporta anche la intrinseca progettazione di *de icing* che rimuove il ghiaccio formatosi e non ne previene la formazione. Tale filosofia ammette l'aumento del peso e della resistenza dovuta al ghiaccio aderito e prevede che i detriti siano staccati violentemente anche con il rischio di danneggiamento se impattanti con le superfici mobili posteriori.

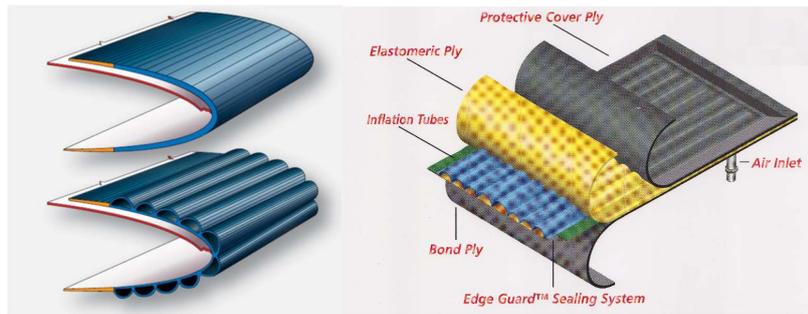


Figure 7 Impianto antighiaccio pneumatico

Questa tipologia di sistemi antighiaccio utilizza dei liquidi (solitamente glicole) che abbassano il punto di congelamento della superficie esposta. Il liquido sghiacciante viene spruzzato sulla superficie sulla quale si vuole prevenirne la formazione mediante un sistema di sprayer [12] oppure mediante passaggio capillare a membrana attraverso microfori al laser [13]. Questo sistema trova oggi larga applicazione nella prevenzione dalla formazione di ghiaccio di superfici esposte di modesta entità a causa della necessità di utilizzare grandi quantità di glicole etilenico per prevenire continuamente la formazione.

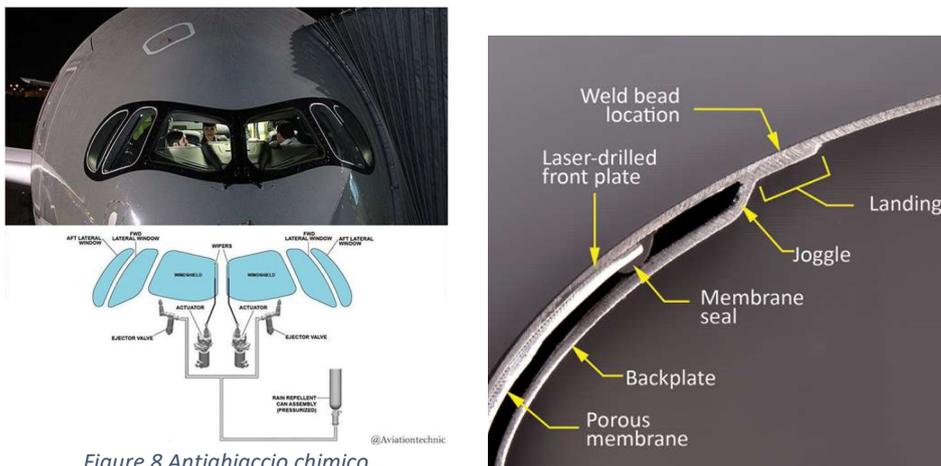
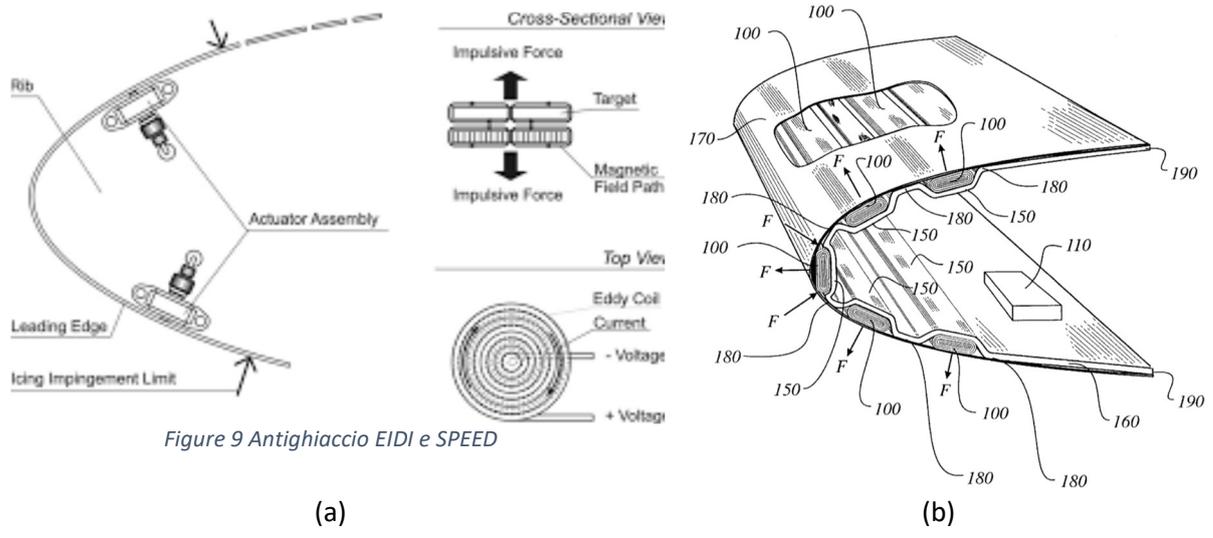


Figure 8 Antighiaccio chimico

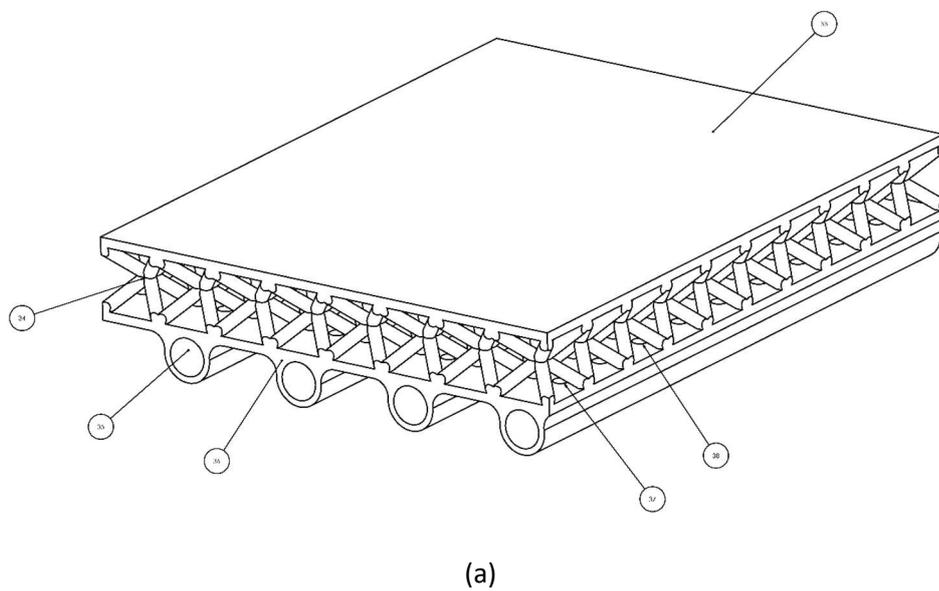
2.2.4 Sistemi antighiaccio sperimentali

Alcuni sistemi di tipo innovativo sono al momento allo studio da vari enti di ricerca o agenzie aerospaziali. Ad esempio il sistema EIDI (Electro Magnetic Impulse De Icing) [14] utilizza delle eddy current attraverso il laminato del bordo di attacco per creare una vibrazione permanente che impedisca l'attecchimento del ghiaccio. Questo impianto può rimuovere, in accordo con i proponenti uno strato di ghiaccio spesso fino a 12mm [9]. Parallelamente NASA Lewis e ARPA hanno lanciato il programma SPEED (Sonic Pulse Expulsive De Icer) che si propone di rimuovere il ghiaccio attecchito mediante impulsi sonici [14].



2.3 Brevetto Polito

Questa tesi si inserisce nella *core research* del team di Ricerca ASTRA cioè lo sviluppo e la ottimizzazione di un pannello sandwich con core trabecolare che assolve sia a finalità strutturali che sistemistiche (antighiaccio). In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportate delle viste concettuali tratte dal brevetto [2] depositato.



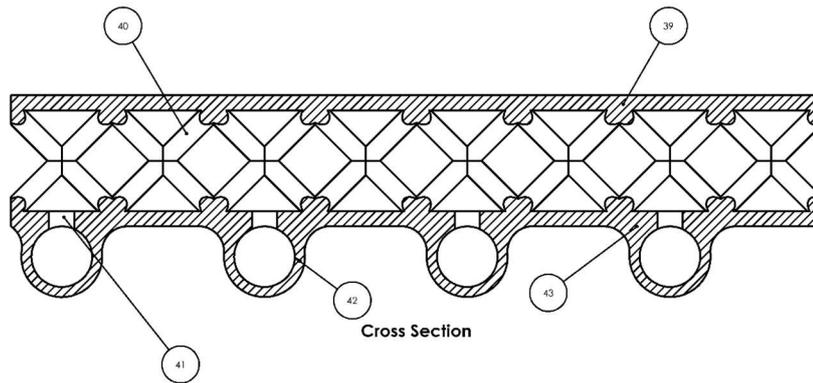


Figure 10 Viste isometriche e in sezione del pannello multifunzione

(b)

La parte esterna (riferimento 39 nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** b rappresenta la superficie aerodinamica mentre quella interna integra le condutture per il routing dell'aria calda spillata dal compressore. Questo permette un flusso selettivo e uno sghiacciamento modulare a seconda delle condizioni ambiente. L'aria calda poi fuoriesce attraverso dei fori e entra nel core trabecolare dove grazie alla alta turbolenza e vorticosità scambia calore con il core e quindi per conduzione surriscalda la skin esposta. Il componente esposto viene realizzato attraverso le tecniche di fabbricazione additiva singolarmente senza fare uso di rivettature, incollaggi o saldature. Tra i vari vantaggi che questa innovazione potrà portare ricordiamo:

- Efficientamento strutturale: il pannello migliora le performance al birdstrike a parità di peso paragonato alla singola skin;
- Integrazione dei sistemi nelle strutture con riduzione dei pesi;
- Aumento della efficienza di scambio termico con conseguente possibile riduzione della portata spillata;
- Cancellazione dell'effetto scala: anche piccole serie di aerei potranno beneficiare di questa tipologia di impianto avendo azzerato i tooling specifici;
- Riduzione dei costi: sia dal punto di vista produttivo avendo ridotto il numero dei part number e le operazioni di assemblaggio che dal punto di vista gestionale avendo una manutenzione smart su un componente integrato;
- Minor impatto ambientale: viene fusa soltanto la polvere che andrà a formare il componente mentre la rimanente può essere riutilizzata. Tutte le parti scartate non contaminate possono essere ri gas atomizzate e quindi ricreare altra polvere base.

2.4 Additive Manufacturing

Le prospettive aperte dalle tecnologie di stampa 3D in metallo sono enormi. La Metal Additive Manufacturing offre la possibilità di produrre parti complesse senza i vincoli di progettazione dei tradizionali percorsi di produzione. Questa tecnologia garantisce una libertà di progettazione senza rivali e standard elevati per produrre componenti di serie per le applicazioni più esigenti, tra cui l'ingegneria aerospaziale.

Metal Additive Manufacturing (MAM) produce parti tridimensionali strato per strato da una polvere a base di metallo, comunemente una lega di alluminio-silicio (AlSi10Mg). Il metodo si basa sulla trasmissione di un file di dati digitali a una macchina che poi costruisce il componente. Quasi tutti i sistemi MAM basati su letto di polvere utilizzano un metodo di deposizione di polvere costituito da un meccanismo stesura di uno strato, solitamente con uno spessore da 20 a 100 μm , su una piastra di substrato. Una volta che lo strato di polvere è distribuito, un raggio prodotto da un laser ad alta potenza

viene applicato al letto, fondendo selettivamente la polvere. Ripetendo il processo strato per strato e le parti sono complete. Le attuali macchine MAM disponibili in commercio sono Selective Laser Melting (SLM), Laser Cusing e Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [15].

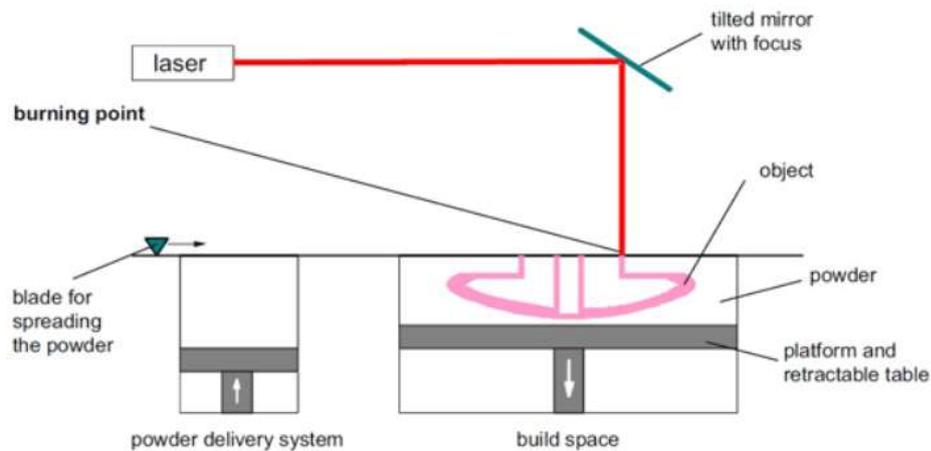


Figure 11 Schema della deposizione a letto di polveri mediante tecnologia SLM (Source VDI 3404)

Riassumendo, i principali vantaggi della tecnologia Selective Laser Melting (SLM), adottata per l'analisi presentata, rispetto ai tradizionali processi di lavorazione dei metalli sono:

- Libertà di progettazione con forme complesse (es. celle aperte non stocastiche).
- Pochi scarti.
- Recupero di polveri non fuse.
- Eliminazione delle giunzioni tra le parti.
- Strutture di più performanti e più leggere.

Per quanto riguarda le strutture a traliccio, soprattutto per l'applicazione nel campo degli scambiatori di calore, le macchine per la produzione additiva dei metalli hanno portato ad un cambiamento radicale. È stato infatti possibile passare dalla struttura stocastica a schiuma metallica a cellule aperte alle strutture reticolari, con un controllo deterministico sulle cellule e la creazione di una schiuma "regolare" parametrizzabile sotto ogni aspetto. Ciò porta alla creazione di una schiuma controllata in porosità, densità e forma, con un processo di lavorazione più rapido e meno complicato rispetto alle classiche schiume metalliche a cellula aperta. La schiuma risultante è una struttura reticolare cellulare periodica che possiede una topologia progettata costruita ripetendo una cella unitaria. Di conseguenza, è possibile una completa caratterizzazione del flusso del fluido e dei fenomeni di scambio termico attraverso le strutture in schiuma, che è l'interesse di questo lavoro. Inoltre, ricerche precedenti hanno rivelato che in generale, le strutture periodiche mostrano proprietà meccaniche superiori a quelle dimostrate dai loro analoghi stocastici a parità di porosità [16], [17].



Figure 12 Celle stocastiche

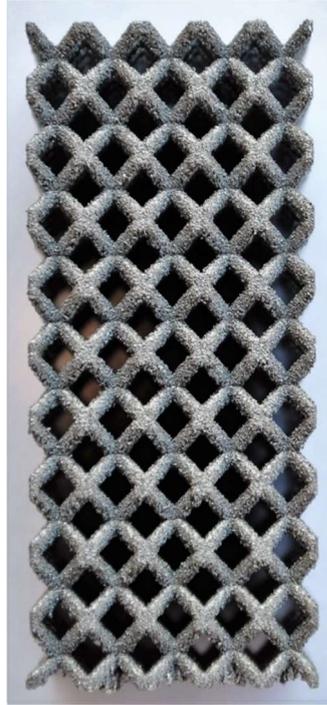


Figure 13 Celle deterministiche

2.5 Strutture Cellulari

Una struttura trabecolare è una rete collegata di travi con lo scopo di creare strutture portanti rigide e resistenti utilizzando il minor materiale possibile ed essere il più leggera possibile. Questi sono costituiti da una matrice collegata di travi e, come il reticolo cristallino, sono caratterizzati da una cella tipica con determinati elementi di simmetria.

Come già visto, attraverso la tecnica SLM è possibile costruire geometrie complesse con un livello di precisione relativamente alto in un unico componente, come le strutture trabecolari [18], senza la necessità di saldature o giunzioni. E' poi possibile realizzare giunzioni perfette tra diversi componenti senza la necessità di processi di saldatura, incollaggio, rivettatura o bullonatura. Tuttavia, per ottenere le tolleranze richieste dal montaggio, è necessaria una accurata finitura delle interfacce a causa delle tolleranze di fabbricazione. Le macchine SLM hanno il potenziale per produrre strutture reticolari cellulari fino a una risoluzione di 50 micron, funzionano utilizzando modelli digitali i cui metodi di sviluppo sono stati ampiamente studiati da ricercatori di tutto il mondo[19].

La progettazione e la produzione di strutture a reticolo cellulare prevede una riduzione del numero di parti dell'intero sistema risparmiando materiali, tempi di costruzione, costi di assemblaggio e consumo di energia. Inoltre, queste strutture reticolari possono fornire prestazioni elevate come elevate resistenze meccaniche con una massa relativamente bassa [20], elevate caratteristiche di assorbimento di energia specifica sotto carico statico e dinamico [21], elevata mitigazione sia dell'esplosione che degli impatti localizzati [22] e buone proprietà di isolamento termico e acustico[18]. Al giorno d'oggi c'è un grande interesse nella produzione di strutture reticolari cellulari con proprietà meccaniche e termiche disegnate appositamente per lo specifico scopo. Esistono molte ricerche in letteratura sull'applicazione di questo tipo di strutture [23], ma poche fanno considerazioni termo-strutturali accoppiate, quindi in questo contesto si inserisce il seguente lavoro di tesi. Un primo caso di studio per l'applicabilità delle strutture trabecolari negli scambiatori di calore è stato studiato in[24].

Alcuni dei tipi di cellule trabecolari analizzati negli ultimi anni sono elencati di seguito:

Cubico a corpo Centrato con montanti verticali lungo la cella dell'asse Z (BCCZ). E' la configurazione più semplice realizzabile; la schiuma risultante presenta buone caratteristiche meccaniche anche a basse

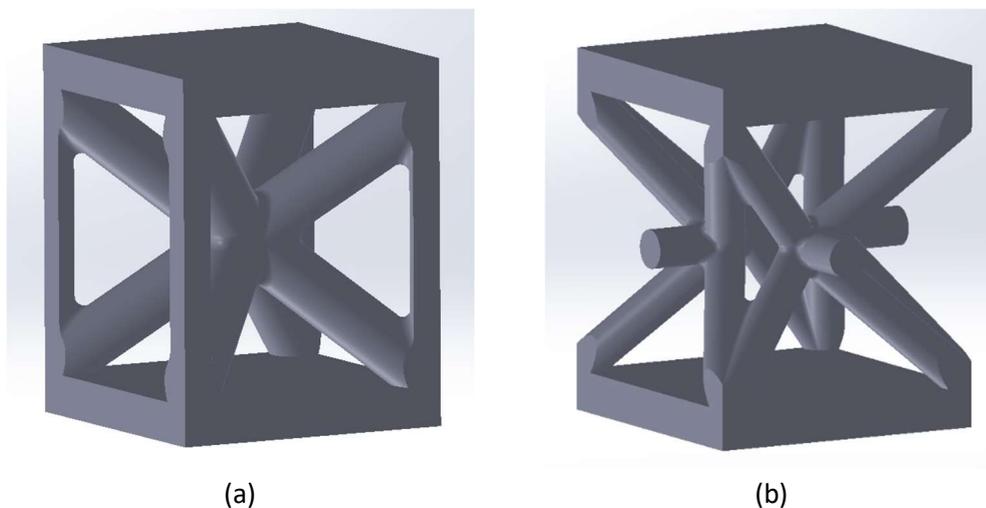
densità, sia in termini di modulo elastico specifico che in termini di resistenze. È la struttura reticolare più facile da produrre rispetto alle altre in termini di carico computazionale CAD e processo temporale MAM. Questa struttura trabecolare è stata precedentemente studiata in [25].

Rombic Dodecahedron (ROMBIC). Questa particolare struttura cellulare limita al minimo gli effetti di instabilità sui puntoni interni; infatti le travi deformate per flessione presentano sollecitazioni sia di trazione che di compressione. Presenta ottime caratteristiche di resistenza alla fatica. È stato precedentemente studiato in [26].

Auxetica (AUXETIC). Questa cellula è caratterizzata da un rapporto di Poisson negativo, grazie al quale strutture auxetiche presentano un comportamento interessante ed unico: si contraggono se compressi e si espandono se allungati. Mostrano un miglioramento in molte proprietà meccaniche, come tenacità alla frattura, resistenza all'indentazione, modulo di taglio, vibrazioni e assorbimento di energia e un rapporto resistenza/peso più elevato. Queste strutture presentano un'ottima resistenza all'esplosione e agli urti concentrati, il che le rende molto interessanti in campo aeronautico e militare, come dimostrato da [22].

Octetlat (OCTETLAT). La configurazione del reticolo a traliccio octetlat fornisce una risposta elastica quasi isotropa. Presenta una cella unitaria composta da due solidi platonici: il tetraedro e l'ottaedro. Questa particolare configurazione del reticolo fornisce un assorbimento di energia specifica eccezionalmente elevato, uno stress di plateau costante tra la resa iniziale e la densificazione e un rapporto di Poisson plastico pari a zero, come è stato studiato in [21].

Schwartz Diamond Gyroid (SCHWARTZ). Le strutture di schwartz possono essere generate in una specifica frazione di volume controllata e dimensioni delle celle unitarie e sono definite da triple funzioni implicite periodiche. Le funzioni implicite di interesse in questo lavoro sono l'insieme delle superfici infinitamente periodiche, queste superfici sono anche approssimazioni di superfici minime senza autointersezioni, cioè le superfici hanno una curvatura media pari a zero. Questa struttura reticolare è stata ampiamente studiata nel corso degli anni, come da Hussein et al. In [27] e da R. Gabbrielli in [28].



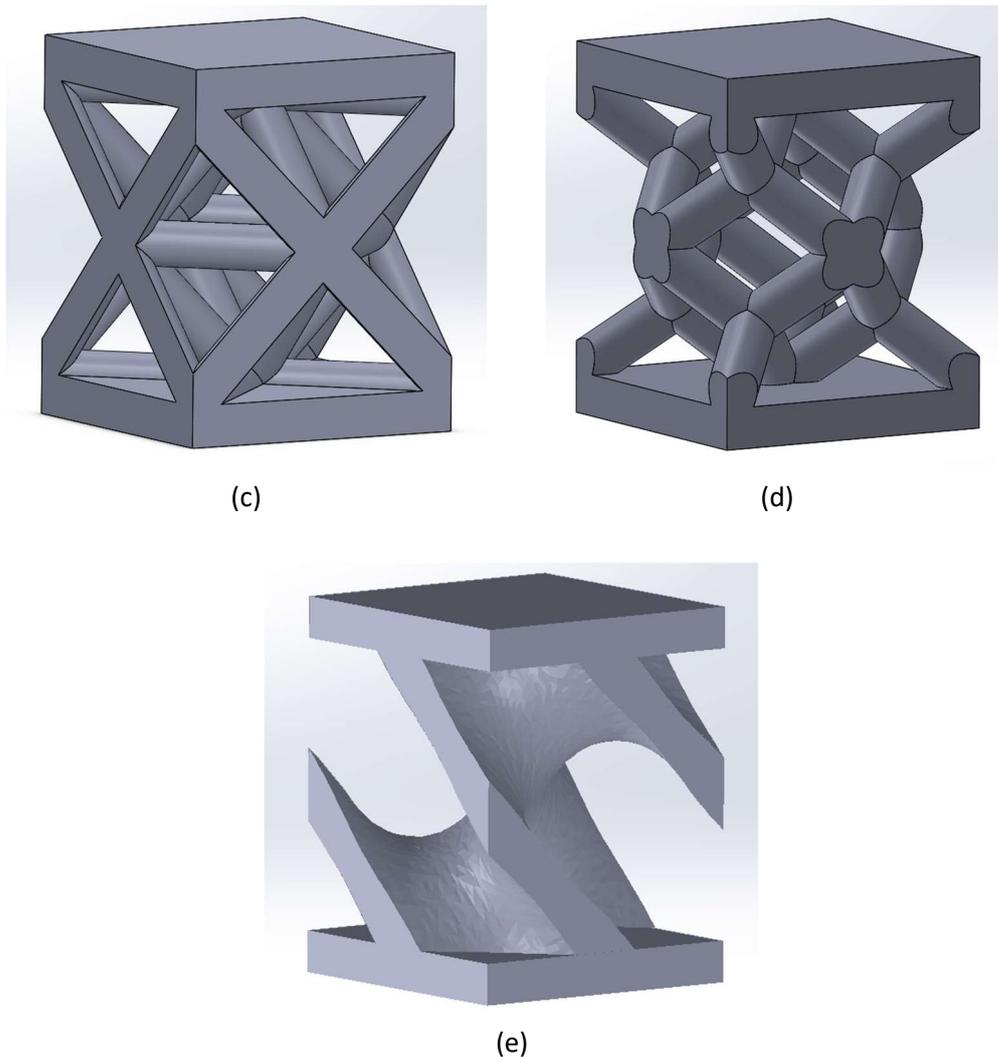


Figure 14 BCCZ cell (a), AUXETIC cell (b), OCTETLAT cell (c), RHOMBIC DODECAHEDRON cell (d), SCHWARTZ cell (e).

Questo studio si concentra sui pannelli sandwich con anima trabecolare costruiti in un unico componente. Il materiale scelto nel processo di produzione additiva SLM è AlSi10Mg [29]. Per il core sono state considerate le prime due tipologie di cellule trabecolari elencate in precedenza, ognuna di esse presenta caratteristiche meccaniche e termiche differenti. La dimensione caratteristica delle celle trabecolari che è stata adottata è pari a 7 mm, è la lunghezza del lato del cubo entro cui è compresa la cella.

Considerando questo caso di studio con pannelli sandwich ad anima trabecolare, attraverso la tecnologia SLM è possibile modificare, a seconda dei vincoli di fabbricazione, sia il diametro delle travi che la dimensione della cella o lo spessore del guscio per massimizzare il comportamento meccanico dell'intera struttura.

La variabile di progettazione più importante è il tipo di cella e quindi l'orientamento dei montanti. Una struttura più densa, con puntoni più spessi e celle più piccole, dà sempre migliori risultati meccanici. Infatti, questi cambiamenti implicano la modifica dell'area resistente effettiva e della quantità globale di densità e, di conseguenza, della porosità reticolare complessiva.

La corretta progettazione dell'anima del pannello sandwich deve permettere di sostenere la normale pressione del carico aerodinamico durante il volo, riducendo le masse e migliorando le prestazioni meccaniche [25].

3 Reologia e Modelli Sintetici

“La reologia è la scienza che studia la deformazione e il flusso di un materiale.” Bingham

3.1 Descrizione

Questo capitolo affronterà la parte di teoria sulla reologia necessaria all’elaborazione di un modello che descriva il comportamento di un materiale reale, e la descrizione del modello utilizzato e dei suoi parametri e della metodologia utilizzata per ottimizzare i coefficienti dell’equazione caratteristica.

La prima parte inizia con una descrizione generale della reologia e dei suoi modelli elementari, costituenti dei modelli complessi effettivamente utilizzati. L’interazione di due di questi modelli semplici costituisce un modello elementare: Voigt-Kelvin, Prandtl e Maxwell sono quelli analizzati in questa sede.

Continuando viene fornita una panoramica sul funzionamento di un modello complesso basato sul modello di Prandtl, e quindi genericamente chiamato “Prandtl modificato”. Questo modello è stato realizzato e validato su campioni ossei e sembra fornire una buona approssimazione del comportamento meccanico delle trabecole a compressione.

La parte finale del capitolo è dedicata alla descrizione del modello realizzato per meglio descrivere le trabecole oggetto della tesi. È fornito il background teorico sul comportamento statico e dinamico del modello di Voigt, ed è inoltre descritta la sua implementazione in Matlab/Simulink e il processo di Parameter Estimation.

3.2 Literature Review

Normalmente, tendiamo a classificare i materiali come viscosi o elastici. In realtà, per ogni tipo di materiale ho un comportamento che raggruppa entrambi questi aspetti, cioè ho sempre materiali viscoelastici dove la principale caratteristica (viscoso o elastico) dipende dal tipo di materiale ma anche da altri fattori come lo sforzo o la deformazione applicati, la velocità di applicazione, il tempo di applicazione. In effetti, sia nei sistemi tipicamente viscosi od elastici ho dei comportamenti che deviano dall’idealità.

Diversi modelli Reologici sono stati sviluppati per descrivere e spiegare il comportamento viscoelastico statico dei materiali. Questi modelli sono caratterizzati da diversi tipi di interazioni di alcuni semplici elementi: solido elastico ideale o solido di Hooke(molla), sostanza viscosa ideale o corpo di Newton (smorzatore), solido perfettamente plastico o corpo di St. Venant (sliding weight). Il comportamento meccanico di questi tre elementi è il seguente:



Figure 15 Solido elastico ideale (Molla) come visualizzata in Simulink

Il corpo elastico di Hooke si deforma istantaneamente all’applicazione del carico, al suo rilascio torna alla condizione iniziale.



Figure 16 Sostanza viscosa ideale (Smorzatore) come visualizzata in Simulink

Il corpo viscoso di Newton è funzione del tempo, l'applicazione del carico non corrisponde ad una deformazione istantanea ma la deformazione è proporzionale al tempo di applicazione del carico. La relazione tra Stress e lo Strain Ratio nel corpo Newtoniano è espresso dalla relazione $\sigma = \eta \frac{d\epsilon}{dt}$, con η viscosità.



Figure 17 Solido perfettamente plastico (sliding weight) come visualizzato in Simulink

Il corpo di St. Venant è utilizzato per descrivere il comportamento plastico dei materiali. Questo è composto da una massa che giace su un piano con attrito tra essi. Al di sotto dello snervamento σ_p non sono presenti deformazioni. Quando lo stress diventa maggiore o uguale al valore σ_p inizia il flusso di materiale. Quando il carico viene rimosso la deformazione permane.

La combinazione di questi modelli elementari può essere utilizzata per descrivere il comportamento meccanico dei materiali reali. Quando una molla ed uno smorzatore sono messi in serie, lo stress su ogni elemento è lo stesso. Se questi sono messi in parallelo sarà la deformazione ad essere uguale.

Il modello di Voigt utilizza una molla ed uno smorzatore in parallelo. La risposta in funzione del tempo è esponenziale e, al rilascio del carico, torna esponenzialmente a zero.

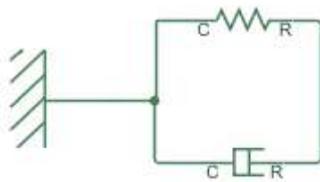


Figure 18 Modello Kelvin-Voigt come visualizzato in Simulink

Il modello Maxwell utilizza una molla ed uno smorzatore in serie. La deformazione elastica iniziale è data dalla molla, lo smorzatore è responsabile per la componente dipendente da tempo. Al rilascio del carico permane una deformazione residua.

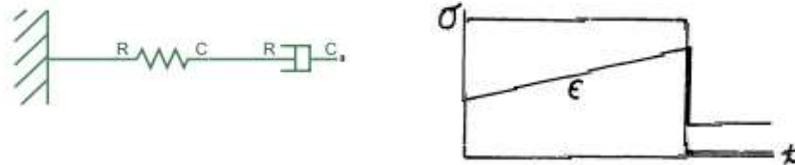


Figure 19 Modello Maxwell come visualizzato in Simulink

Il Modello di Prandtl è usato per descrivere il comportamento del corpo perfettamente plastico, dove il comportamento è lineare fino allo snervamento σ_p successivamente diventa puramente plastico.



Figure 20 Modello Prandtl come visualizzato in Simulink

Diverse ricerche e modelli sono stati portati avanti per lo studio del comportamento meccanico delle ossa. Ci sono modelli ottenuti da prove statiche come modulo elastico, tensione di snervamento e ultimate strength delle ossa dei bovini (Citazione 13, 15 MIT). Altri test si concentrano nel campo dei large displacement testati in macchine Instron. Un modello analizzato da (citazione prandtl modificato) parte dal modello Prandtl modificato e mostra una buona sovrapposizione tra dati numerici e sperimentale.

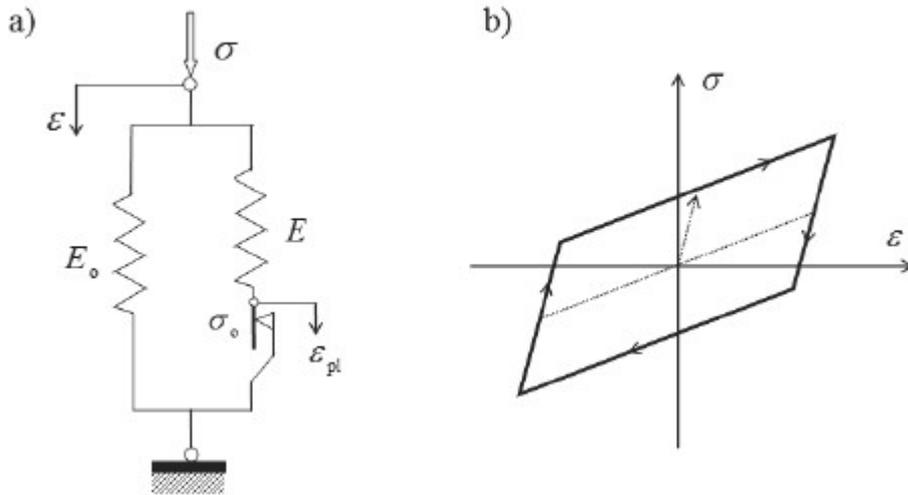


Figure 21 A sinistra modello Schema del modello Prandtl modificato, a destra curva Sigma-Epsilon

caso il modello di Prandtl semplice è in parallelo ad una molla caratterizzata da una rigidezza K , questo rappresenta il parametro di hardening/softening del sistema e consente allo stress di crescere linearmente con le deformazioni. Lo slider invece stabilisce una soglia minima al di sotto della quale non si manifestano deformazioni.

Il modello in figura 16 rappresenta un modello infinito, ogni unità è composta da una molla e uno slider e sono connessi in parallelo tra loro. Queste unità base sono caratterizzate da un comportamento elastoplastico con $\mathbf{E} = \mathbf{E}^e + \mathbf{E}^p$, dove \mathbf{E}^e è la parte elastica della deformazione ed \mathbf{E}^p la parte plastica.

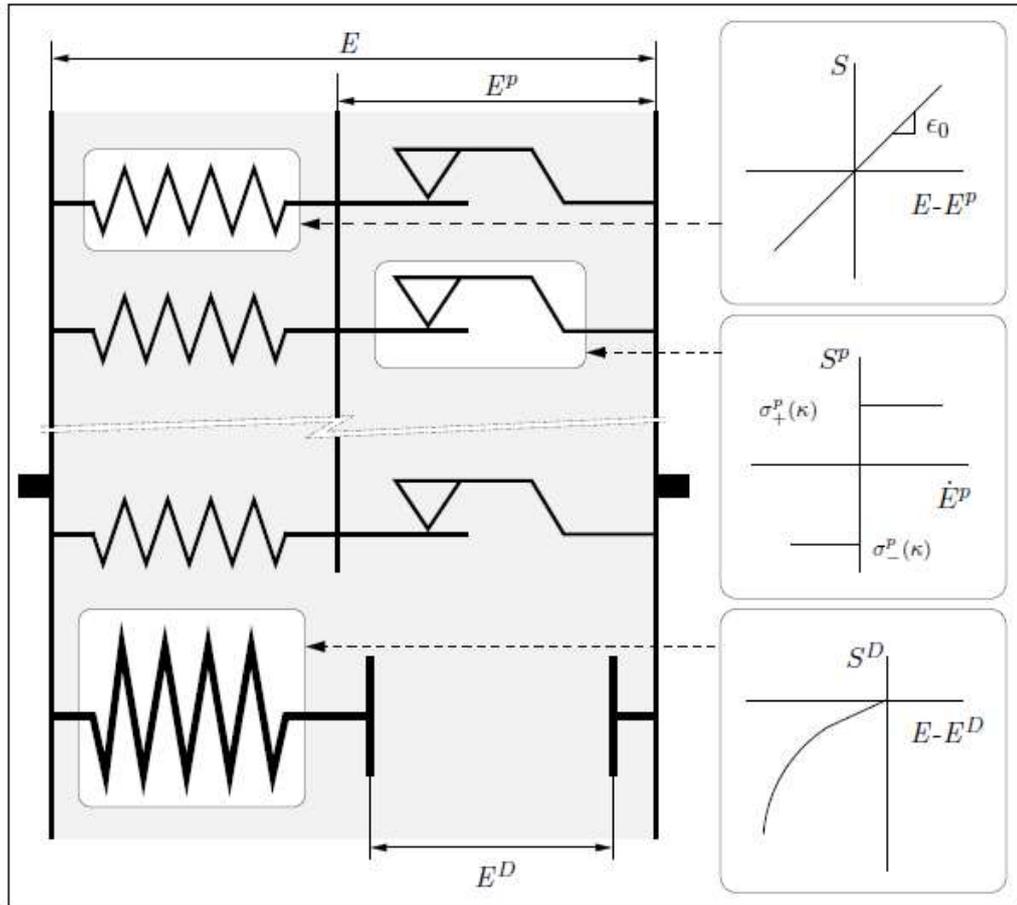


Figure 22 Modello Prandtl modificato

La funzione di snervamento plastico è di tipo lineare isotropico con hardening, con κ parametro di accumulo del danno. Il parametro di danneggiamento $D(\kappa)$ è valutato sul rapporto delle unità di base danneggiate sul totale presenti nel modello. Per valutare l'effetto della densificazione sui grandi spostamenti è inserito un ramo in cui è presente una molla non lineare ed è attivata solo da una determinata variazione del volume, inteso come $g(E) = 0$.

Il modello così composto da un tensore elastico del quarto ordine dato dalla molla, un tensore semi-definito positivo del quarto ordine utilizzato nella funzione di snervamento.

Per definire l'energia potenziale del modello facciamo l'ipotesi di indipendenza del modello dalla velocità e condizioni isoterme. L'energia potenziale è uguale alla densità di energia cinetica della contenuta nella molla elastica:

$$\psi(E, E^p, \kappa) := \frac{1}{2}(1 - D(\kappa))(E - E^p) : \mathbb{S}(E - E^p) + \psi^D(E)$$

Con $\psi^D(E)$ energia elastica contenuta del densificatore è uguale a

$$\psi^D(E) := \begin{cases} 0 & \text{se } g(E) > 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_l g^2(E) + \frac{1}{t}\gamma_l g^t(E) & \text{se } g(E) \geq 0 \end{cases}$$

La funzione $g(E) = 0$ è una funzione continua con $\psi^D(E) = 0$ quando $g(E) = 0$. Questo tipo di formulazione presenta un termine lineare e una potenza ed è verificato dagli studi di L.J. Gibson del 1999, Hayes e Carter del 1976. La funzione danneggiamento $D(\kappa)$ è positive, monotona, e continua con derivata continua e maggiore di zero. L'energia potenziale è sempre maggiore o nulla, continua con derivata continua e derivabile in E, E_p e κ .

Derivando l'Energia potenziale otteniamo:

$$\begin{aligned} S_{\psi}^T(E, E^P, \kappa) &= \partial_E \psi = (1 - D(\kappa)) \mathbb{S}(E - E^p) + S^D(E) \\ S_{\psi}^P(E, E^P, \kappa) &= -\partial_{E^P} \psi = (1 - D(\kappa)) \mathbb{S}(E - E^p) \\ W_{\psi}^{\kappa}(E, E^P, \kappa) &= -\partial_{\kappa} \psi = \frac{D'(\kappa)}{2} (E - E^p) : \mathbb{S}(E - E^p) \end{aligned}$$

Dove S_{ψ}^T è lo Stress totale, S_{ψ}^P lo stress nel corpo con attrito e W_{ψ}^{κ} il rateo di energia di rilascio. $S^D(E)$ lo stress nel densificatore.

$$S^D(E) := \begin{cases} 0 & \text{se } g(E) > 0 \\ \frac{1}{2} \gamma_l g(E) + \frac{1}{t} \gamma_l g^{t-1}(E) \frac{\partial g(E)}{\partial E} & \text{se } g(E) \geq 0 \end{cases}$$

Lo stress nominale:

$$S(E, E^P, \kappa) := S_{\psi}^T(E, \kappa) - S^D(E) = S^D(E)$$

3.3 Modelli utilizzati e confronto analitico

Il modello utilizzato per lo studio è il modello di Kelvin-Voigt. Questo consiste in una molla ed uno smorzatore in parallelo. Lo stress viene condiviso dalla molla e dal pistone posti in parallelo per cui la risposta elastica è ritardata dalla resistenza della componente viscosa, è utilizzato in reologia per descrivere il comportamento di un solido viscoelastico. Questo modello, e modelli da esso derivati, sono già stati utilizzati con buoni risultati per lo studio del comportamento delle ossa corticali sottoposte a compressione nel campo dei grandi spostamenti (modello Sendilin, ref. MIT appuntato).

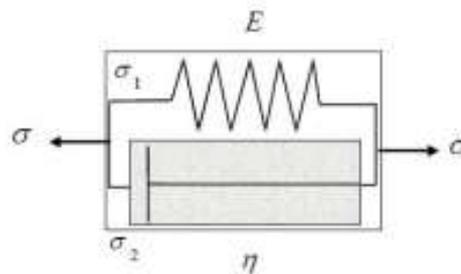


Figure 23 Modello Kelvin-Voigt

Nel modello essendo gli elementi in parallelo la deformazione è uguale e vale:

$$\varepsilon = \varepsilon_{El} = \varepsilon_{Vis}$$

Al contrario lo stress si divide in componente elastica e viscosa:

$$\sigma_T = \sigma_{El} + \sigma_{Vis}$$

L'equazione costitutiva diventa quindi:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \Rightarrow \frac{\sigma}{E} = \varepsilon + \frac{\eta}{E} \frac{d\varepsilon}{dt} \Rightarrow \frac{\sigma}{E} = \varepsilon + \tau_r \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{1}{\tau_r} \varepsilon = \frac{\sigma}{E\tau_r}$$

Integrando otteniamo la deformazione in funzione del tempo:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_r}})$$

In figura 11 si può osservare la risposta del modello di Kelvin-Voigt. La deformazione del corpo di K-V evolve con legge che dipende dalle caratteristiche elastiche e viscosi del mezzo e raggiunge a tempo infinito la deformazione che compete alla componente elastica queste condizioni, a tempo infinito, la deformazione che compete alla componente elastica. $\tau_r = \frac{\eta}{E}$ rappresenta il tempo di ritardo

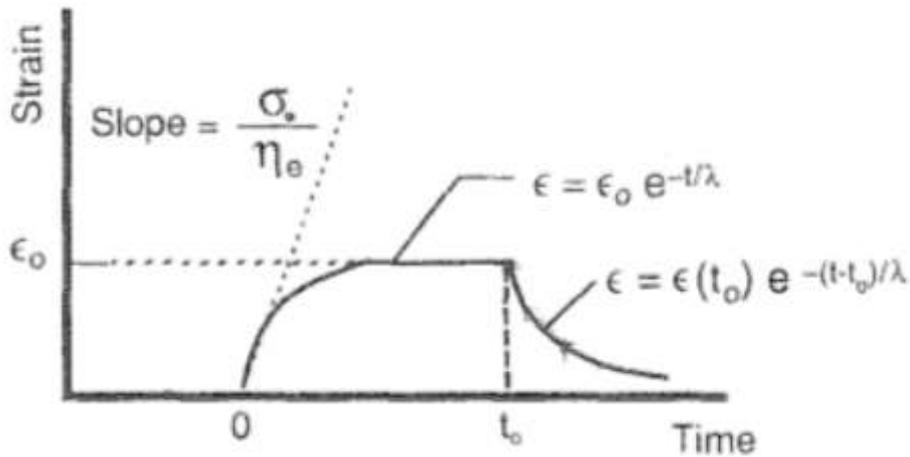


Figure 24 Grafico di risposta del modello di Kelvin-Voigt

Al livello dinamico il modello in esame si presenta come un sistema oscillante smorzato ad un grado di libertà con forzante.

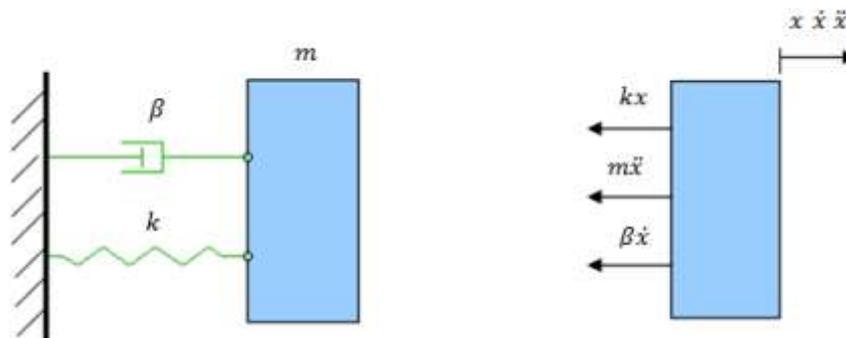


Figure 25 Schema di un sistema libero smorzato ad un grado di libertà

L'equazione del moto del modello in esame vale:

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + kx = 0$$

Dividendo per m otteniamo:

$$\ddot{x} + \frac{\beta}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0$$

Introduciamo il parametro ζ , smorzamento definito come:

$$\zeta = \frac{\beta}{2m\omega_n}$$

ω_n è la pulsazione naturale e vale:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Sostituendo i parametri l'equazione viene scritta in forma canonica:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 0$$

Questa è un'equazione differenziale del secondo ordine a coefficienti costanti, le soluzioni sono del tipo:

$$x = e^{\lambda t}$$

E le derivate valgono rispettivamente:

$$\ddot{x} = \lambda^2 e^{\lambda t}; \quad \dot{x} = \lambda e^{\lambda t}$$

Sostituendo ricaviamo l'equazione caratteristica del sistema:

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2 = 0$$

Le cui radici sono:

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \sqrt{\zeta^2\omega_n^2 - \omega_n^2} = \omega_n(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})$$

La risposta del sistema è esprimibile come combinazione lineare:

$$x = ae^{\lambda_1 t} + be^{\lambda_2 t}$$

Sostituendo

$$x = ae^{\omega_n(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})t} + be^{\omega_n(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})t}$$

A seconda del valore di ζ si definirà il sistema come

$$\zeta > 1 \text{ sistema sovrasmorzato}$$

$$\zeta < 1 \text{ sistema sottosmorzato}$$

$$\zeta = 1 \text{ sistema in condizioni di smorzamento critico}$$

Se $\zeta > 1$

Si hanno due radici $\lambda_{1,2}$ reali distinte ed entrambe negative, la risposta sarà:

$$= e^{-\zeta\omega_n t} (ae^{(\sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + be^{(-\sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t})$$

Analizzando i termini dell'espressione di $x = A(B + C)$ ponendo:

$$A = e^{-\zeta\omega_n t}; B = ae^{(\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t}; C = be^{(-\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t}$$

Analizzando il comportamento al variare del tempo si osserva che quando t cresce A decresce, C aumenta e B diminuisce.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$$

All'aumentare del tempo la risposta del sistema tende a 0.

Se $\zeta > 1$

Le radici $\lambda_{1,2}$ dell'equazione caratteristica sono:

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm i\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

La risposta del sistema:

$$x = ae^{(-\zeta+i\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t} + be^{(-\zeta-i\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t}$$

Che può essere riscritta come

$$x = x_0 e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_s t + \varphi_0)$$

Dove

$$\omega_s = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$$

Con ω_s pulsazione propria del sistema smorzato, minore della pulsazione del sistema non smorzato ω_n . x_0 e φ_0 sono costanti definite dalle condizioni iniziali.

La risposta è formata da una parte sinusoidale compresa tra una parte esponenziale decrescente con il tempo. $x = AB$ con $A = x_0 e^{-\zeta\omega_n t}$ e $B = \sin(\omega_s t + \varphi_0)$

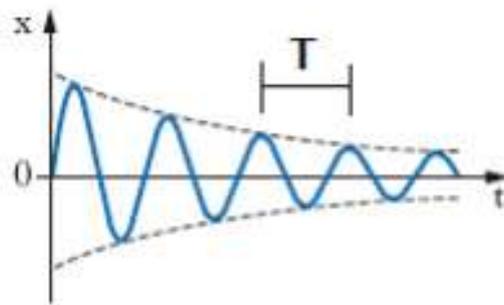


Figure 26 Risposta di un sistema libero smorzato ad un grado di libertà

Si definisce un pseudo periodo e di conseguenza una pseudo frequenza. Questo periodo sarà maggiore del sistema equivalente non smorzato.

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_s}$$

$$f_s = \frac{1}{T_s}$$

Ed anche in questo caso:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$$

Se $\zeta = 1$

$$\beta = 2m\omega_n$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = -\omega_n$$

La risposta del sistema sarà espressa da:

$$x = ae^{\lambda t} + be^{\lambda t} = (a + bt)e^{\lambda t} = (a + bt)e^{-\omega_n t}$$

L'esponenziale negativo implica:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$$

In questo caso si manifesta un moto aperiodico come nel caso $\zeta > 1$. La situazione di smorzamento critico è quella che fa tendere a zero la risposta nel tempo più breve.

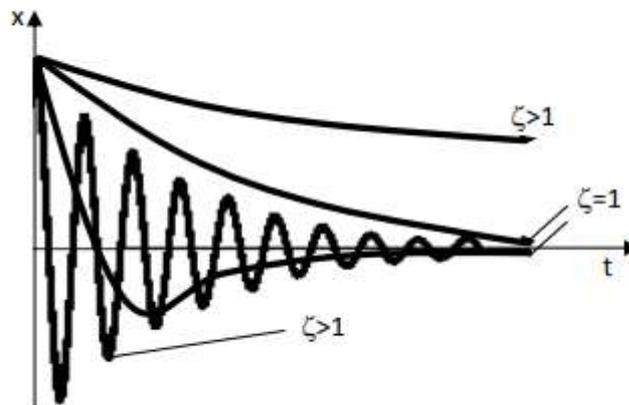


Figure 27 Risposta di un sistema libero ad un grado di libertà nei tre casi

In un sistema reale la misura delle caratteristiche legate alla massa può essere realizzata con misure indirette di peso e di caratteristiche inerziali, la misura di caratteristiche elastiche si può pensare di realizzarla con misure di deformazioni sotto opportuni carichi noti. La misura di caratteristiche di smorzamento è spesso poco agevole. Nel caso di un moto oscillatorio smorzato, basandosi sulla diminuzione dell'ampiezza dell'oscillazione, si può risalire al valore dello smorzamento del sistema dovuto alla massa.

Si prenda in considerazione il caso in cui $0 < \zeta < 1$, la risposta vale:

$$x = x_0 e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_s t + \varphi_0)$$

Analizzando le oscillazioni si può calcolare il rapporto tra l'ampiezza massima dell'oscillazione al tempo t e l'ampiezza massima dell'oscillazione successiva al tempo $t+T$

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{e^{-\zeta\omega_n (t+T)}} = e^{\zeta\omega_n T}$$

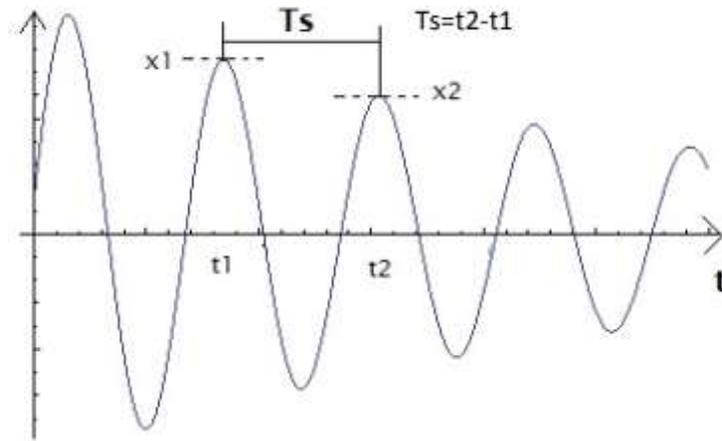


Figure 28 Risposta di un sistema libero ad un grado di libertà dove è evidenziato il decremento della risposta

Si definisce decremento logaritmico la quantità:

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \zeta\omega_n T_s$$

Sostituendo

$$\delta = \zeta\omega_n T_s = \zeta \frac{2\pi}{\omega_s} = \zeta\omega_n \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

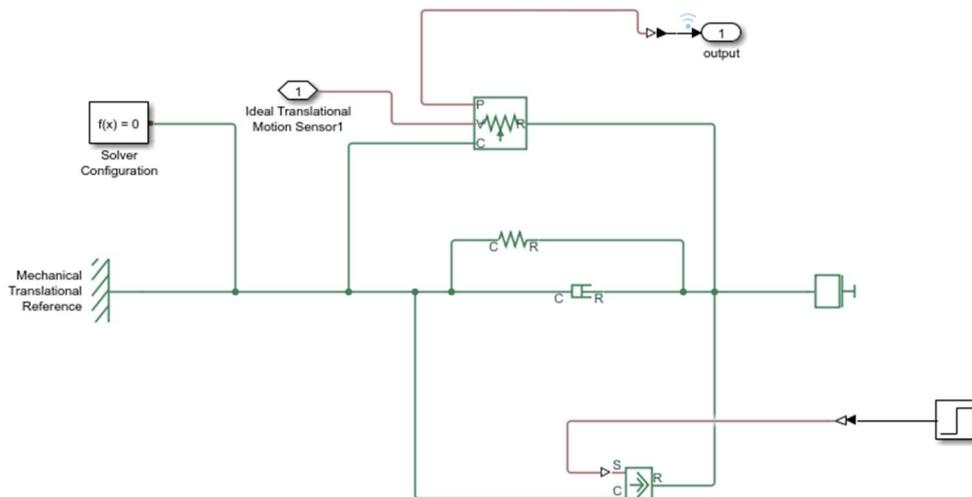


Figure 29 Modello Kelvin-Voigt realizzato in ambiente Simscape

La soluzione e la stima dei parametri è stata effettuata attraverso la suite Matlab. In particolare il processamento dei dati sperimentali è stato affidato a degli script Matlab, la soluzione numerica e l'ottimizzazione del modello a Simscape.

In figura 16 è possibile osservare graficamente il modello. Esso è costituito da:

Una Molla di rigidezza K ed uno smorzatore Newtoniano con costante C connessi in parallelo. Una massa m ed un vincolo traslazionale connessi in serie alla massa ed allo smorzatore ad estremità opposte. Questi elementi rappresentano il modello di Kelvin-Voigt.

Sempre in figura 16 è possibile osservare la presenza di ulteriori elementi necessari al funzionamento del modello:

È presente una forza in input a gradino caratterizzata da un Valore iniziale F_{in} , un valore finale F_{fin} ed un tempo iniziale di applicazione t_{in} . Il blocco del segnale a gradino è connesso ad un convertitore di segnale fisico a segnale Simulink.

In output è presente un blocco di misurazione di spostamento, anche questo connesso ad un convertitore di segnale da Simulink a segnale fisico.

Il solutore utilizza il metodo di Eulero all'indietro con un tempo di campionamento di 0.001s, step fisso e partendo da condizioni stazionarie.

Table 1 Coefficienti modello Kelvin-Voigt

Coefficiente	Relazione
K	$100 + a$ N/m
C	$100 + b$ N/(m/s)
M	$a * c + 1$ kg
F_{in}	450
F_{fin}	$\sigma_{max} * R * 100$

Con R che rappresenta il rapporto tra la forza effettiva applicata al modello e la σ_{max} .

C è costante è pari a 11 per simulazioni che coinvolgono il tratto plastico è la rottura della prima cella fino alla σ_{max} .

A seguito di questa impostazione le variabili: a , b e F_{fin} sono state utilizzate come variabili di ottimizzazione. In ambiente Simulink è stato utilizzato il Tool di Parameter Estimation, questo consente di trovare, dato un set di dati sperimentali ed un modello Simulink/Simscape, i coefficienti del modello che meglio approssimano i dati sperimentali.

Per ogni tipo e dimensione di cella sono stati importati i dati relativi alle prove sperimentali nel Tool di Parameter Estimation e tracciati i vari grafici. I valori iniziali di a e b sono impostati a zero, $F_{fin} = \sigma_{max} * 1.3$ e successivamente calibrato.

Il metodo utilizzato per la convergenza è il metodo dei minimi quadrati non lineari, forma dell'analisi dei minimi quadrati utilizzata per adattare un insieme di m osservazioni ad un modello non lineare in n parametri sconosciuti.

L'algoritmo è il "Trust-Region Reflective". Nell'ottimizzazione matematica, una "Trust Region" è il sottoinsieme della regione della funzione obiettivo che viene approssimata utilizzando una funzione

modello (spesso quadratica). Se si trova un modello adeguato della funzione obiettivo all'interno della regione fiduciaria, la regione viene ampliata; al contrario, se l'approssimazione è scarsa, la regione è contratta.

L'adattamento viene valutato confrontando il rapporto tra il miglioramento atteso dall'approssimazione del modello con il miglioramento effettivo osservato nella funzione obiettivo. La semplice soglia del rapporto viene utilizzata come criterio di espansione e contrazione: una funzione modello è "affidabile" solo nella regione in cui fornisce un'approssimazione ragionevole.

I metodi della Trust-Region sono in un certo senso doppi rispetto ai metodi di ricerca per linea: i metodi della Trust Region scelgono prima una dimensione del passaggio (la dimensione della regione di fiducia) e quindi una direzione del passaggio, mentre i metodi di ricerca per linea scelgono prima una direzione del passaggio e poi una dimensione del passo.

4 Prove Meccaniche sperimentali

Le prove sperimentali sulle celle rappresentano in ordine cronologico la prima attività svolta. Il processo di caratterizzazione meccanica delle strutture cellulari come già visto è stato oggetto di numerosi studi volti a trovare una relazione che consenta di valutare semplicemente le caratteristiche meccaniche.

In questo capitolo vengono descritte inizialmente la scelta delle celle in base al loro meccanismo di distribuzione del carico (compressione, e/o flessione) dovuta all'orientamento delle aste e alla presenza di elementi verticali. Una grande aiuto alla valutazione viene dal lavoro di Varetti che valuta in modo approfondito l'apporto di aste verticali ad una cella Cubica a Corpo Centrato.

Si prosegue con l'impostazione dei DOE e della scelta dei parametri di controllo: Cell Size e Densità relativa, attraverso la corretta progettazione dell'esperimento è possibile definire dei valori discreti su cui effettuare le prove sperimentali e svolgere una analisi di Sensitivity.

E' fornita una descrizione dei provini e del tipo di prova nonché della strumentazione, inoltre sono presenti le curve ottenute dai test di compressione che successivamente saranno utilizzate per la calibrazione del modello numerico.

4.1 Prove di compressione

La campagna sperimentale di cui i risultati sono presentati in questa tesi parte per dall'indagine preliminare fornita dai risultati ottenuti da Varetti(Cit.). In questo lavoro è stato creato un Design of Experiment(DOE) di dimensione 3^2 con due tipi differenti di celle(BCCZ con e senza aste verticali), due diametri differenti e due tagli di cella differenti.

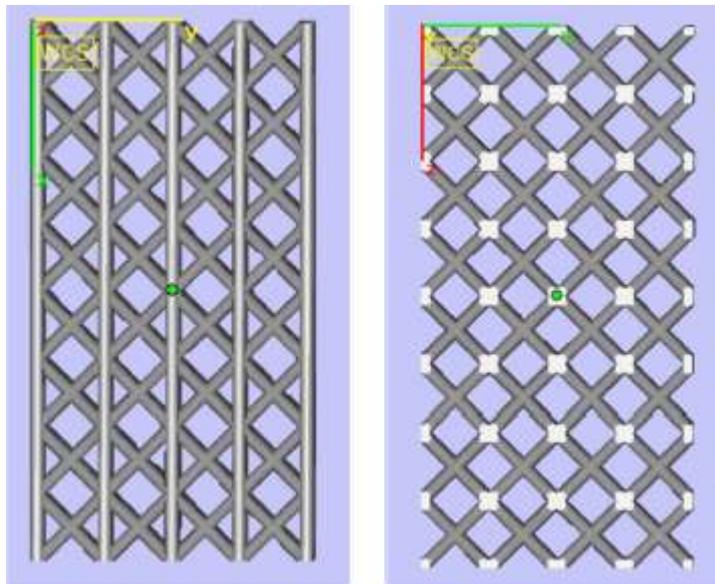


Figure 30 Provini delle celle analizzate da Varetti

Partendo da queste evidenze preliminari è stato deciso di ampliare la base dei risultati sperimentali con caratterizzazione di celle differenti. L'analisi del comportamento delle trabeccole sottoposte a test di compressione è stato esteso a celle di forma differente che di conseguenza avranno una diversa configurazione di carichi interni che bilanceranno quelli esterni, quindi diverse caratteristiche e comportamento meccanico. In questo modo si intende avere una visione più ampia del fenomeno.

4.1.1 Metodi e materiali

Per il test di compressione statico nel core sono stati selezionati ed usati due differenti materiali: AlSi10Mg e Ti6Al4V. L'inserimento di una lega di titanio nella caratterizzazione ha l'idea di porre una base di conoscenze per un futuro sviluppo di bordi di attacco per velivoli supersonici.

L'impostazione dei test deriva dalla creazione di due differenti DOE sui provini di Alluminio:

- Un primo DOE Full Factorial 3^3 generato a partire da 3 differenti tipi di celle (BCCZ, Rhombic dodecaedro e Octet), 3 taglie di celle differenti (3, 5 e 7mm) e tre differenti densità (25, 30, 35%); ognuna delle 27 tipologia di provino è stata provata 3 volte per un totale di 81 provini.
- Un secondo DOE Fractional Factorial 3^3 generato partire da un Latin Hypercube con 3 differenti tipi di celle (Schwartz, Gyroid e Auxetiche, 3 taglie di celle differenti (3, 5 e 7mm) e tre differenti densità (25, 30, 35%); ognuna dei 9 provini è stato testato 3 volte per un totale di 27 provini.

Factors	Levels		
	1	2	3
<i>Cell type</i>	BCC-Z	Rhombic dodecahedron	Octet
<i>Cell Size</i>	3 mm	5 mm	7 mm
<i>Relative Density</i>	25%	30%	35%

Table 2 DOE Full Factorial per AlSi10mg per test di compressione

Factors	Levels		
	1	2	3
<i>Cell type</i>	Schwartz	Gyroid	Auxetic
<i>Cell Size</i>	3 mm	5 mm	7 mm
<i>Relative Density</i>	25%	30%	35%

Table 3 Latin Hypercube per test addizionali su AlSi10mg

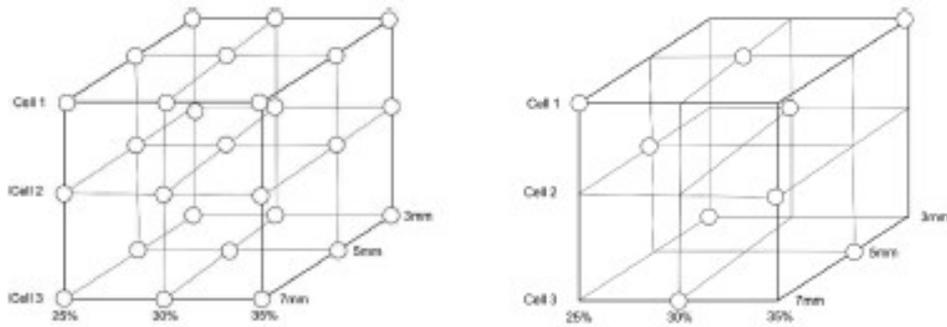


Figure 31 Setup del DOE, a sinistra Full Factorial, a destra Latin Hypercube

L'aggiunta di una seconda famiglia di provini da testare si è resa necessaria durante l'esecuzione dei test per analizzare anche il comportamento delle celle non-lattice (TPMS) e celle con modulo di Poisson negativo. I risultati di questa seconda campagna sperimentale non saranno oggetto di discussione di questa tesi.

La campagna di caratterizzazione sperimentale sui provini in Titanio è stata impostata come segue:

- Un primo DOE Fractional Factorial 3^3 generato partire da un Latin Hypercube con 3 differenti tipi di celle (BCCZ, Rhombic dodecaedro e Octet), 3 taglie di celle differenti (3, 5 e 7mm) e tre differenti densità (25, 30, 35%); ognuna dei 9 provini è stato testato 3 volte per un totale di 27 provini
- Un secondo DOE Fractional Factorial 3^3 generato partire da un Latin Hypercube con 3 differenti tipi di celle (Schwartz, Gyroid e Auxetiche, 3 taglie di celle differenti (3, 5 e 7mm) e tre differenti densità (25, 30, 35%); ognuna dei 9 provini è stato testato 3 volte per un totale di 27 provini.

In totale sono stati prodotti e testati 54 provini in titanio e 108 in alluminio.

La scelta della densità relativa è stata condotta in analogia a quella identificata da Gibson e Ashby, i quali hanno identificato la transizione tra solido cellulare e solido poroso. In questo modo si intende indagare il meccanismo di frattura di questo tipo di discontinuità. Inoltre la dimensione di cella è soggetta a vincoli di fattibilità tecnica.

4.1.2 Descrizione del provino

Le dimensioni e struttura del provino seguono le linee guida emanate dall'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) nel lavoro preliminare (cit.). La scelta è stata fatta con l'obiettivo di ottenere risultati comparabili con i precedenti e quindi espandere il database disponibile. Le Design Rules del provino sono:

- Sezione quadrata di 20mm (21mm solo per le celle da 7mm) con un numero variabile di celle per lato: 5 celle per dimensione di 4mm, 4 celle per 5mm e 3 celle per travi da 7mm.

- L'altezza del provino è stata impostata in modo da ottenere una misura doppia rispetto alla sezione alla base. Di conseguenza abbiamo un'altezza di 40mm per misure di celle di 4 e 5 mm e 42mm per le celle da 7mm.

4.1.3 Metodologia di Analisi

Tutti i test di compressione sono stati eseguiti presso i laboratori del Politecnico di Torino usando due differenti macchine: una Zuick Roell con una cella di carico elettromeccanica da 50kN e una Instron Elettroidraulica con una cella di carico da 100kN. I test sono stati svolti impostando uno spostamento della traversa di 1mm/min ed impostando un precarico di 1kN per tutti i provini in AlSi10Mg e 3kN per tutti i provini in Ti6Al4V. Due dei tre provini sono stati testati immediatamente, il terzo prima di essere testato è stato spedito presso l'Università di Melbourne per essere sottoposto ad una Tomografia Computerizzata. Questo è stato fatto nell'ottica di realizzare un database di tomografie di strutture cellulari con differenti topologie, taglie e densità relativa per futuri indagini circa il comportamento a fatica di questi materiali. Tutte le compressioni sono state filmate utilizzando una Reflex Nikon D7000 con sensore APC-S e obiettivo Nikkor 50mm f1.8 azionata da un comando remoto e posizionata su treppiede.

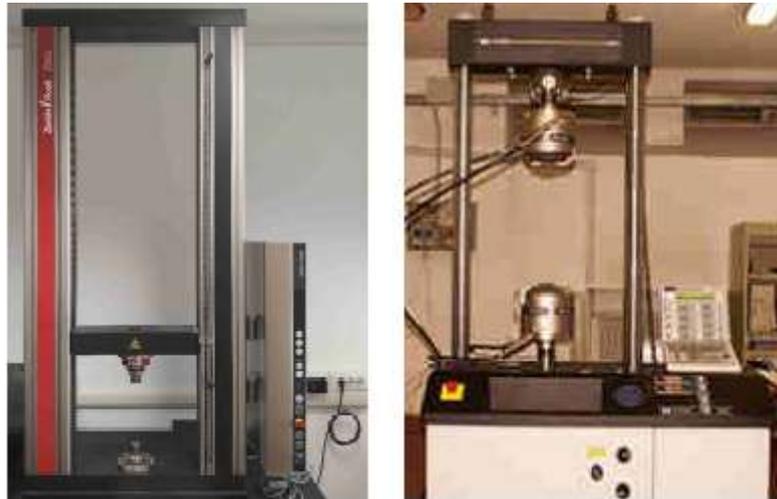


Figure 32 A sinistra: Zuick Roell, A Destra: Instron

4.1.4 Raccolta dei dati

Per ogni prova è stata ottenuta una curva Deformazione-Spostamento fino alla rottura. Successivamente attraverso il Software Origin sono stati calcolati: Il valore del modulo elastico E , il carico di rottura σ_{max} ed il carico $\sigma_{0.2}$ corrispondente ad una deformazione plastica dello 0.2%.

I risultati ottenuti sono stati elaborati attraverso il DOE per valutare i parametri più influenti e l'interazione tra essi.

Inoltre per approfondire la conoscenza di queste strutture e nel futuro riuscire a migliorare la loro progettazione i provini prima di essere compressi sono stati analizzati al microscopio ottico.

4.1.5 Rombic AlSi10Mg

I provini per il test delle celle Rombic sono mostrati in figura. Hanno rispettivamente misura di cella di 3,5 e 7mm. Tutte le rotture del provino avvengono per cedimento dell'asta all'altezza del nodo. In questo punto si ha una concentrazione di stress che porta ad un innesco che prosegue planare a 45° rispetto all'asse Z, è interessante osservare che l'innesco avviene sempre all'estremità del provino.

Questo tipo di cella ha comportamento fragile e una volta che la rottura si propaga è impossibile proseguire il test. La rottura è netta e si propaga velocemente. L'unica eccezione è rappresentata dalle celle da 3mm che essendo più dense mostrano un comportamento più simile alle BCCZ. Dopo il primo piano di scorrimento se ne innesca un secondo a 45°, nelle celle da 3mm questo piano è parallelo al primo.



Figure 33 Provini ROM in AlSi10Mg da 3mm, 5mm e 7mm



Figure 34 A sinistra piano di rottura innescato sul lato del provino. A destra vista del piano di rottura di 45°

Di seguito è possibile osservare i grafici Deformazione-Tempo per le varie prove. Queste mostrano una buona ripetibilità.

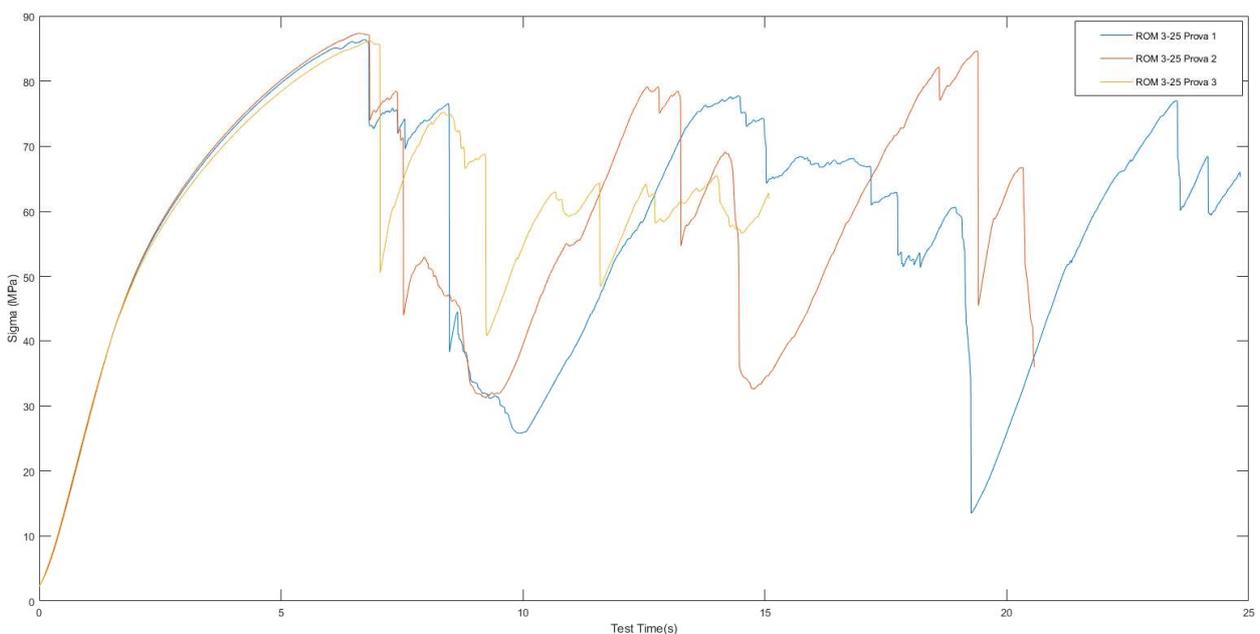


Figure 35 Risultati compressione ROM 3-25

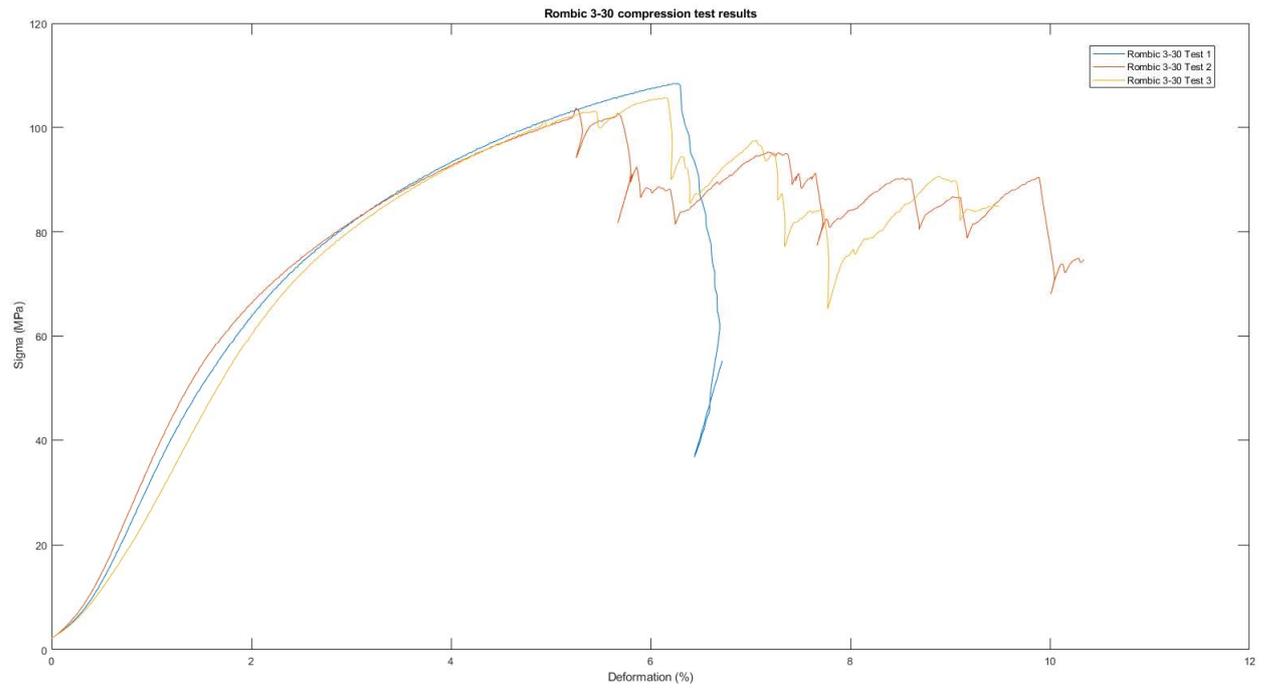


Figure 36 Risultati compressione ROM 3-30

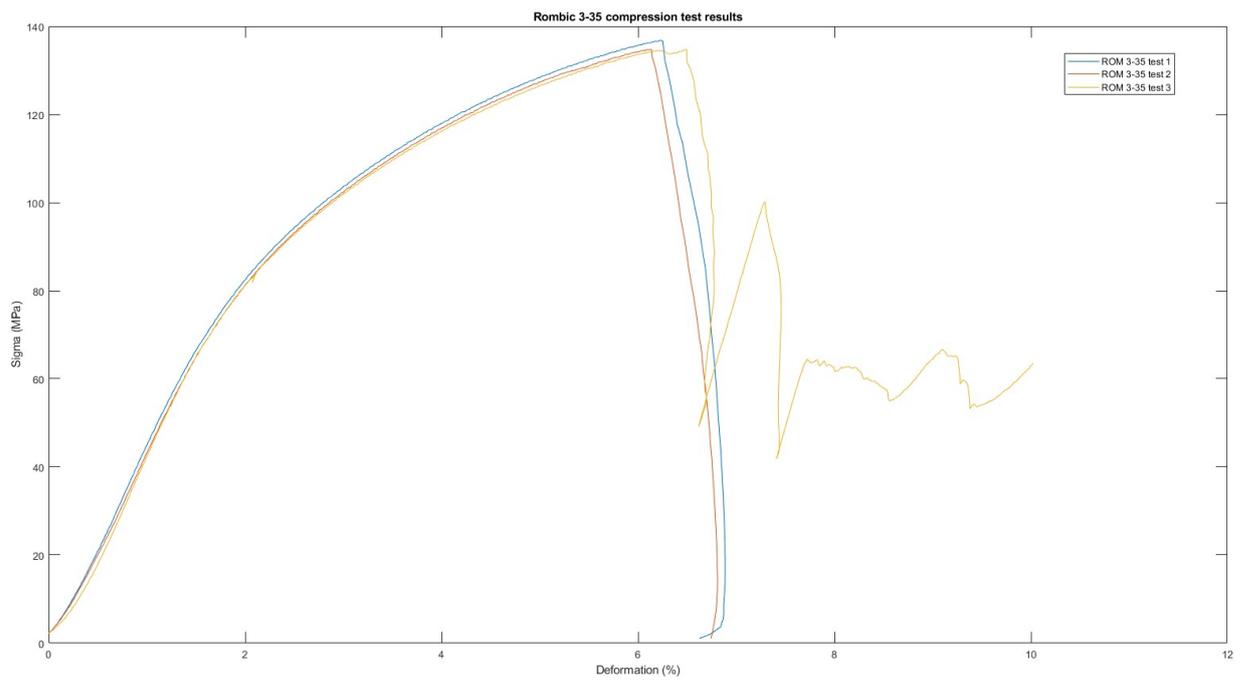


Figure 37 Risultati compressione ROM 3-35

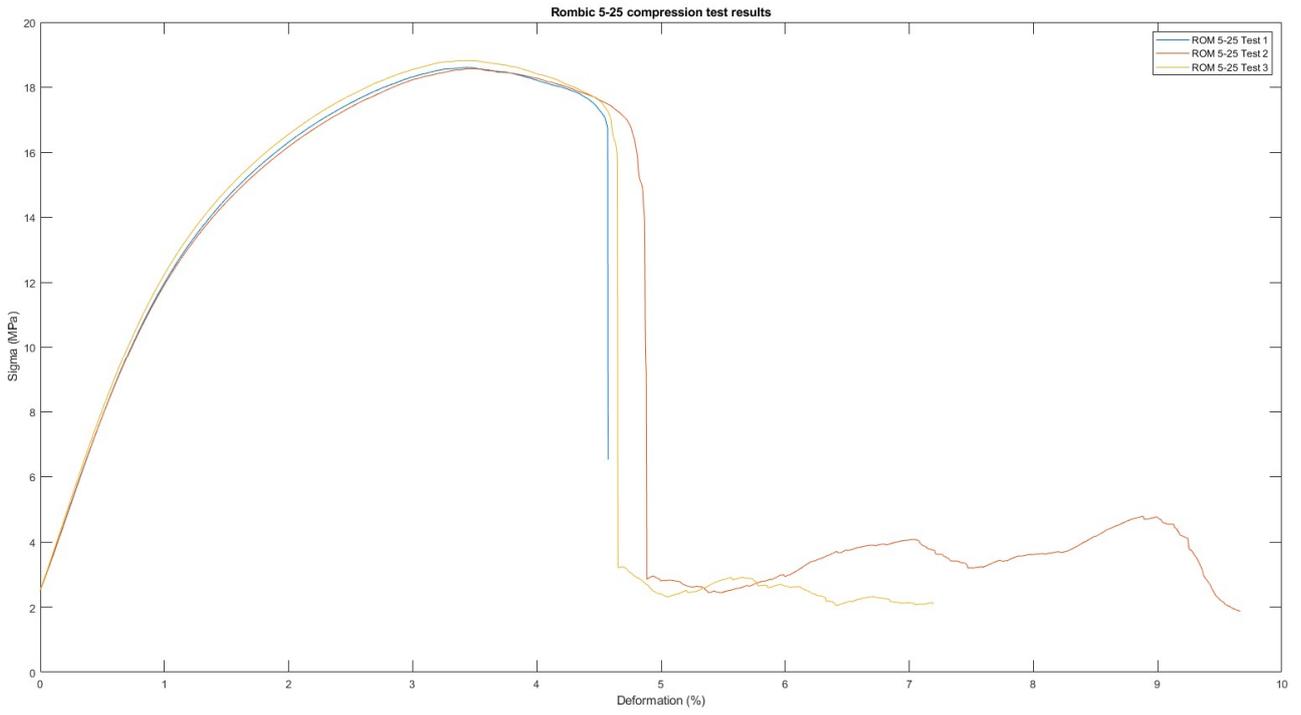


Figure 38 Risultati compressione ROM 5-25

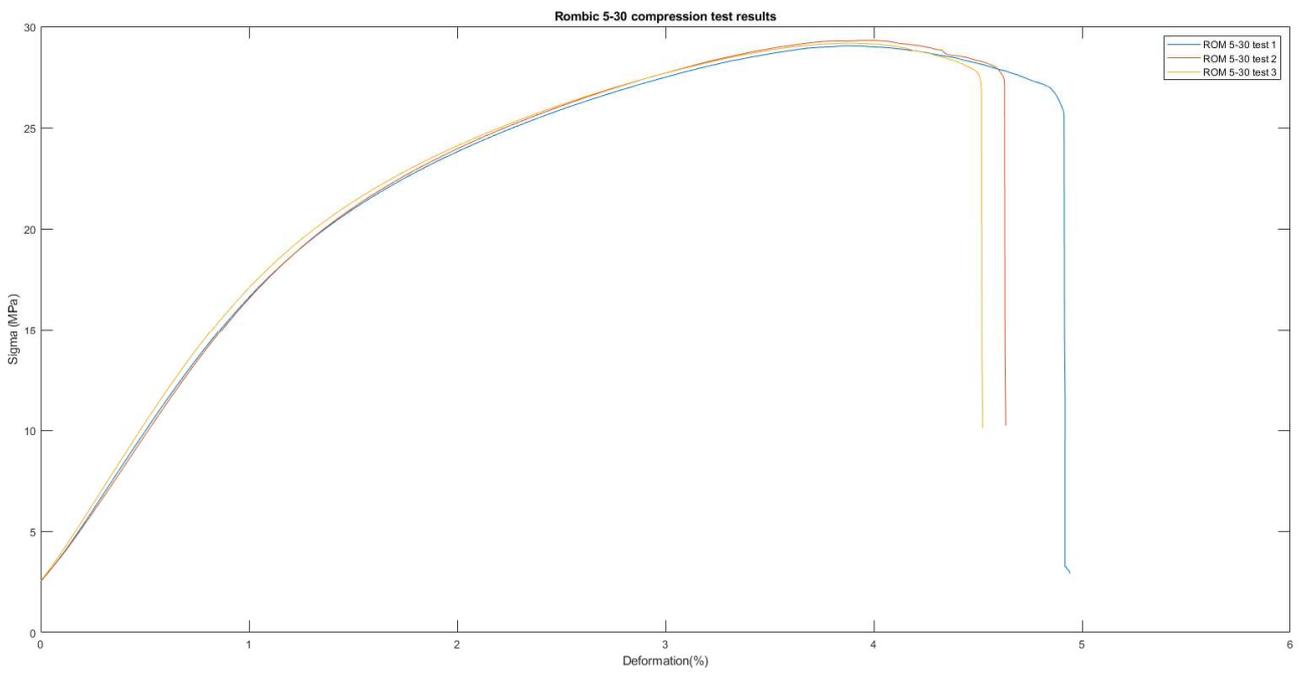


Figure 39 Risultati compressione ROM 5-30

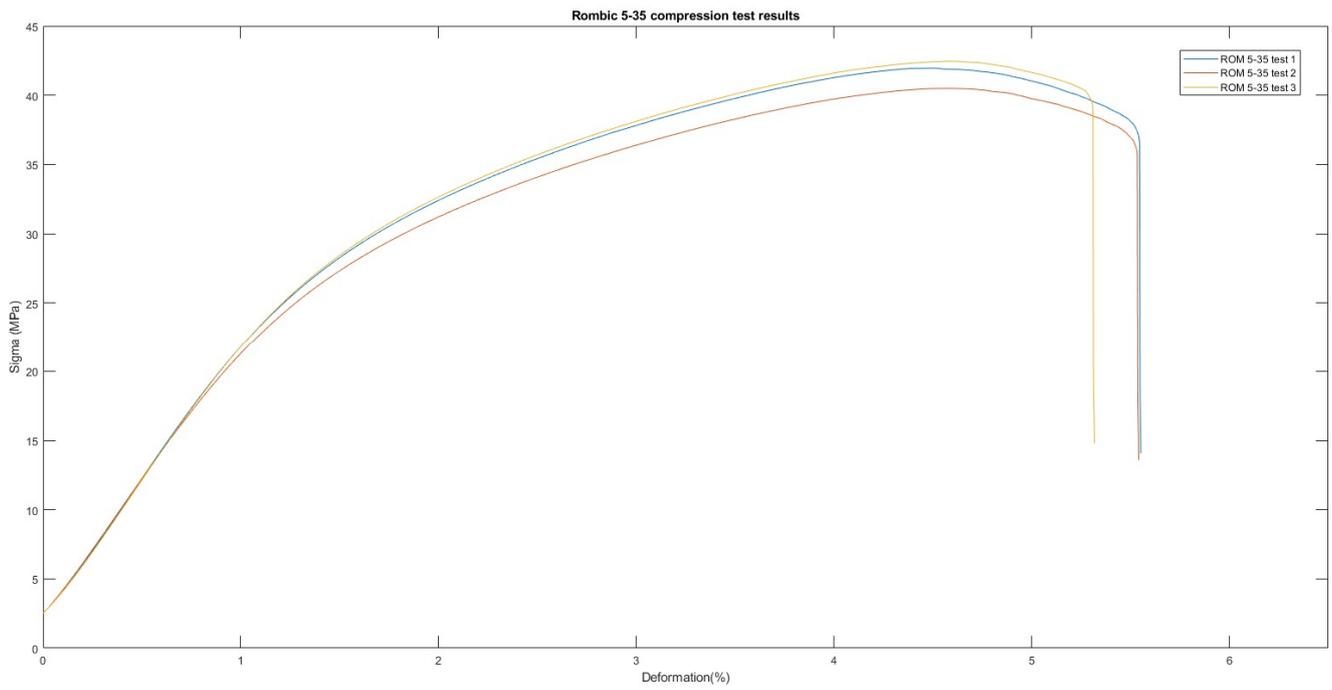


Figure 40 Risultati compressione ROM 5-35

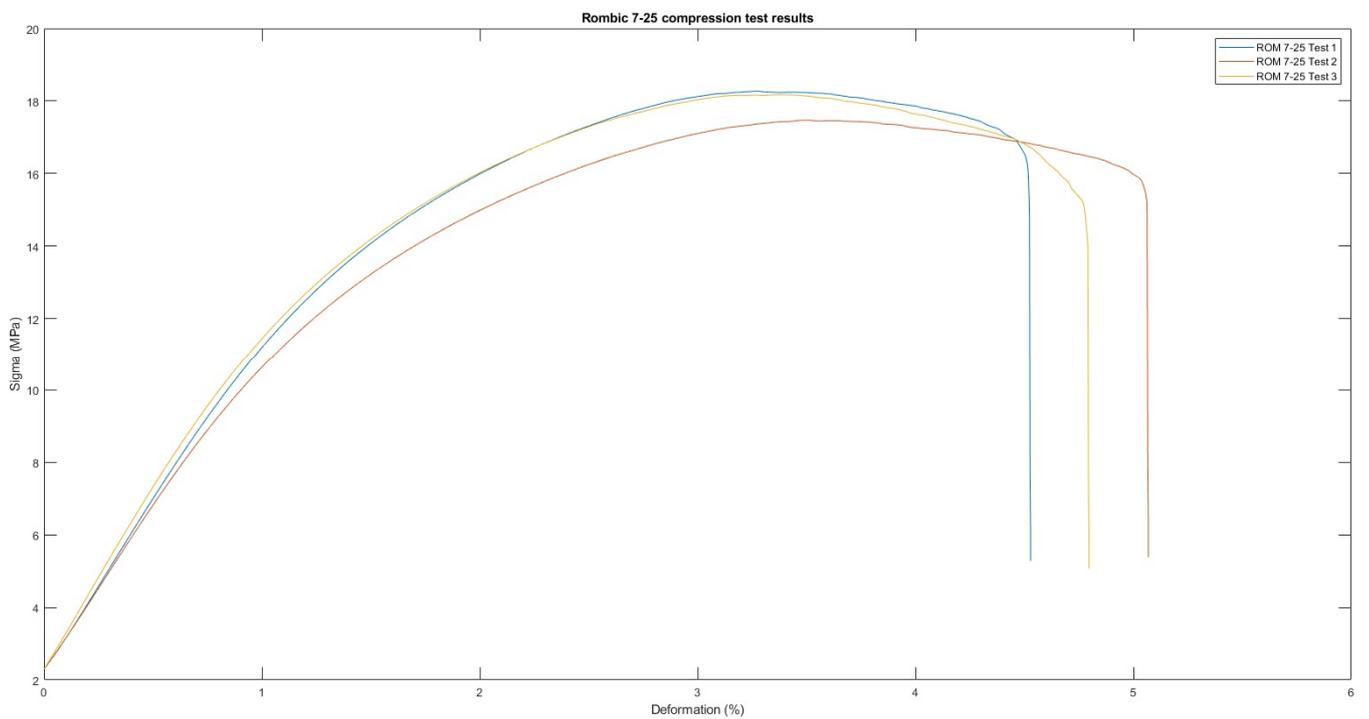


Figure 41 Risultati compressione ROM 7-25

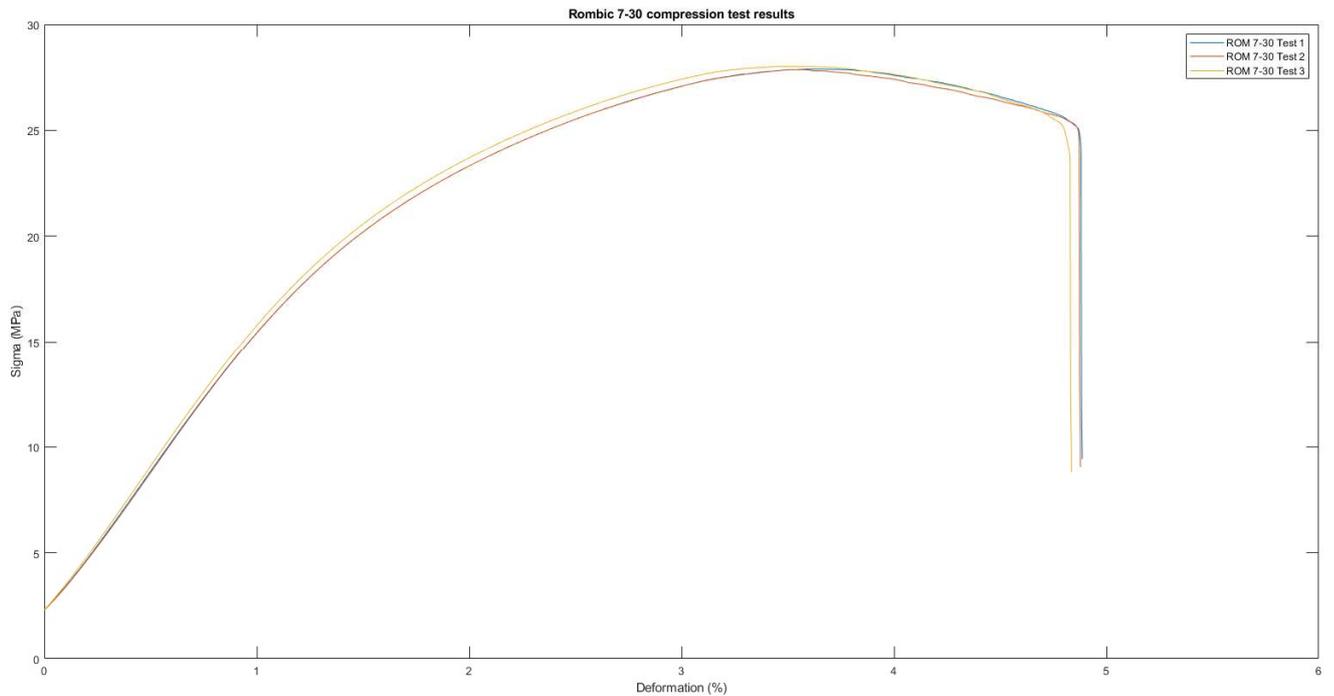


Figure 42 Risultati compressione ROM 7-30

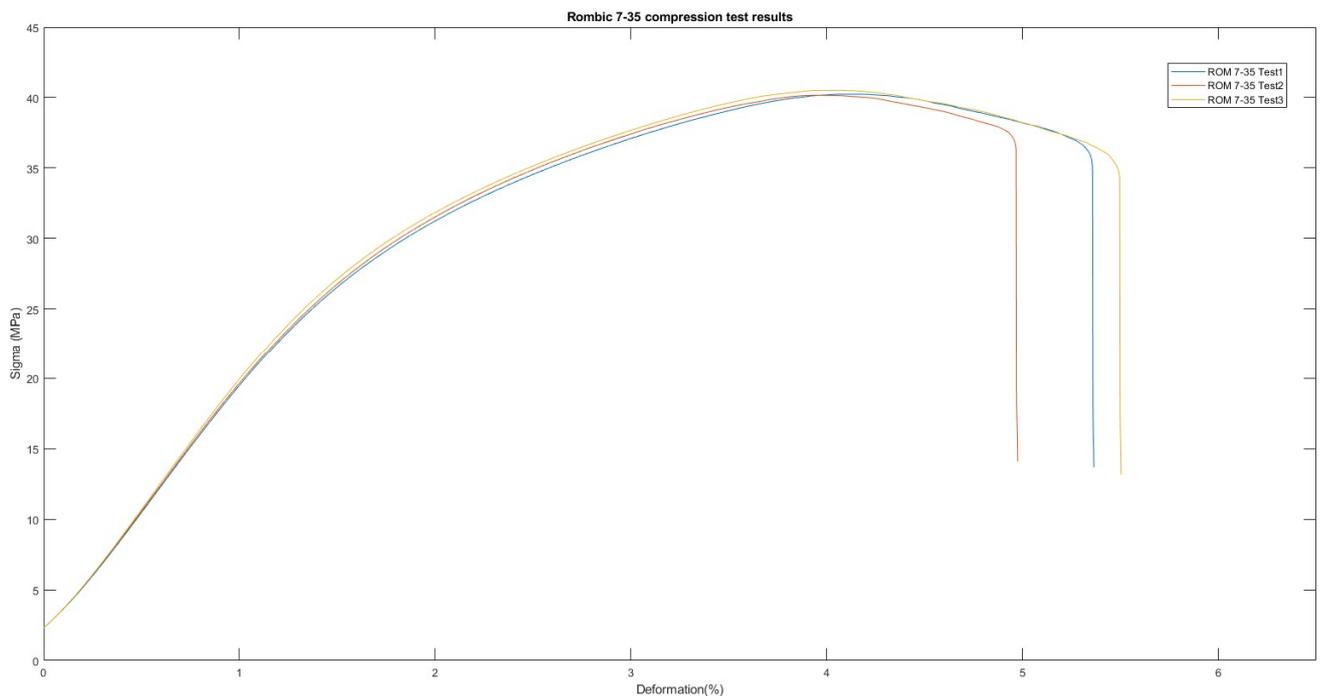


Figure 43 Risultati compressione ROM 7-35

Come affermato precedentemente, solo le celle da 3mm mostrano delle oscillazioni tra il tratto elastico e il cedimento, tutte le altre dimensioni di cella portano ad un comportamento fragile.

Inoltre coerentemente con gli studi di Gibson e Ashby densità maggiori portano a delle caratteristiche meccaniche migliori.

4.1.6 BCCZ AlSi10Mg

I provini realizzati con celle BCCZ sono mostrati in figura, hanno dimensione rispettivamente di 3mm, 5mm e 7mm. Tutti i provini mostrano una rottura dovuta al cedimento per Buckling degli elementi verticali e successiva formazione di un piano di scorrimento di 45° rispetto all'asse Z. La rottura si innesca sempre da un lato del provino (a differenza delle celle Rombic dove avveniva ad una estremità del provino). Questa tipologia di celle presenta il fenomeno della densificazione (anche detta "Callum" in ambito biomedico) se la prova prosegue dopo lo scorrimento del primo piano osserviamo un aumento della deformazione con modulo elastico prossimo a quello del tratto lineare fino ad un secondo collasso dovuto alla propagazione di un piano di frattura perpendicolare al primo. Questo comportamento è visibile in figura per le celle da 3mm.

In alcuni casi e specialmente per le celle a bassa densità (25%) la rottura è possibile che si verifichi in più punti del provino. La causa è da ricercarsi nella snellezza delle aste verticali, infatti al diminuire della densità queste diventano più snelle diminuendo la resistenza al carico di punta.



Figure 44 Provini BCCZ in AlSi10Mg con taglia di cella 3mm, 5mm e 7mm

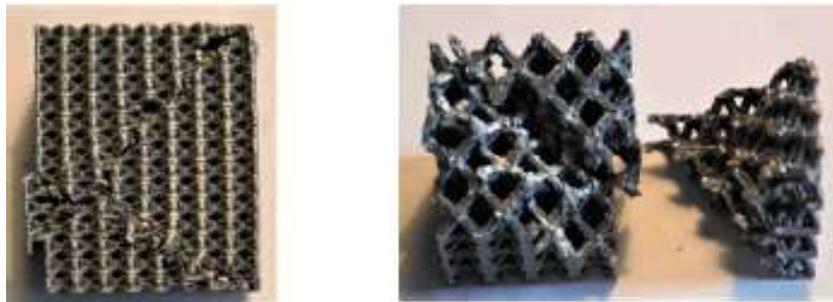


Figure 45 Piani di rottura delle celle BCCZ con i due piani di rottura a 45° in evidenza

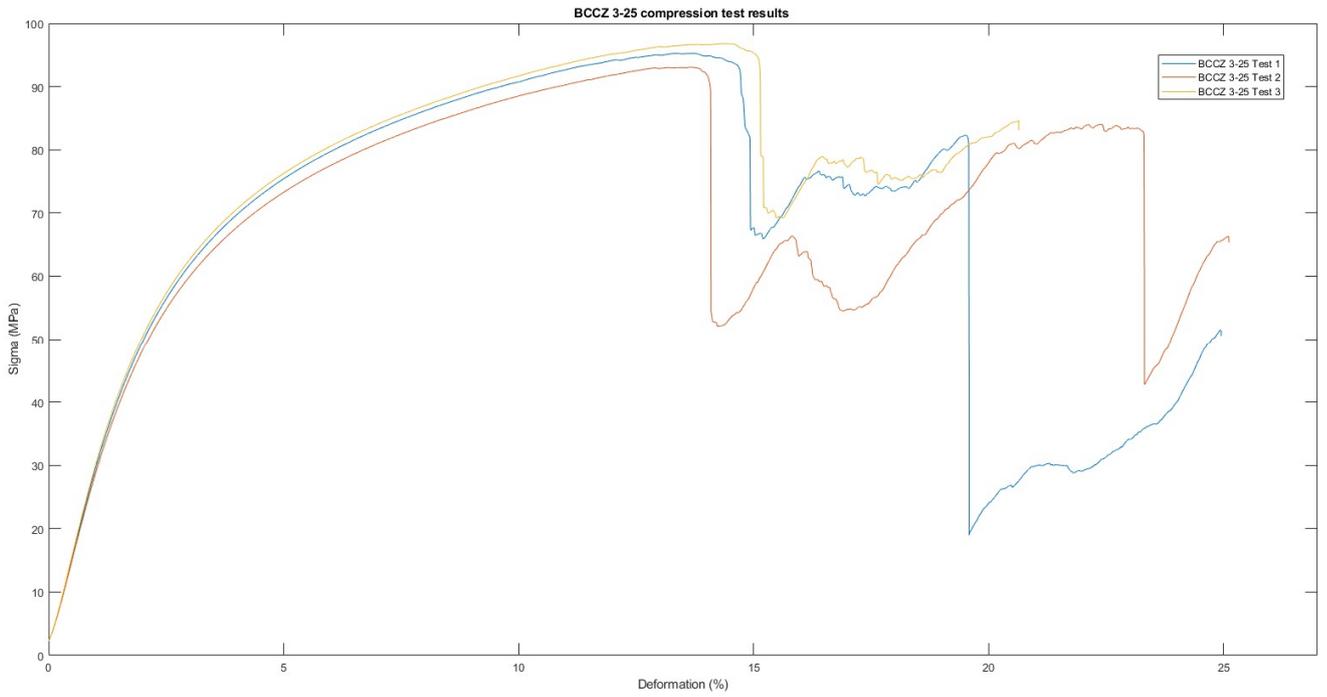


Figure 46 Risultati compressione BCCZ 3-25

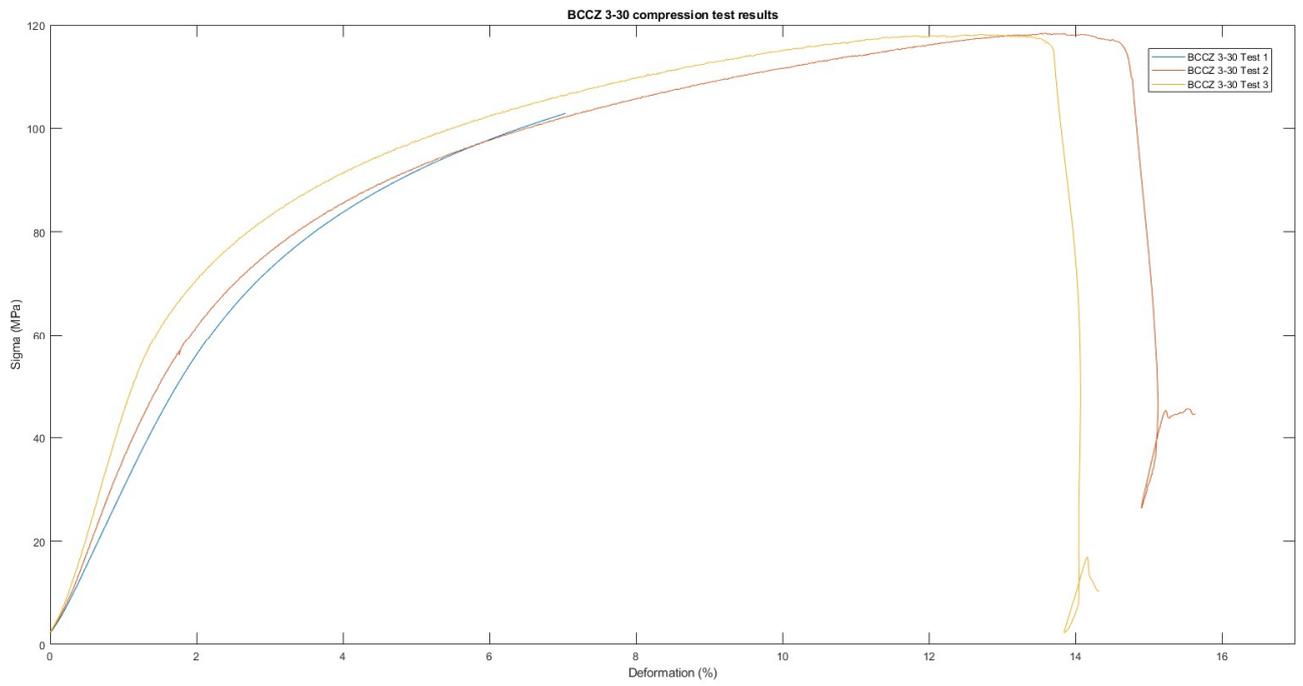


Figure 47 Risultati compressione BCCZ 3-30

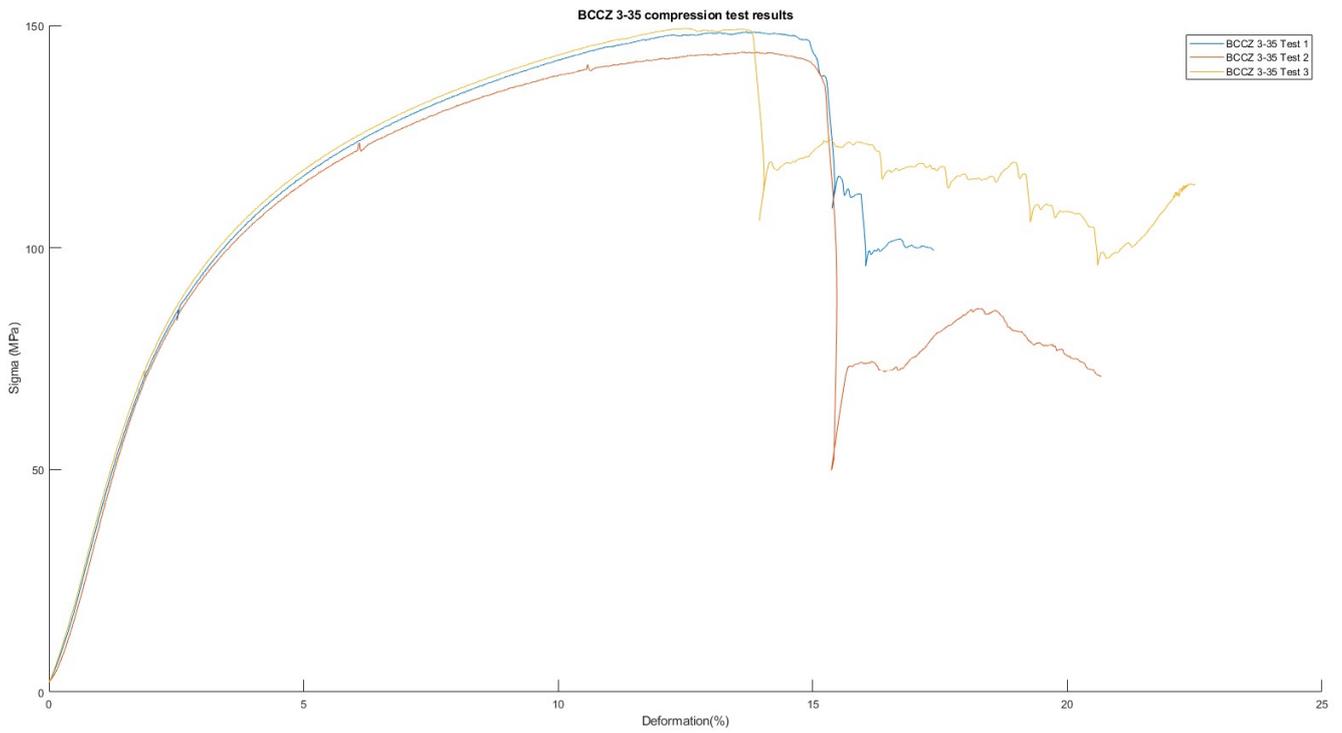


Figure 48 Risultati compressione BCCZ 3-35

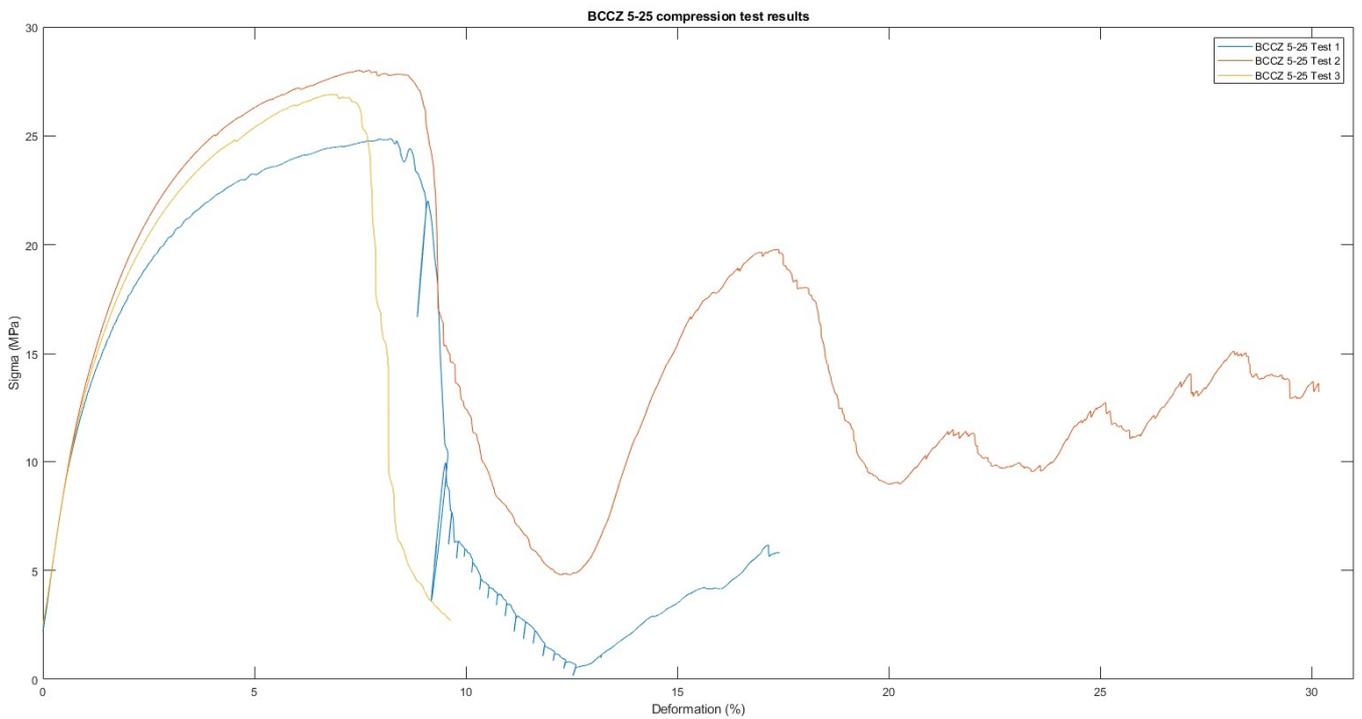


Figure 49 Risultati compressione BCCZ 5-25

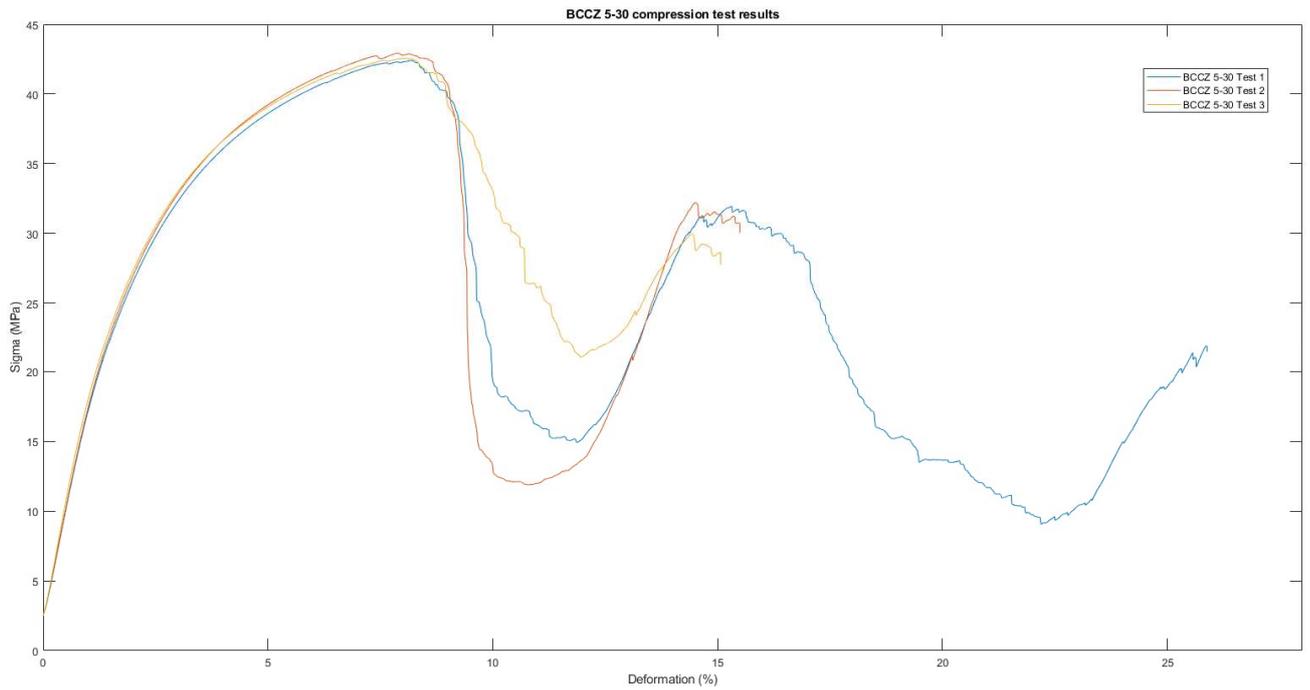


Figure 50 Risultati compressione BCCZ 5-30

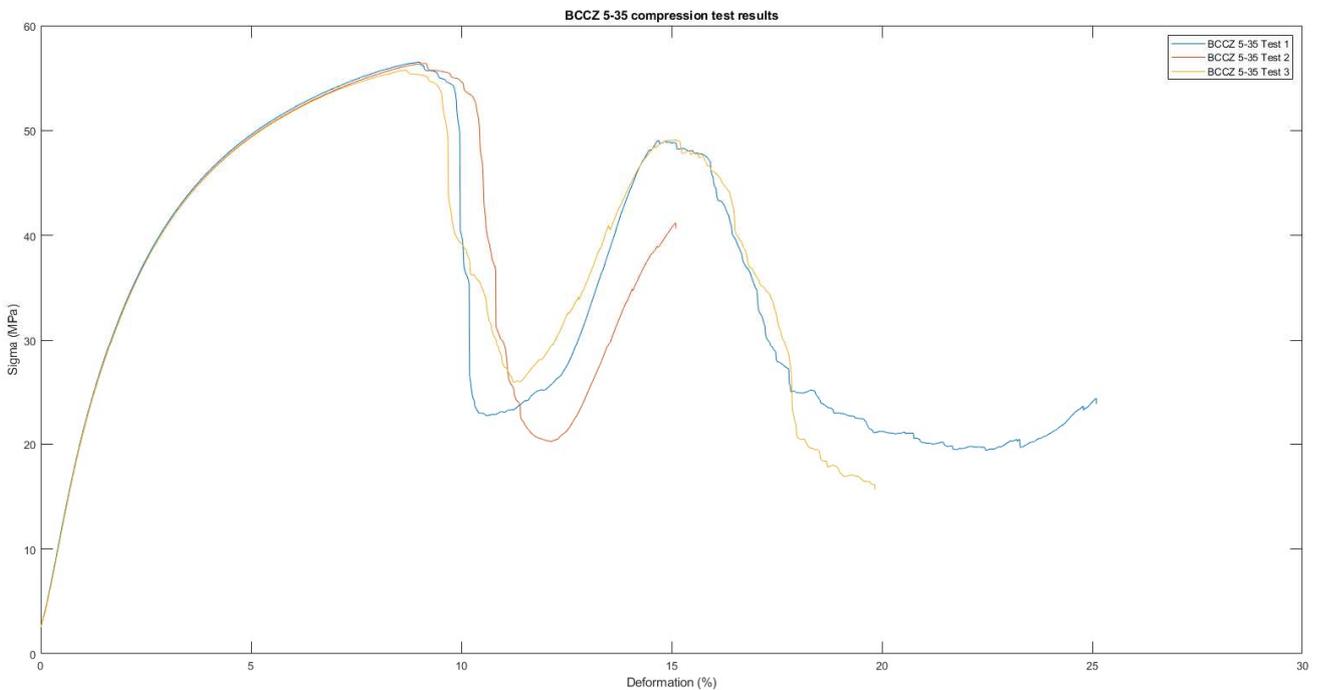


Figure 51 Risultati compressione BCCZ 5-35

In figura 51 è possibile osservare il grafico Stress-Strain completo per la prova a compressione che prosegue dopo il cedimento del primo piano. Si verifica un incremento delle proprietà meccaniche

fino al raggiungimento di un secondo picco che corrisponde al cedimento di un piano perpendicolare al primo.

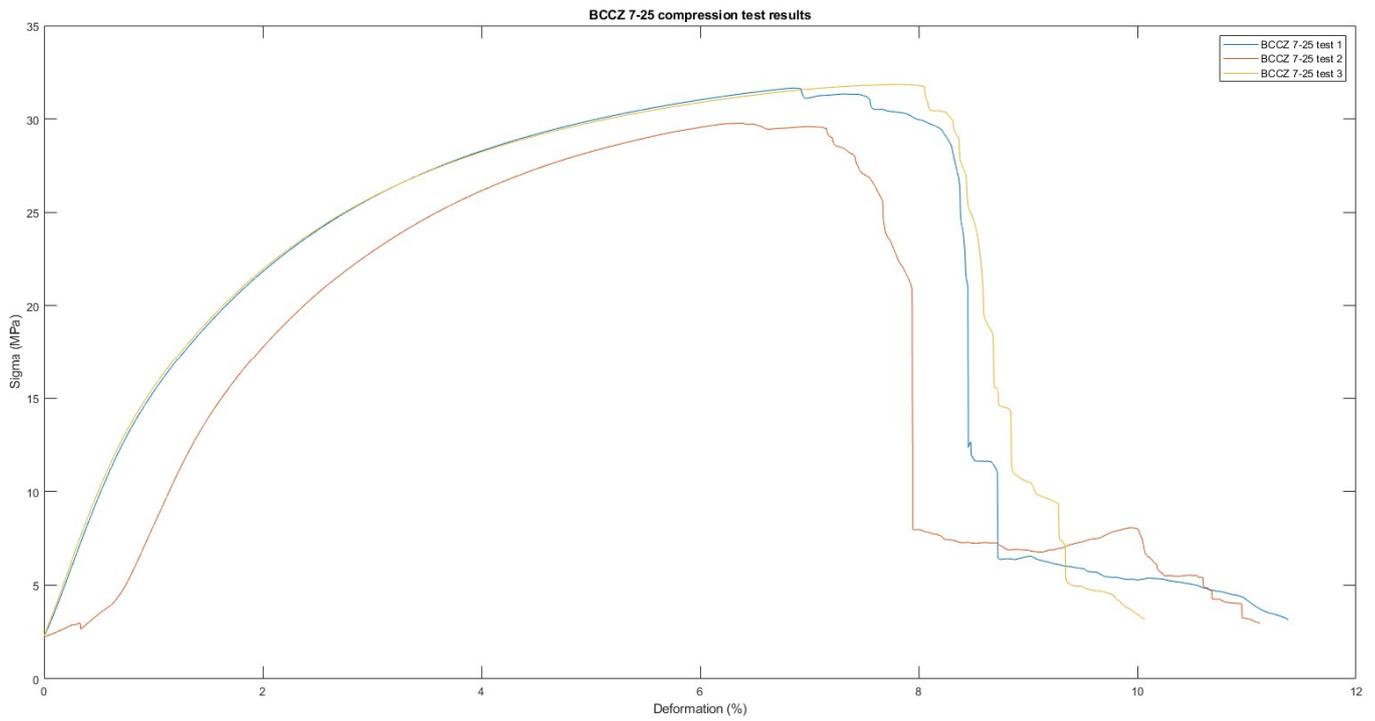


Figure 52 Risultati compressione BCCZ 7-25

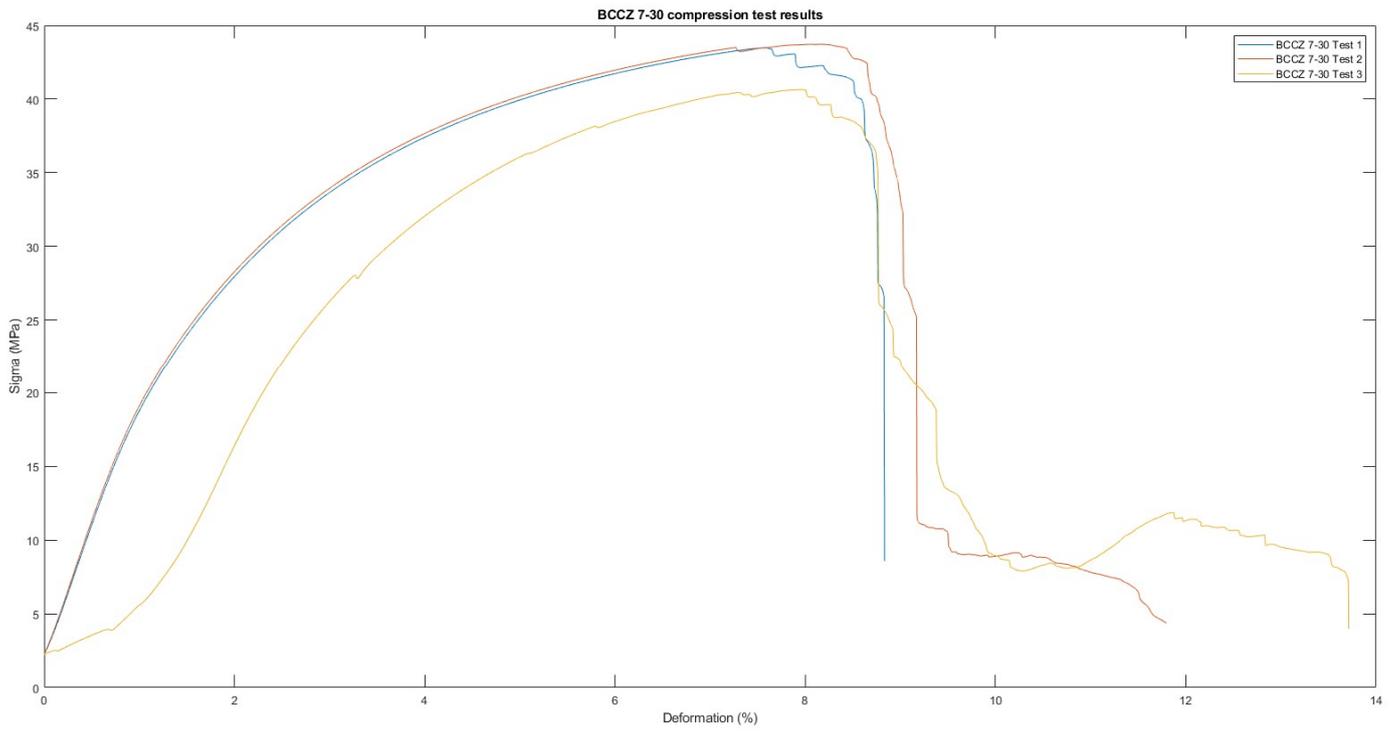


Figure 53 Risultati compressione BCCZ 7-30

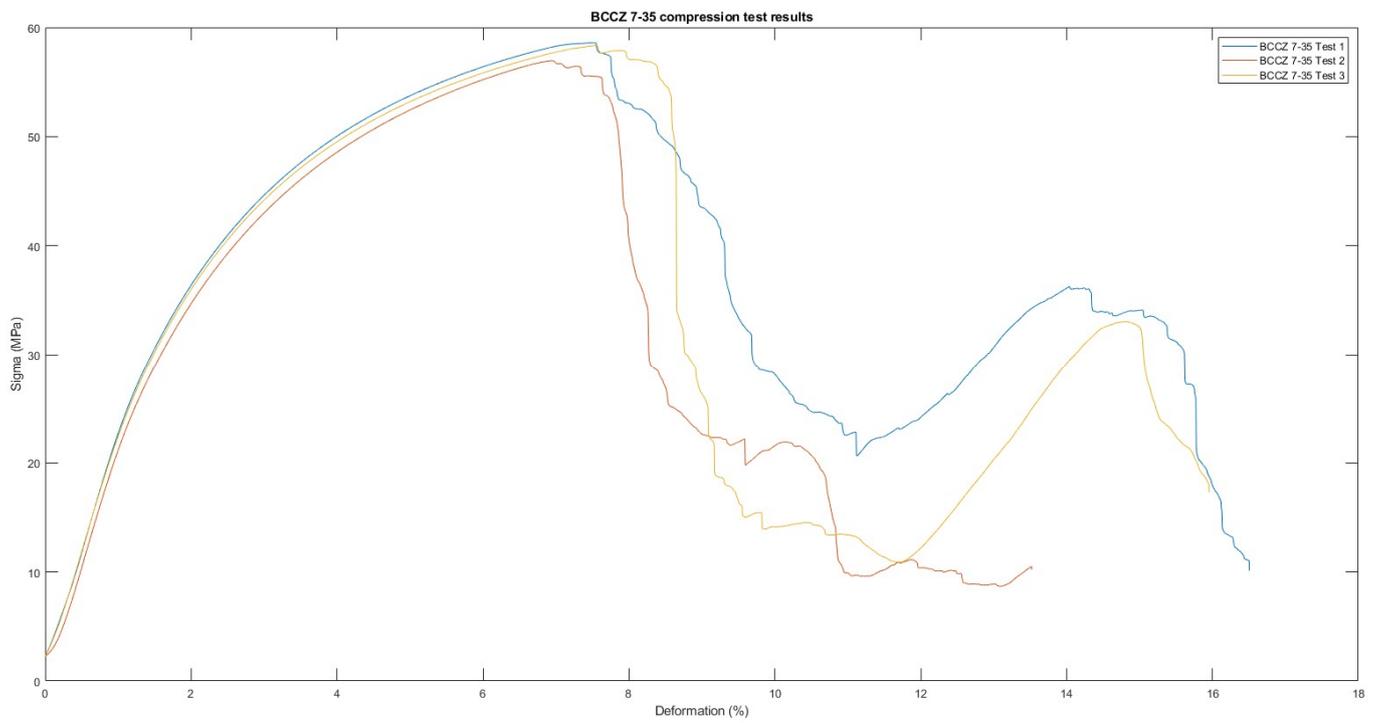


Figure 54 Risultati compressione BCCZ 7-35

4.1.7 Rombic Ti6Al4V

Il secondo materiale scelto per i test sperimentali è la lega di Titanio Ti6Al4V. Questo materiale è scelto per poter nel futuro valutare dei pannelli anti-ghiaccio per velivoli militari ad alte prestazioni. Questi aerei sono supersonici e devono confrontarsi con una grande quantità di calore prodotta. Inoltre la lega Ti6Al4V è utilizzata ampiamente e con ottimi risultati nell'Additive Manufacturing.

I provini con celle di geometria Rombic e taglia 3mm, 5mm e 7mm sono mostrati in figura. Tutte i provini raggiungono la rottura alle aste in corrispondenza dei nodi, in modo analogo a quanto succede per i provini in lega di alluminio. La rottura porta alla formazione di un piano di rottura inclinato a 45° rispetto l'asse Z. Per questa tipologia di celle la deformazione in corrispondenza della rottura è bassa e questa è accompagnata da una violenta separazione.

Di seguito sono illustrati i grafici Sigma-Deformazione delle prove di compressione sui provini Rombic. Come è possibile vedere dai grafici le celle Rombic mostrano una bassa deformazione alla rottura, che avviene con sviluppo di un piano di rottura inclinato di 45° rispetto l'asse Z. Le proprietà meccaniche crescono con l'aumentare della densità, come previsto dal modello sviluppato da Gibson e Ashby.



Figure 55 Provini Rom in Ti6Al4V con taglia di cella 3mm, 5mm e 7mm

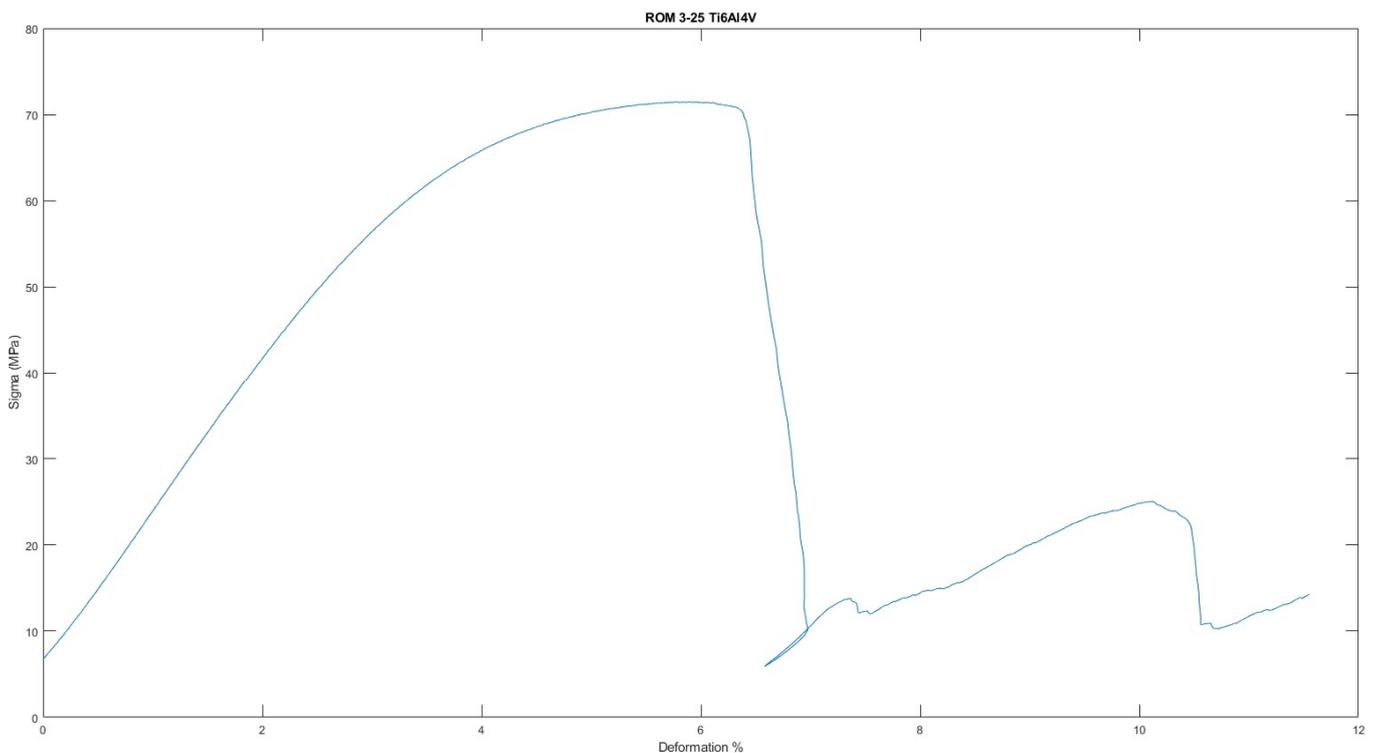


Figure 56 Risultati compressione Rom 3-25 Ti6Al4V

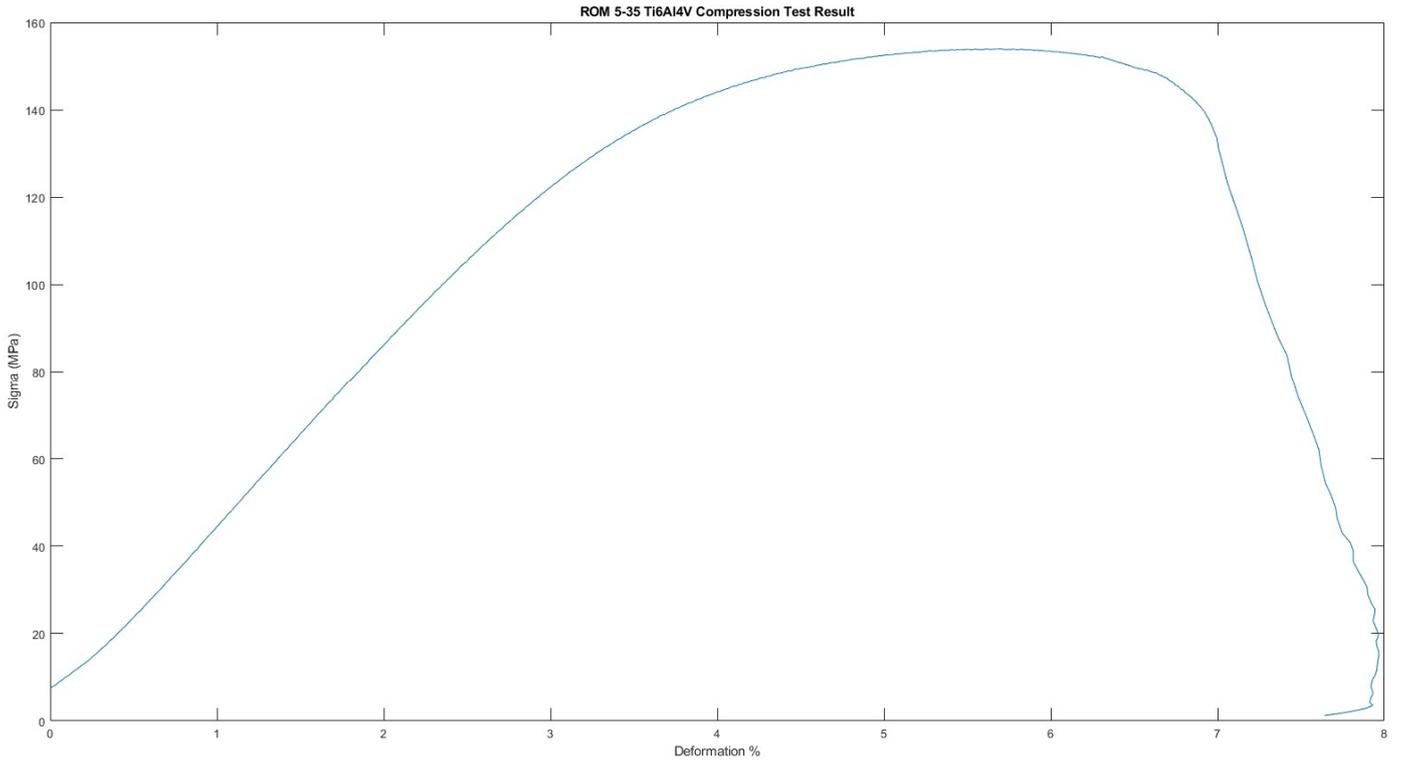


Figure 57 Risultati compressione Rom 5-35 Ti6Al4V

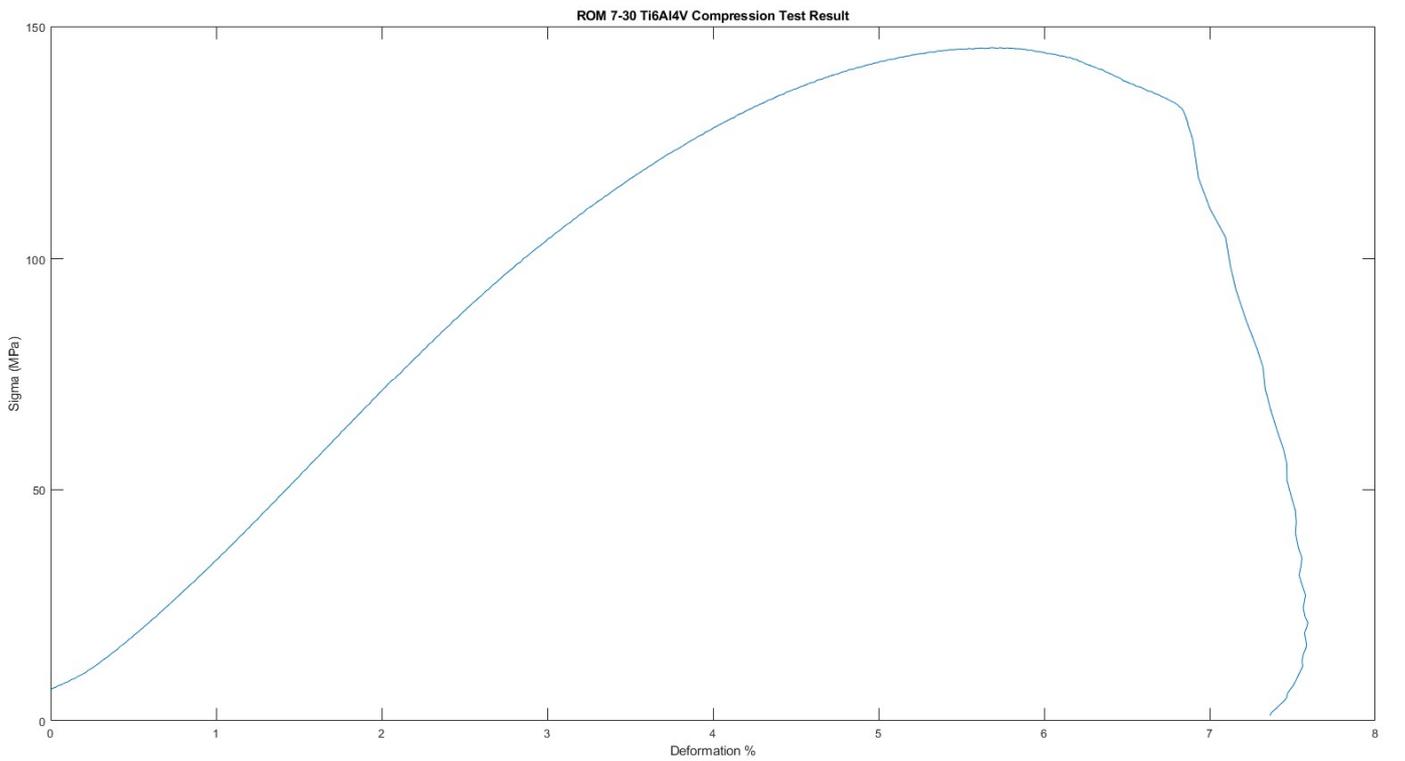


Figure 58 Risultati compressione Rom 7-30 Ti6Al4V

4.1.8 BCCZ Ti6Al4V

I provini realizzati con celle BCCZ di taglia 3mm, 5mm e 7mm sono mostrati in figura. Tutti i provini hanno mostrato una rottura dovuta al buckling degli elementi verticali e il successivo sviluppo di un piano di rottura a 45° rispetto all'asse Z. La frattura si innesca sempre da un lato del provino.



Figure 59 Provini BCCZ in Ti6Al4V con taglia di celle 3mm, 5mm e 7mm

Di seguito sono elencati i grafici Sigma-Deformazione delle prove di compressione realizzate sui singoli provini. Come è possibile osservare le celle BCCZ presentano una deformazione più elevata prima di raggiungere il punto di rottura che avviene per snervamento degli elementi verticali con conseguente collasso del piano. E' possibile constatare che con l'incremento della densità di ottiene un aumento delle proprietà meccaniche, come previsto dal modello sviluppato da Gibson e Ashby.

Le curve che otteniamo sono simili a quelle ottenute per i provini in lega di alluminio, ma in questo caso la σ_{max} è maggiore. Per questo materiale è molto difficile continuare la prova dopo il collasso del piano a 45° a causa della minore deformabilità delle leghe di titanio. Di conseguenza non abbiamo lo sviluppo di un secondo piano ma solo lo scorrimento.

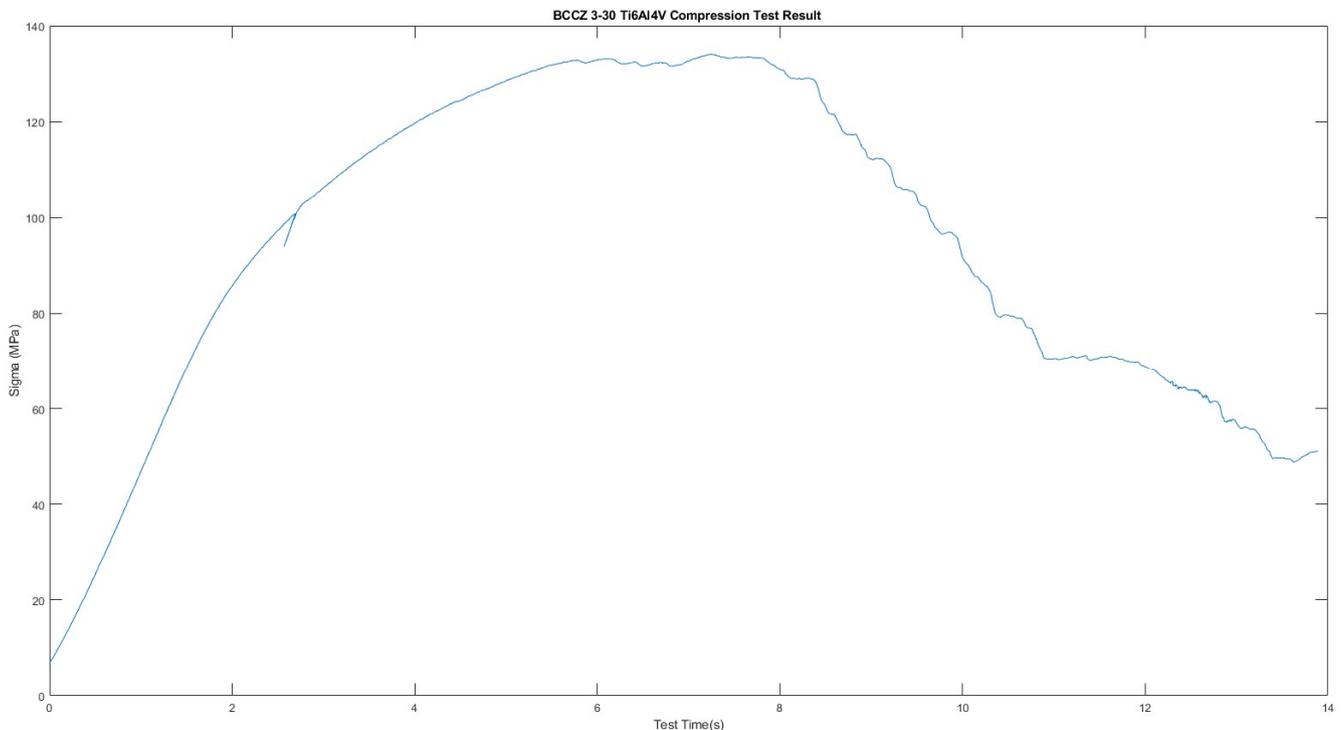


Figure 60 Risultati compressione BCCZ 3-30 Ti6Al4V

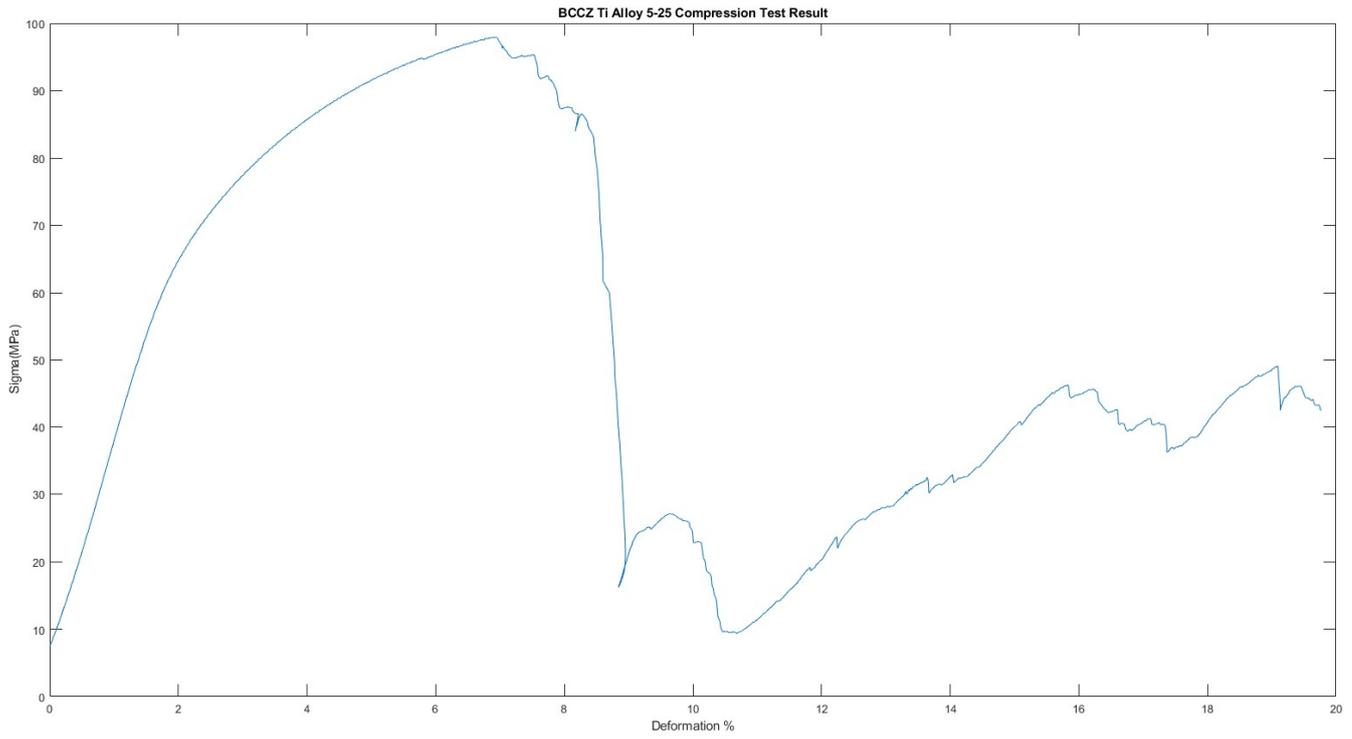


Figure 61 Risultati compressione BCCZ 5-25 Ti6Al4V

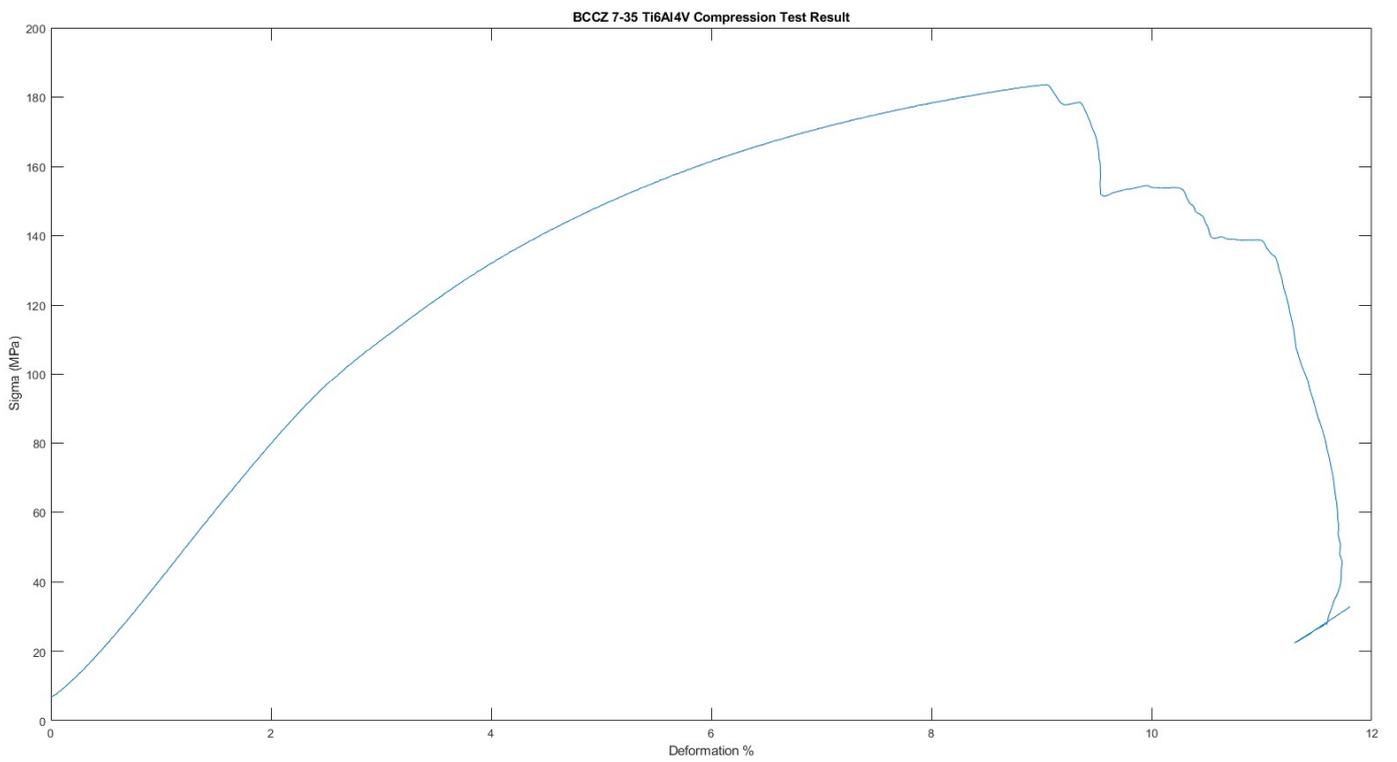


Figure 62 Risultati compressione BCCZ 7-35 Ti6Al4V

4.1.9 Considerazioni Finali

Questo primo set di prove sperimentali ha lo scopo, all'interno del progetto del pannello antighiaccio, di definire quali celle sono adattabili al tipo di utilizzo. Data la natura non specifica delle prove questi risultati costituiscono un ottimo "banco prova" per poter testare i modelli Reologici (o altri non presi in considerazione in questa sede) e per utilizzi diversi sia da un pannello antighiaccio che da un utilizzo strettamente correlato all'aeronautica.

E' necessario prestare attenzione alle differenze che emergono dai confronti tra i vari grafici delle prove effettuate. Le celle Rombic mostrano una bassa deformazione prima della rottura mentre le BCCZ deformano di più e presentano il fenomeno di densificazione.

Riguardo le caratteristiche meccaniche le celle BCCZ mostrano una σ_{max} maggiore rispetto alle Rombic.

Analizzando la dimensione di celle abbiamo che le celle con taglia 3mm hanno migliori caratteristiche meccaniche rispetto alle celle da 5mm e 7mm. Questo è dovuto ad una densità maggiore a causa delle difficoltà dello smaltimento della polvere in eccesso nel processo di fusione selettiva. A causa di questo problema si sconsiglia l'utilizzo di questa taglia per oggetti che coinvolgono il passaggio di fluidi. Le differenze tra le celle da 5mm e quelle da 7 risultano trascurabili.

5 Risultati Confronto

Nel seguente capitolo è descritto il modello ed il processo di ottimizzazione dei parametri caratteristici del modello. L'idea alla base dell'ottimizzazione è ottenere una base dati abbastanza ampia per poter nel futuro creare delle mappe di questi parametri.

5.1 Risultati e confronto numerico-sperimentale

Di seguito sono esposti i risultati dell'ottimizzazione dei parametri del modello Kelvin esposto nel capito 3. Il modello viene passato al tool di Simulink di Parameter Estimation e per ogni prova vengono calcolati i parametri. Le prove vengono eseguite per le geometri ROM e BCCZ fino al collasso del primo elemento. Inoltre vengono eseguite un secondo set di prove per valutare le performance del modello nel campo dei grandi spostamenti.

5.1.1 Rombic

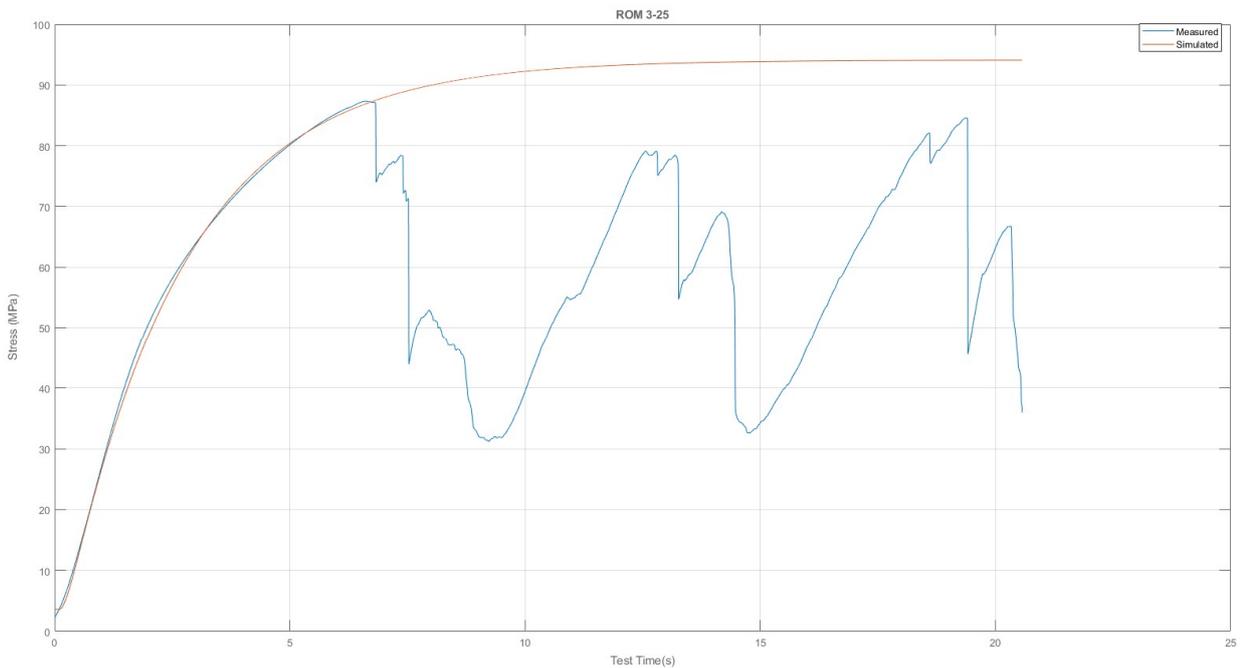


Figure 63 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 3-25

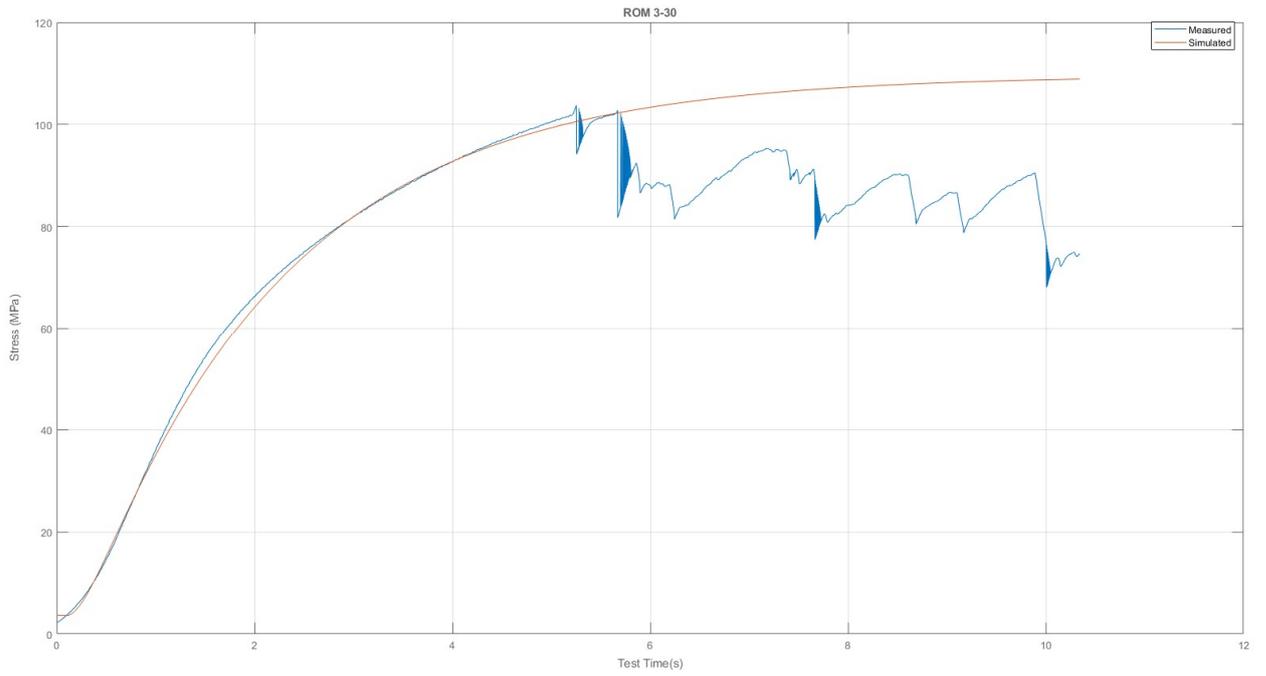


Figure 64 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 3-30

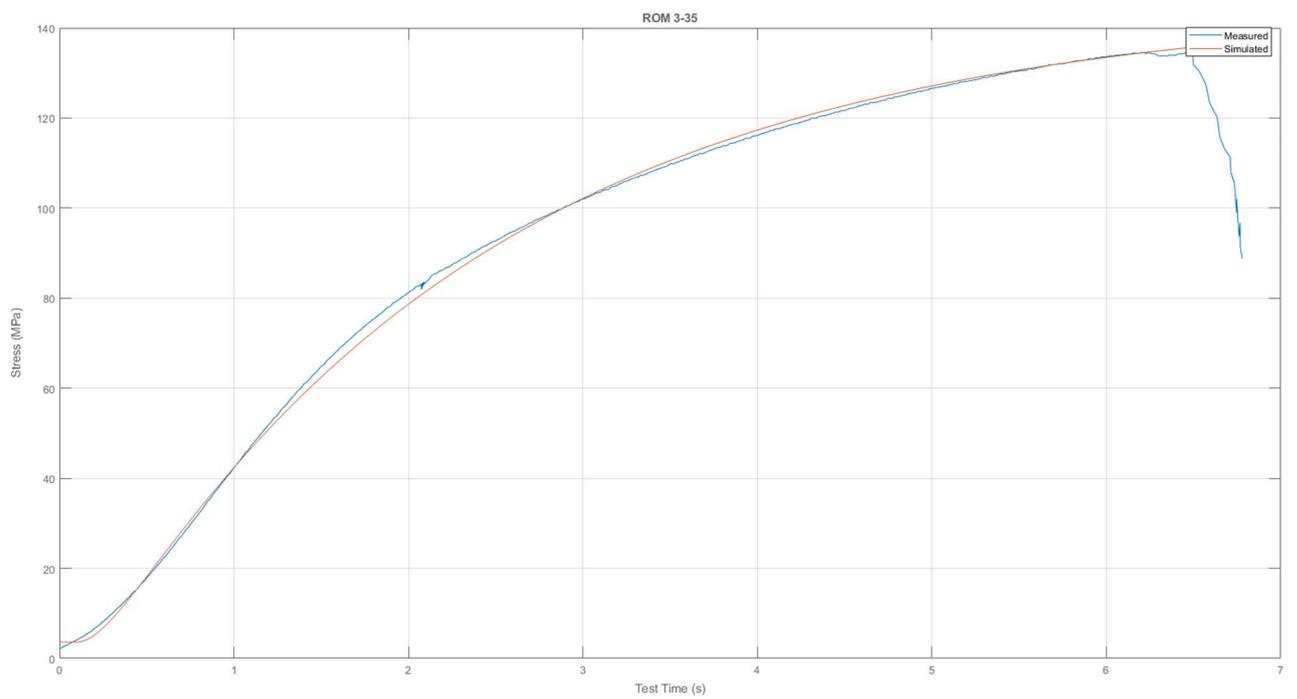


Figure 65 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 3-35

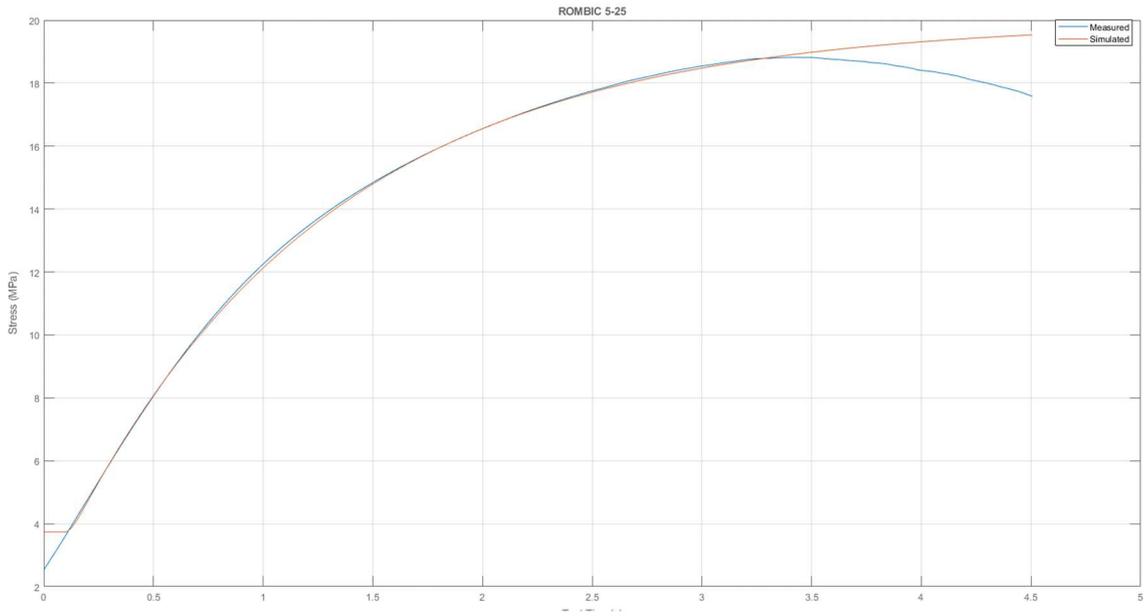


Figure 66 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 5-25

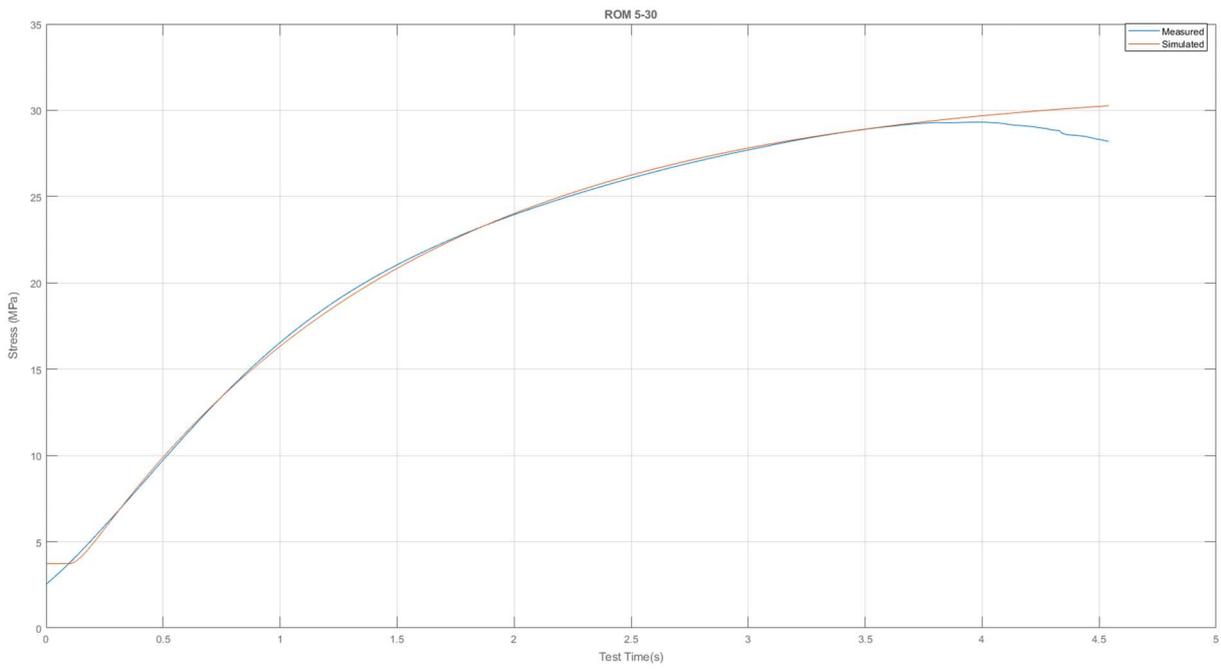


Figure 67 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 5-30

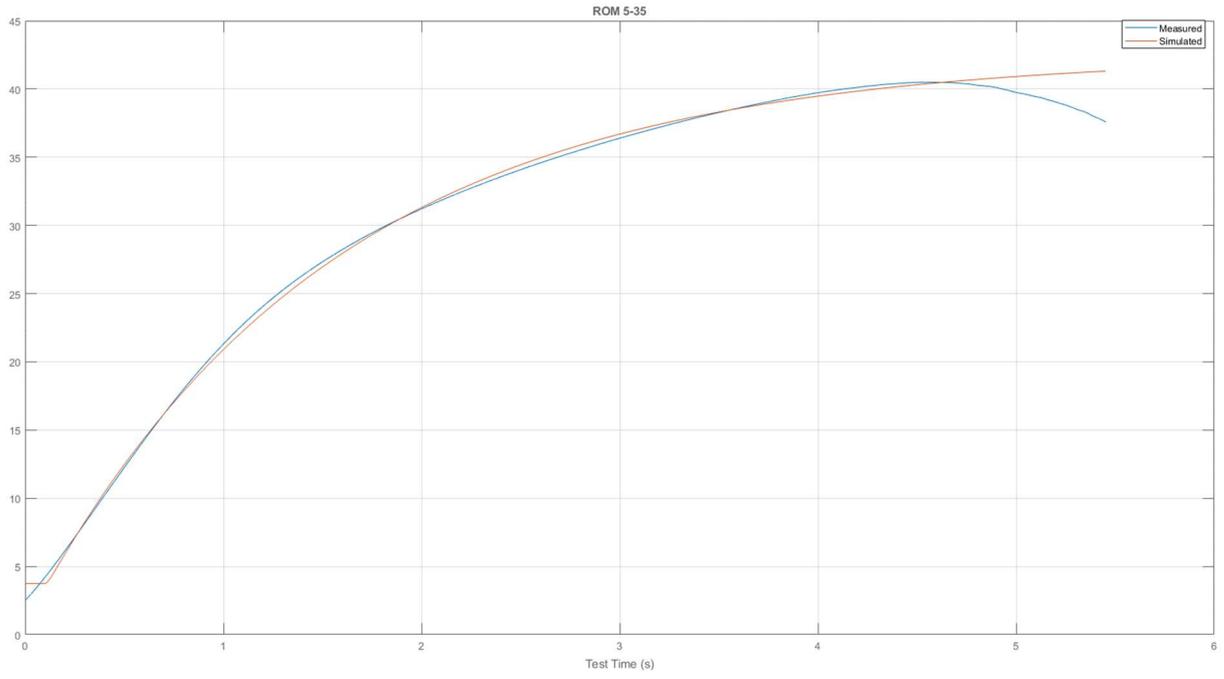


Figure 68 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 5-35

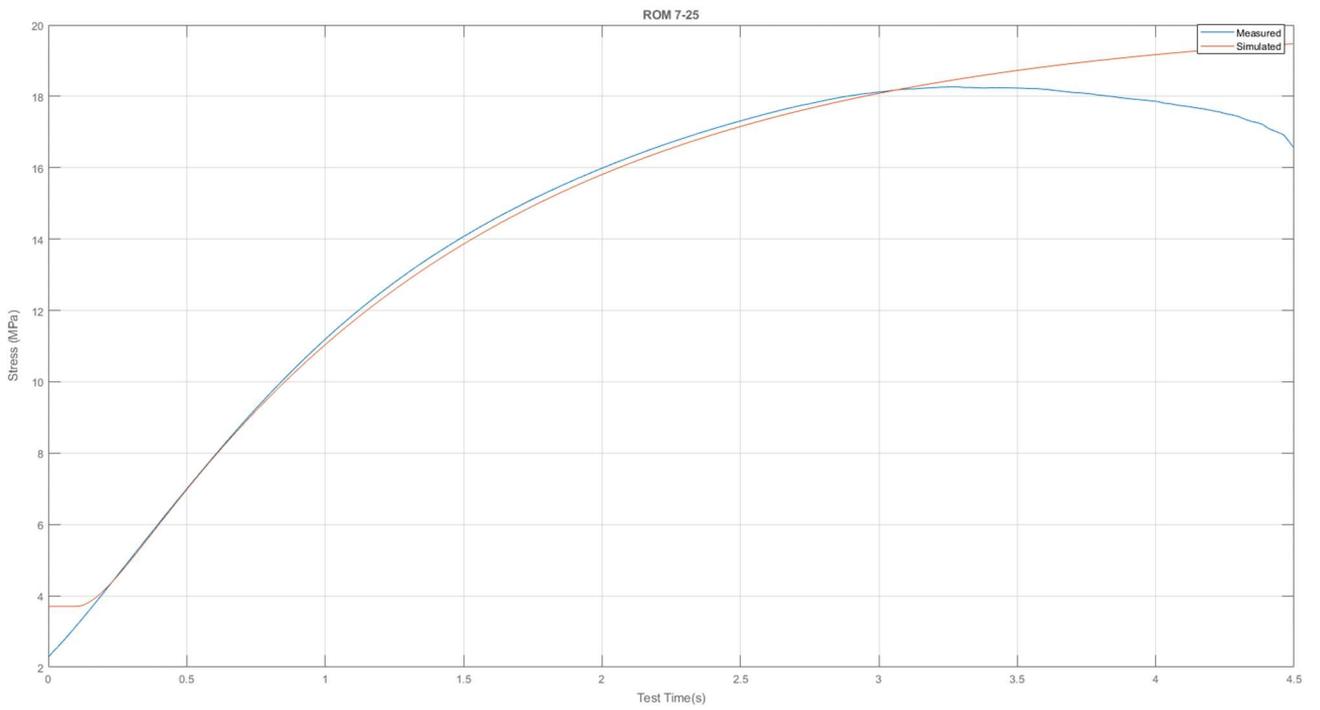


Figure 69 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 7-25

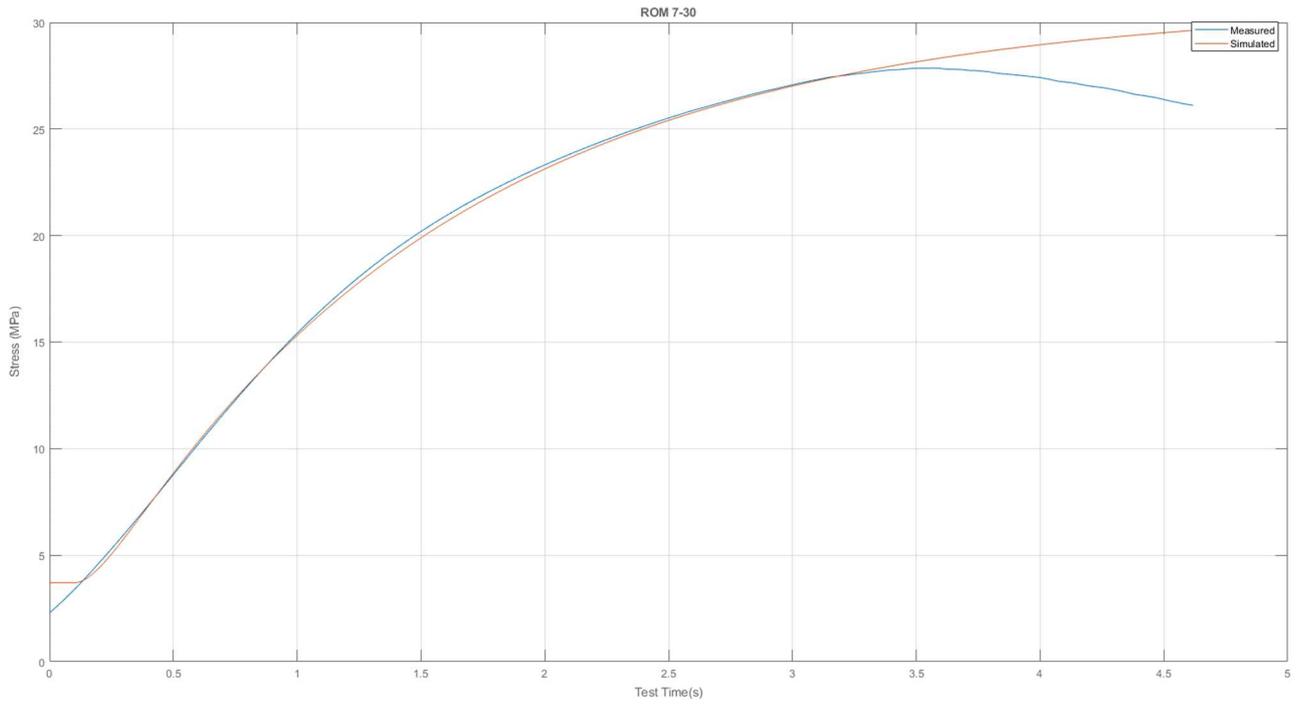


Figure 70 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 7-30

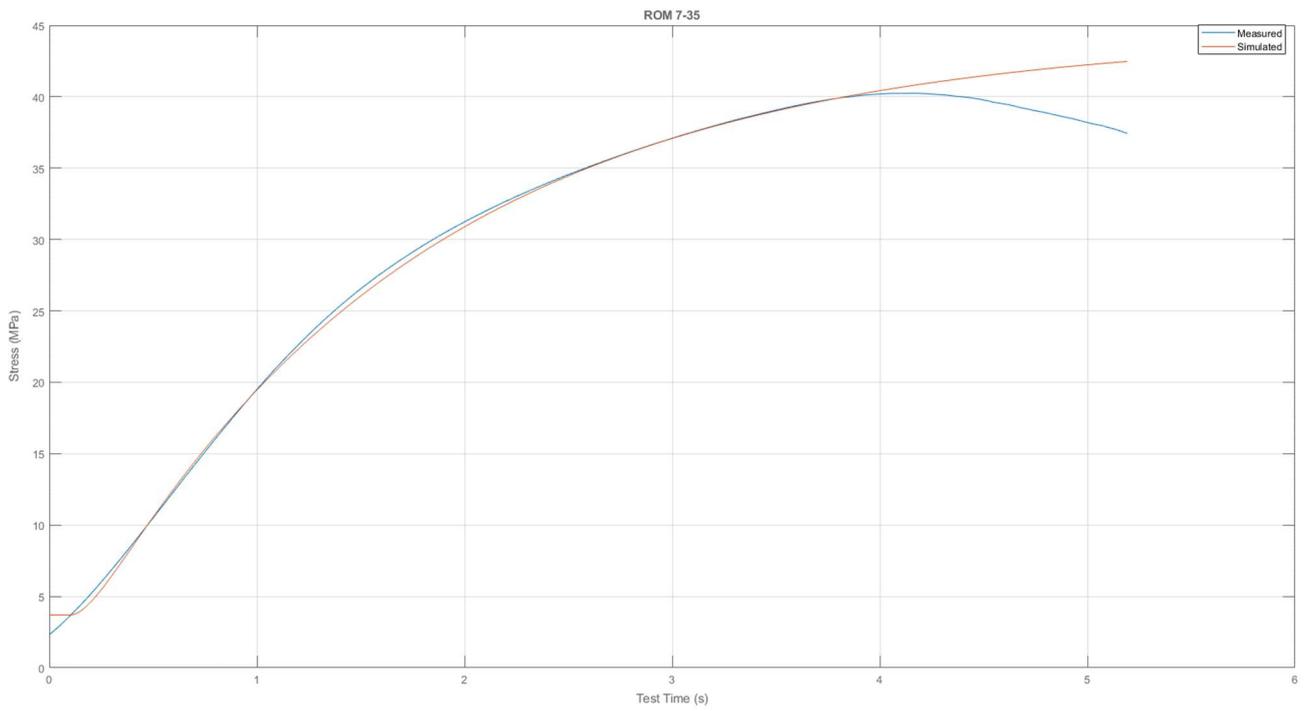


Figure 71 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 7-35

Per i provini in Ti6AlV abbiamo:

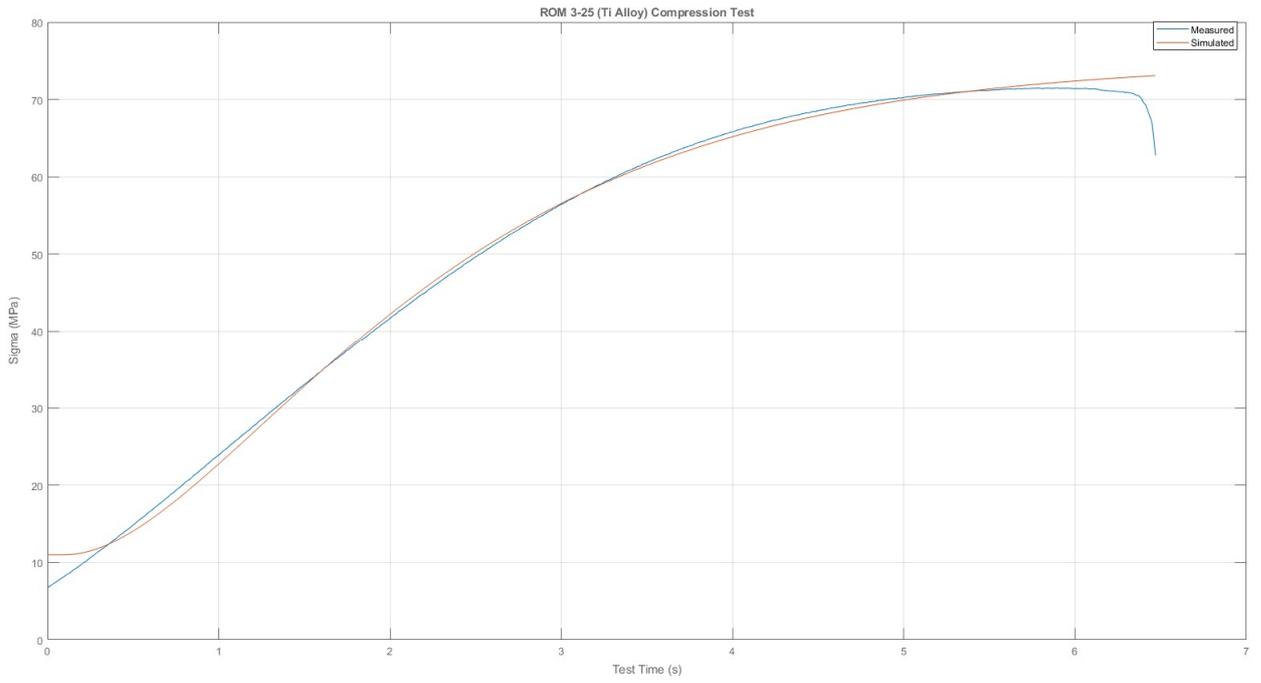


Figure 72 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 3-25 Ti6Al4V

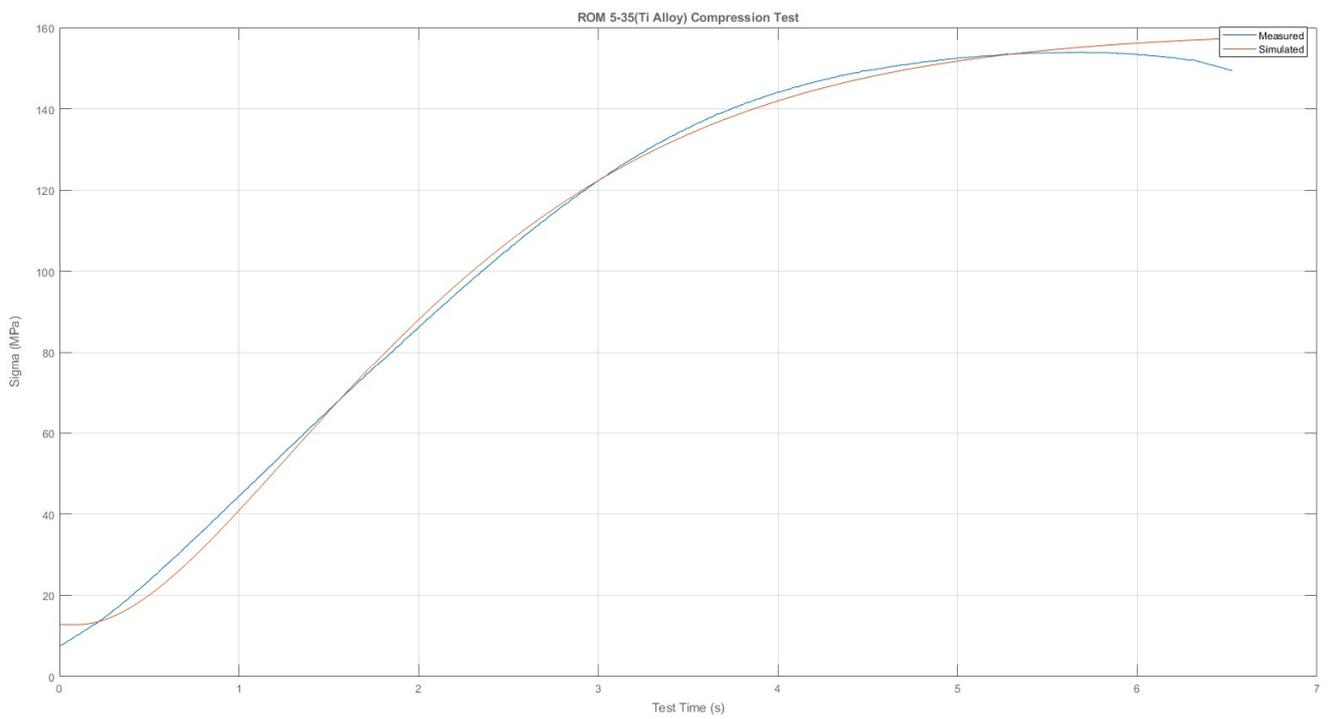


Figure 73 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 5-35 Ti6Al4V

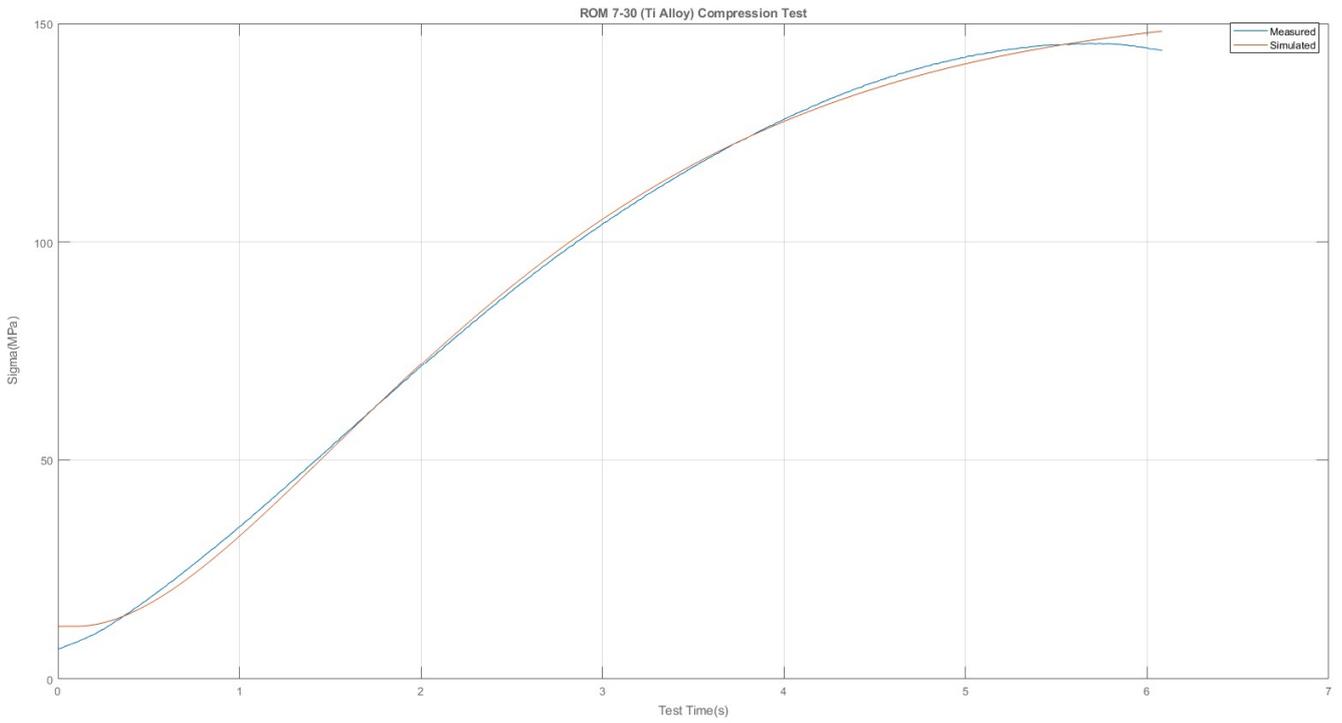


Figure 74 Grafico Sigma-Tempo per cella Rombic 7-30 Ti6Al4V

5.1.2 BCCZ

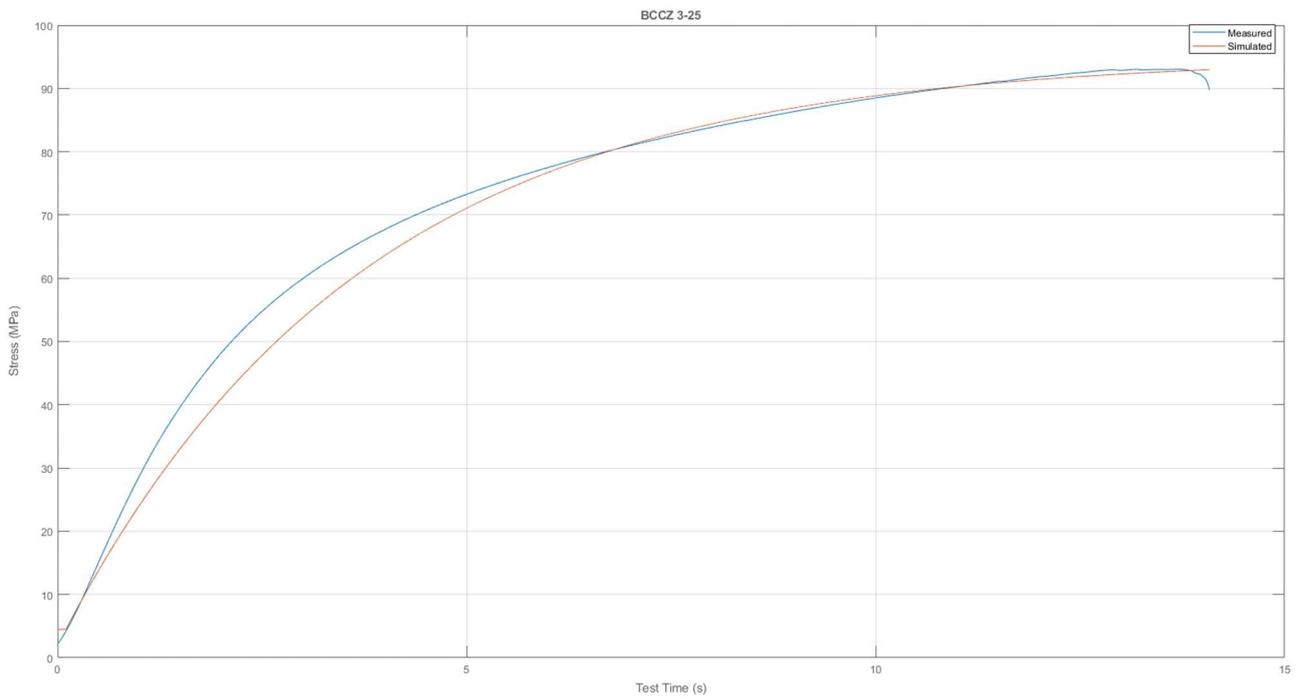


Figure 75 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-25

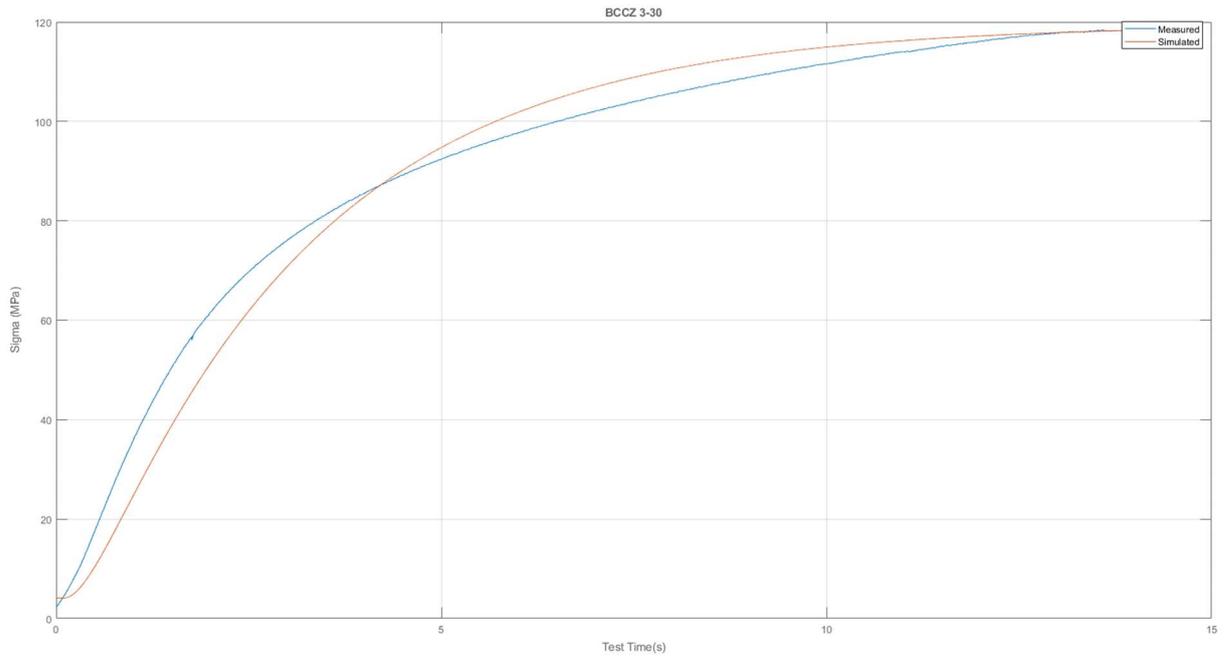


Figure 76 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-30

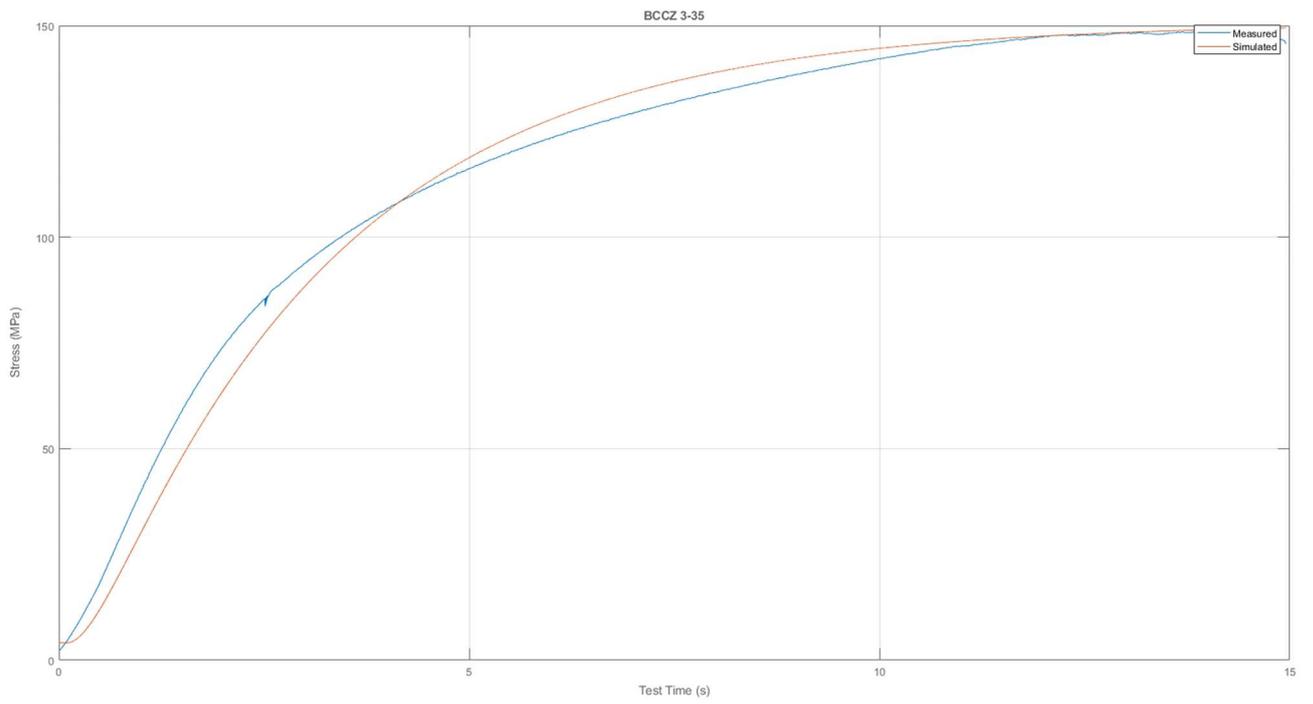


Figure 77 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-35

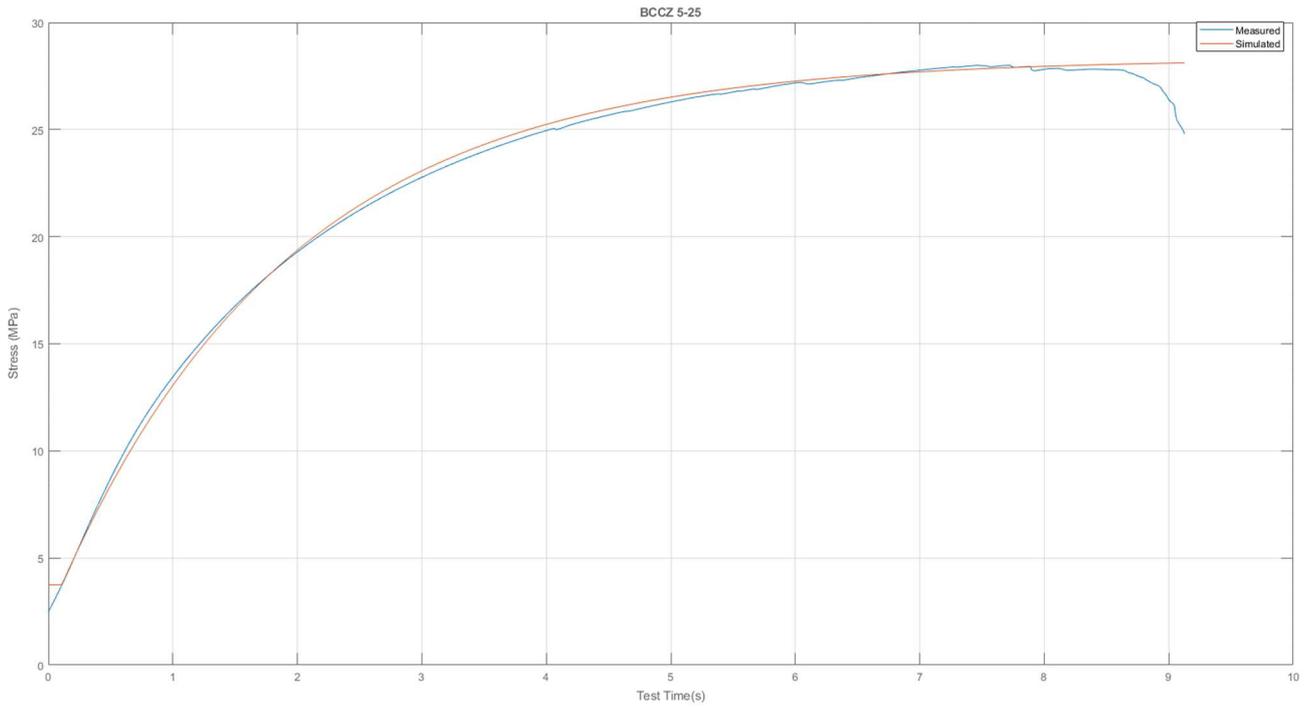


Figure 78 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-25

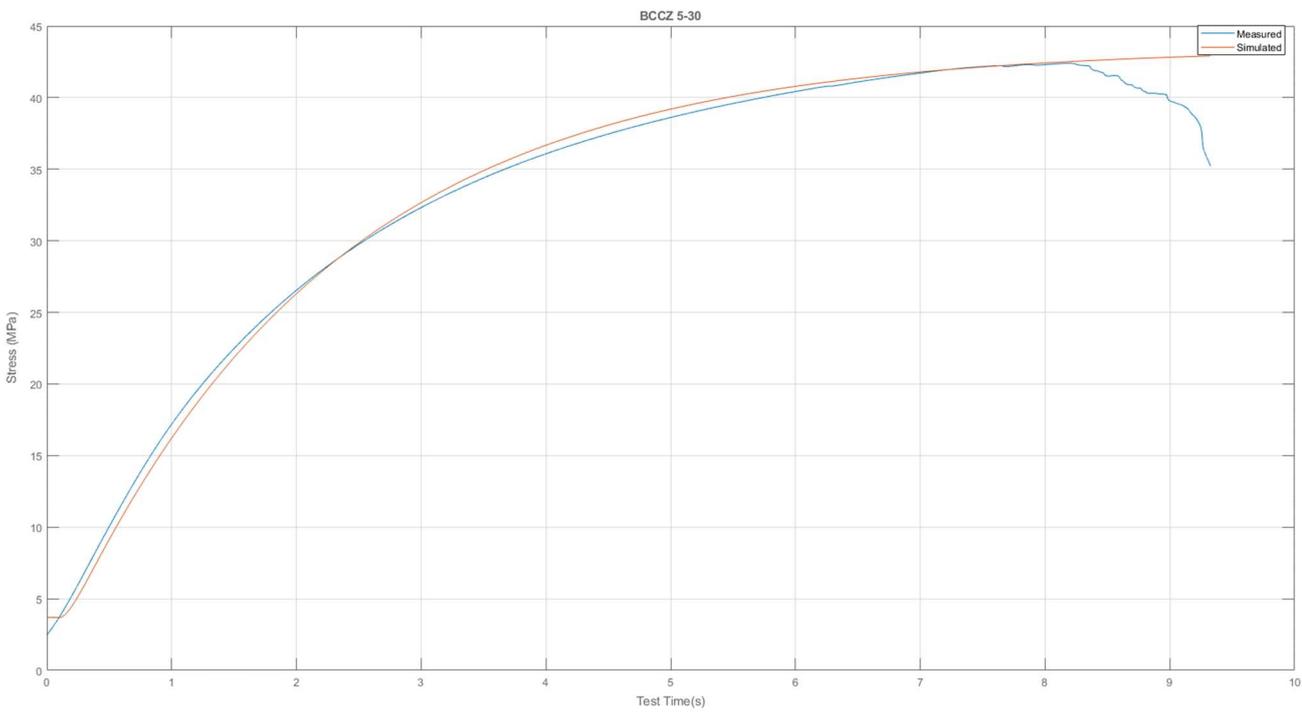


Figure 79 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-30

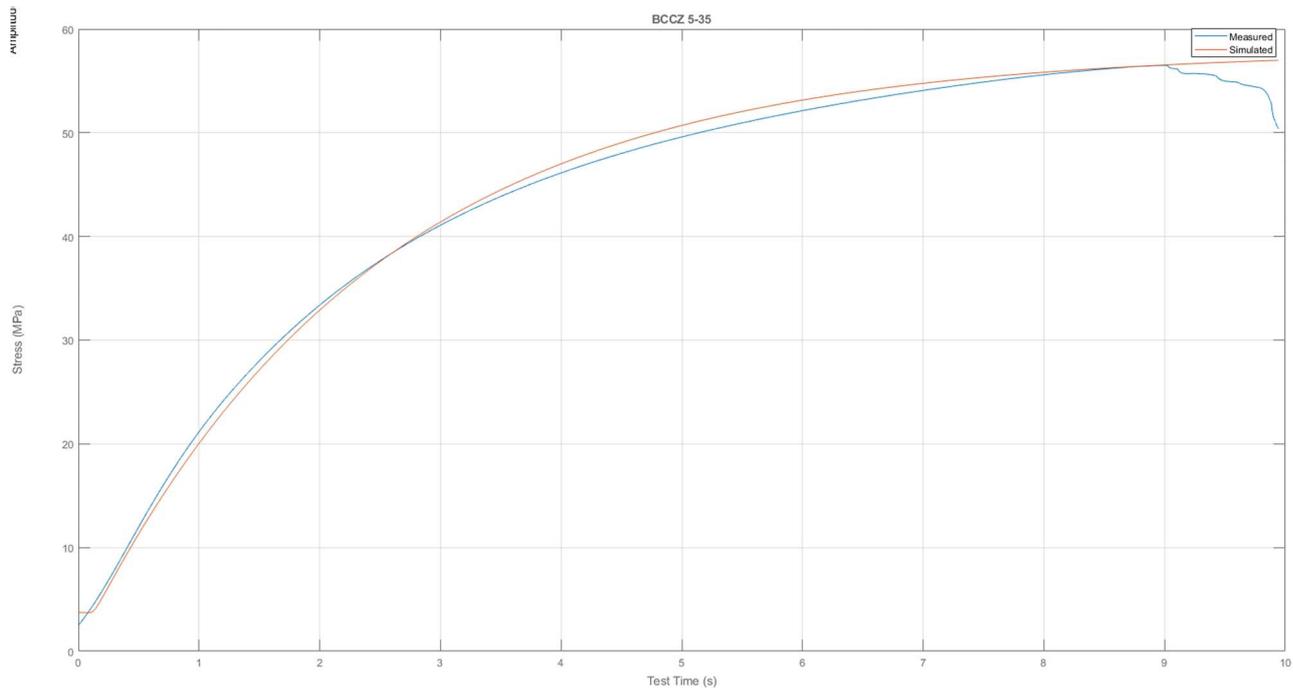


Figure 80 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-35

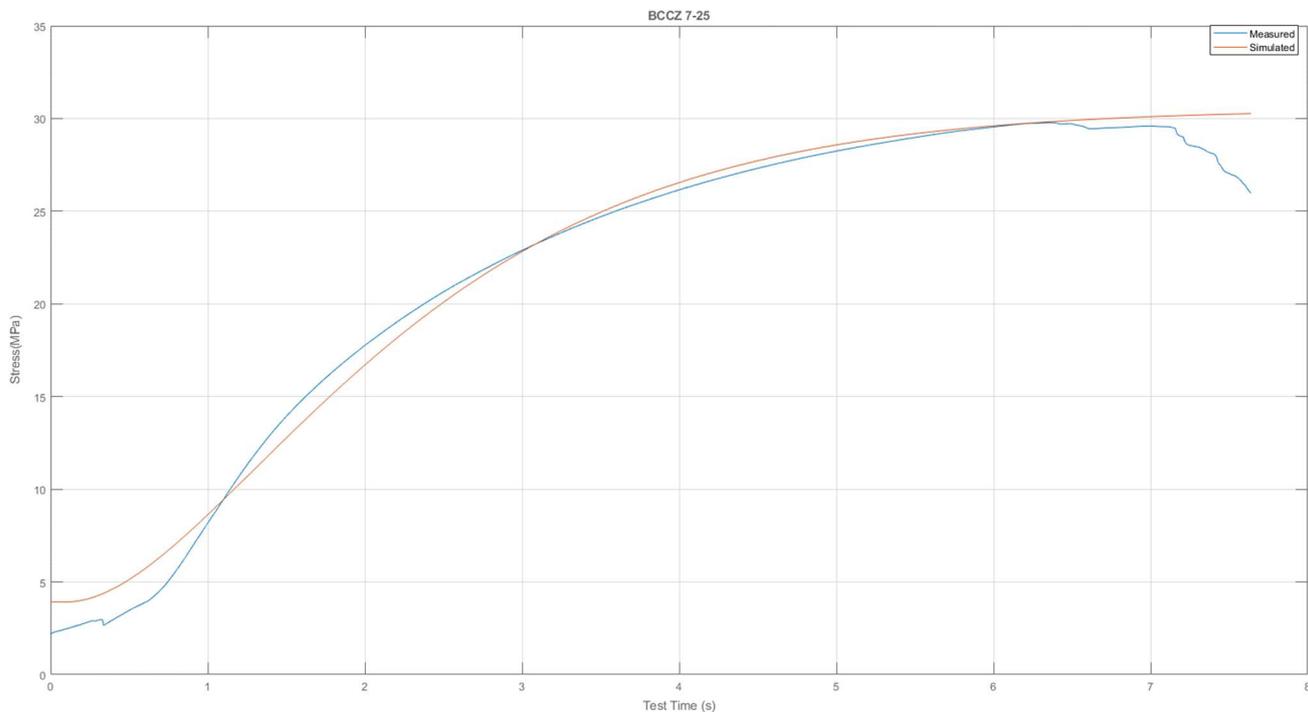


Figure 81 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-25

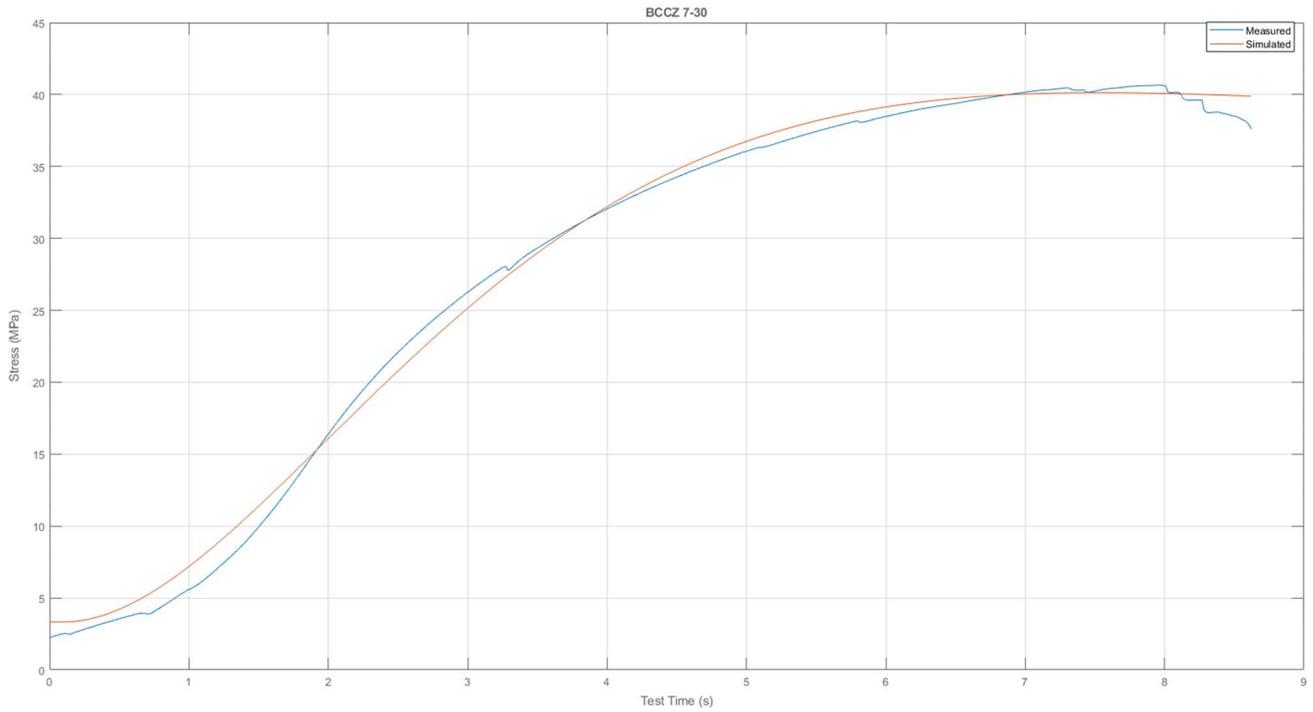


Figure 82 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-30

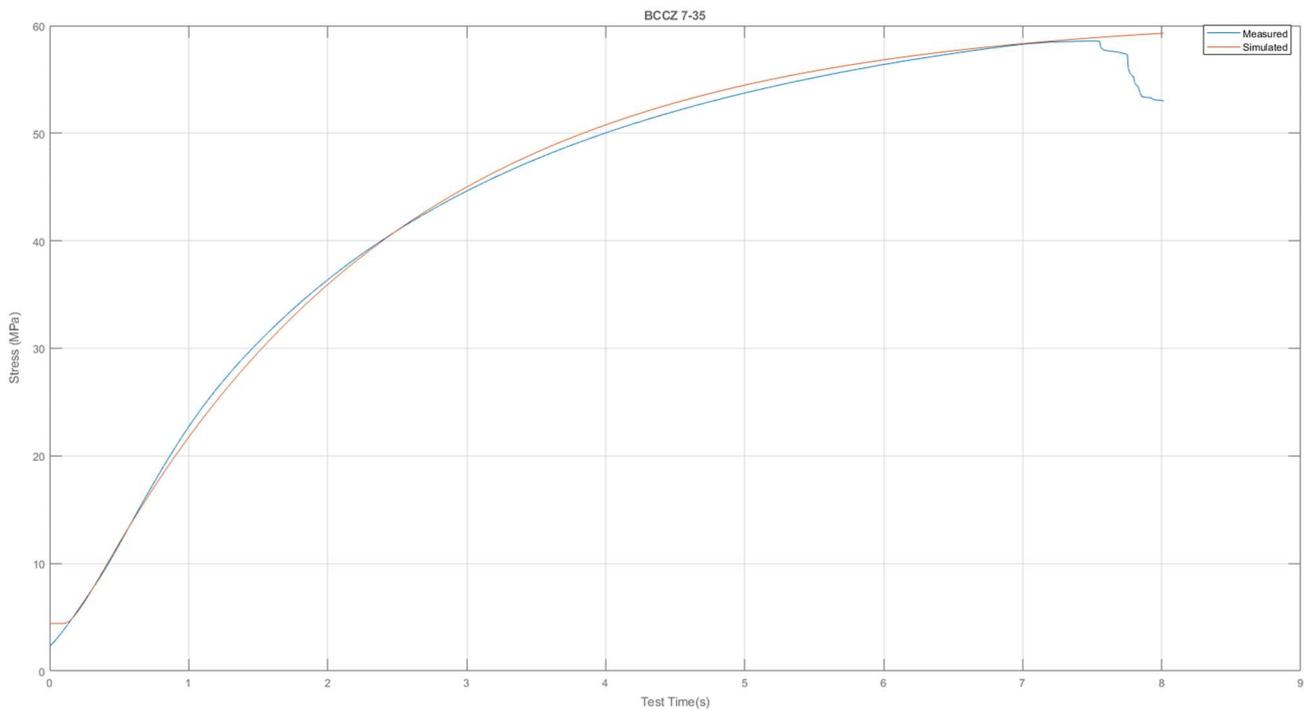


Figure 83 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-35

Per il Ti6A4IV i risultati sono:

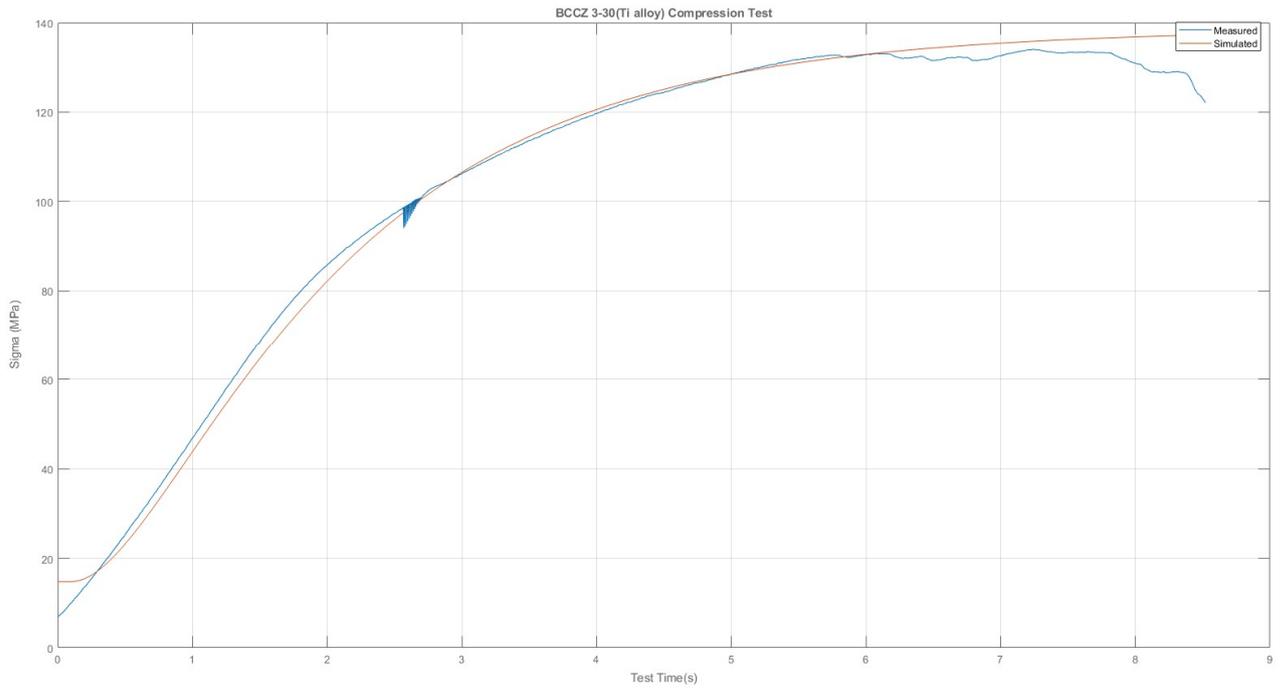


Figure 84 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-30 in Ti6Al4V

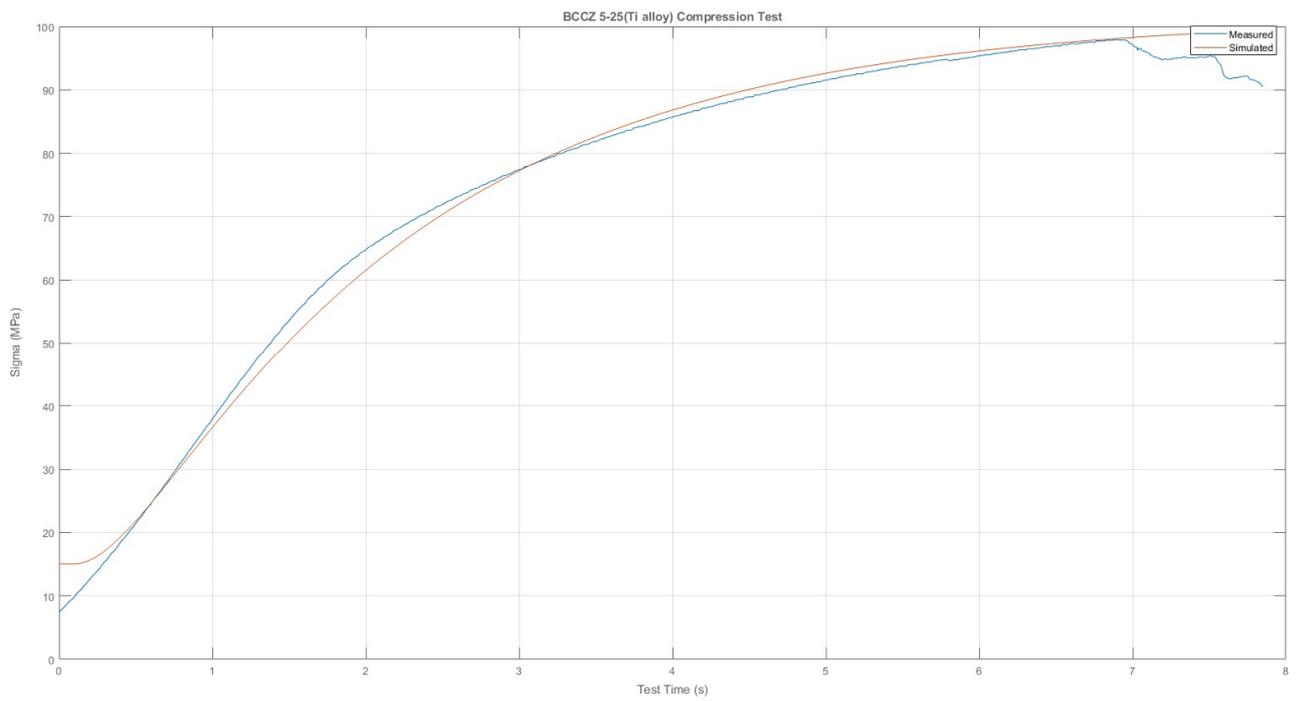


Figure 85 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-25 in Ti6Al4V

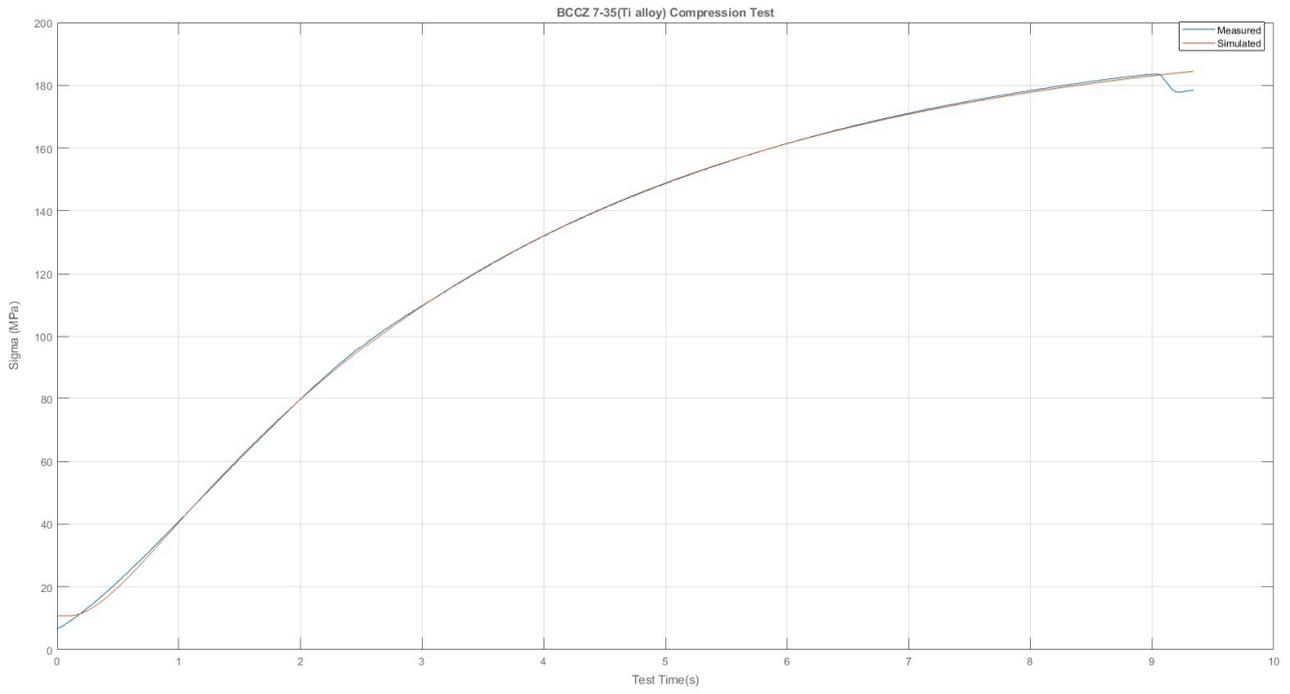


Figure 86 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-35 in Ti6Al4V

5.1.3 BCCZ Non lineare

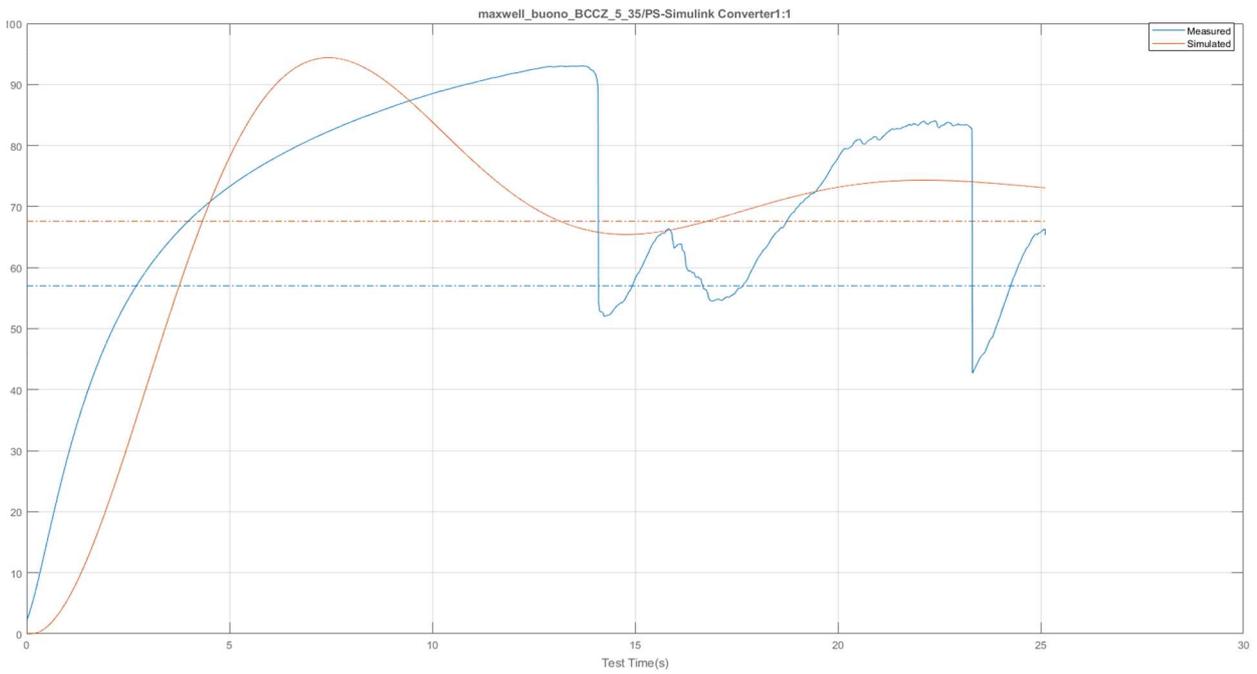


Figure 87 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-25 per grandi spostamenti

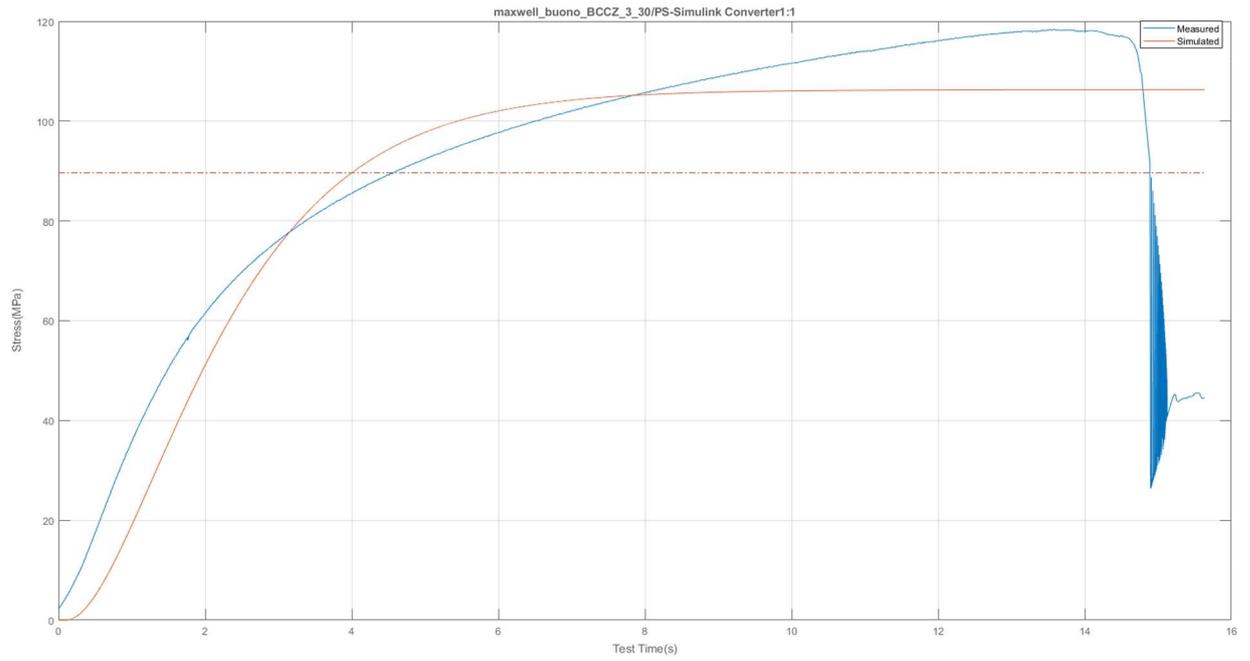


Figure 88 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-30 per grandi spostamenti

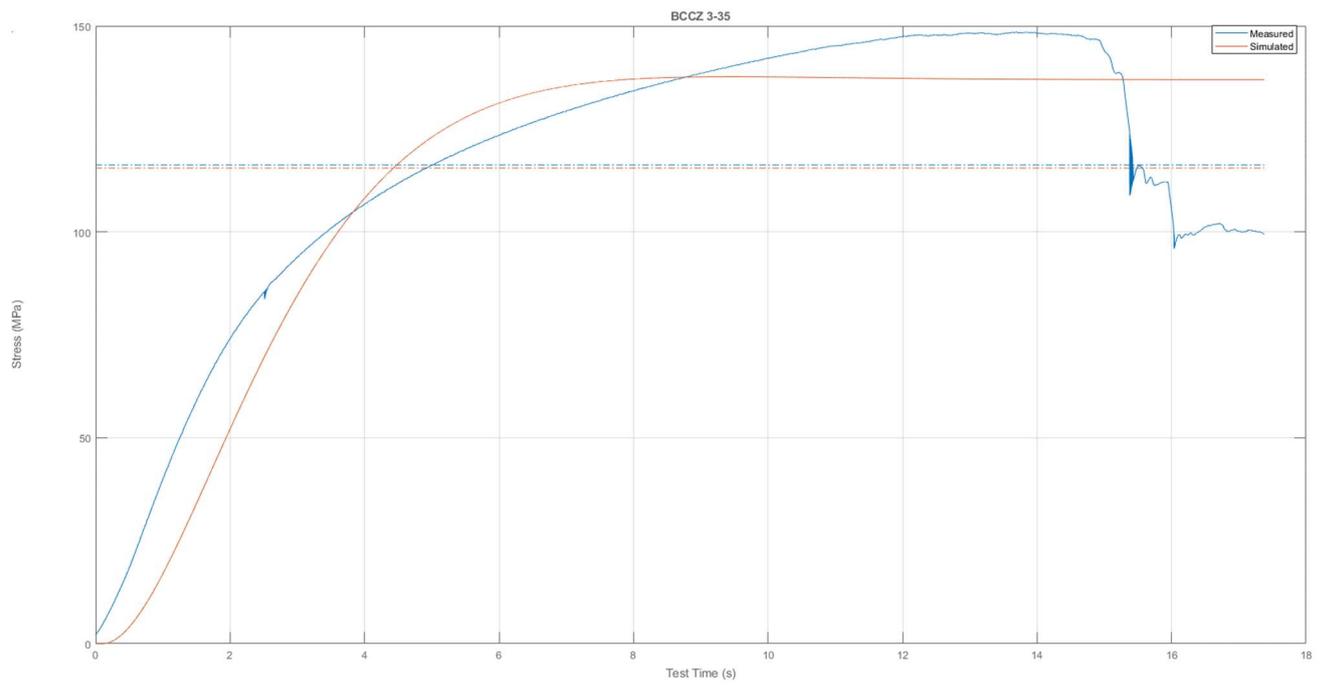


Figure 89 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 3-35 per grandi spostamenti

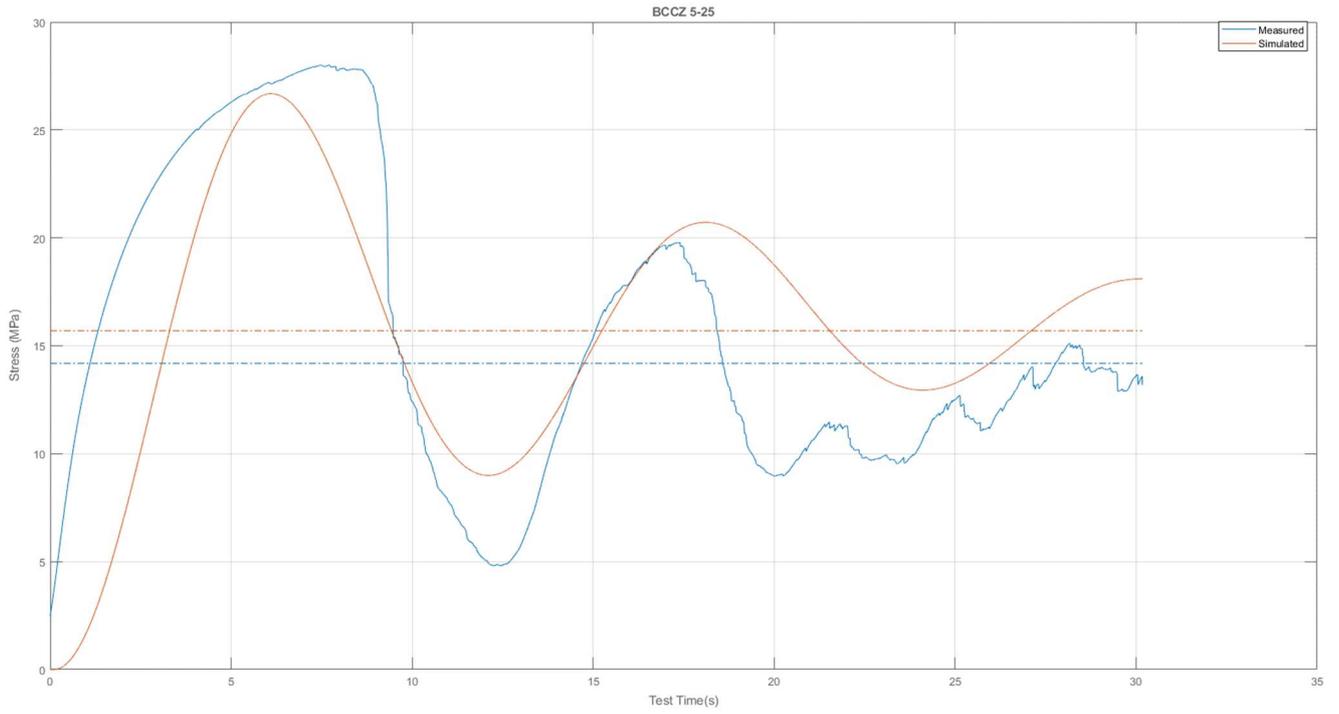


Figure 90 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-25 per grandi spostamenti

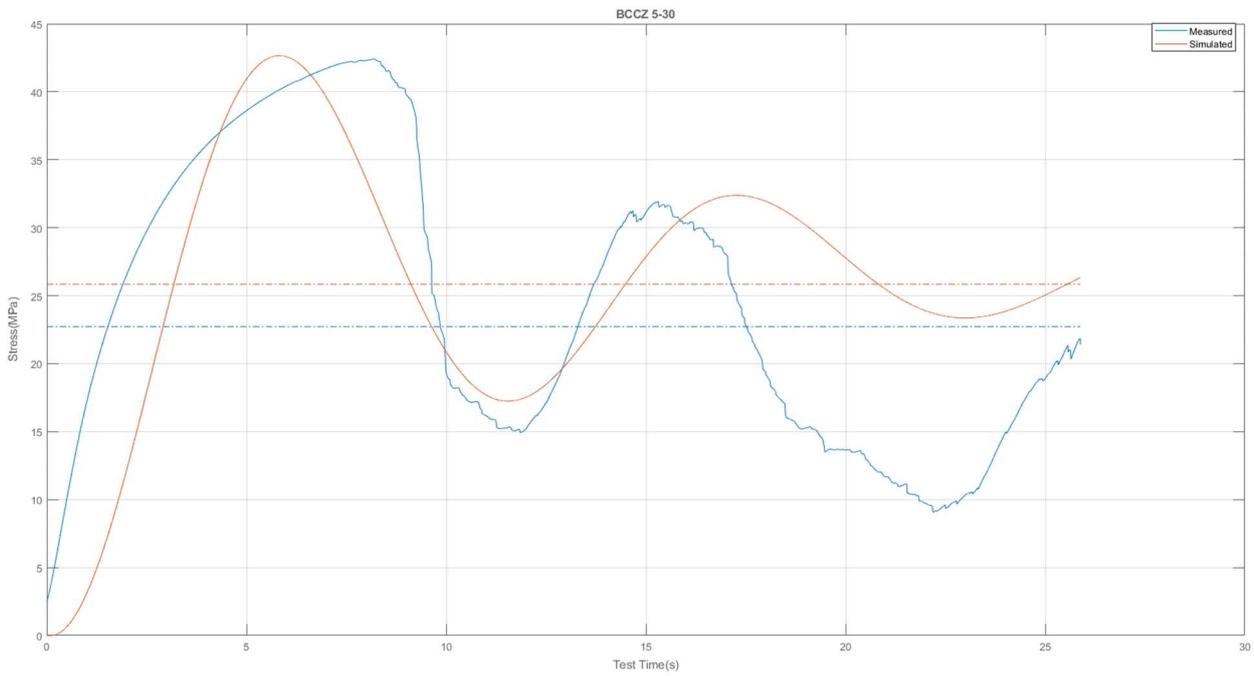


Figure 91 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-30 per grandi spostamenti

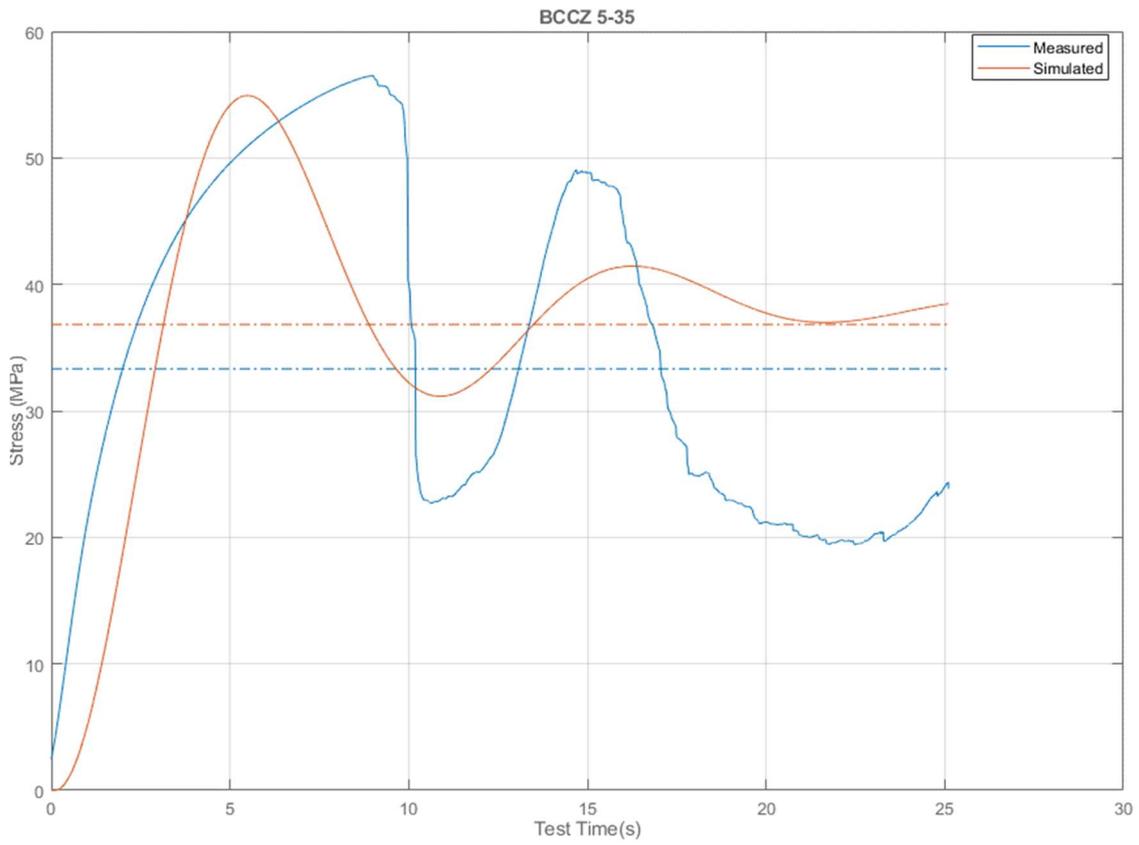


Figure 92 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 5-35 per grandi spostamenti

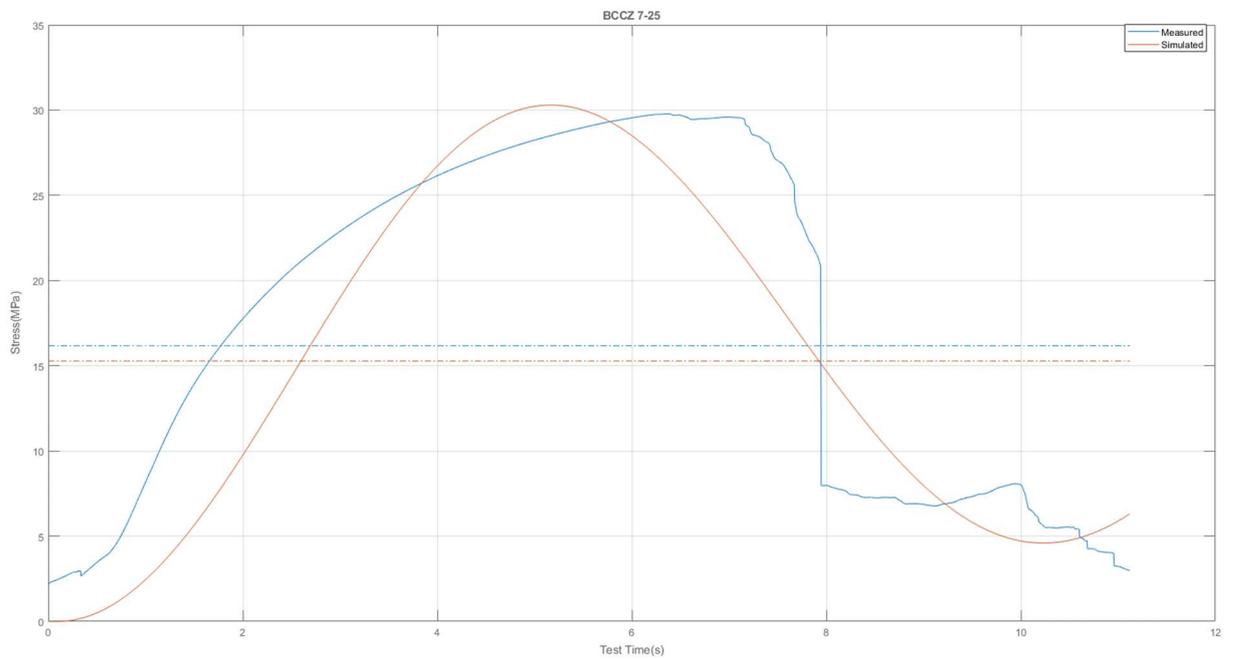


Figure 93 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-25 per grandi spostamenti

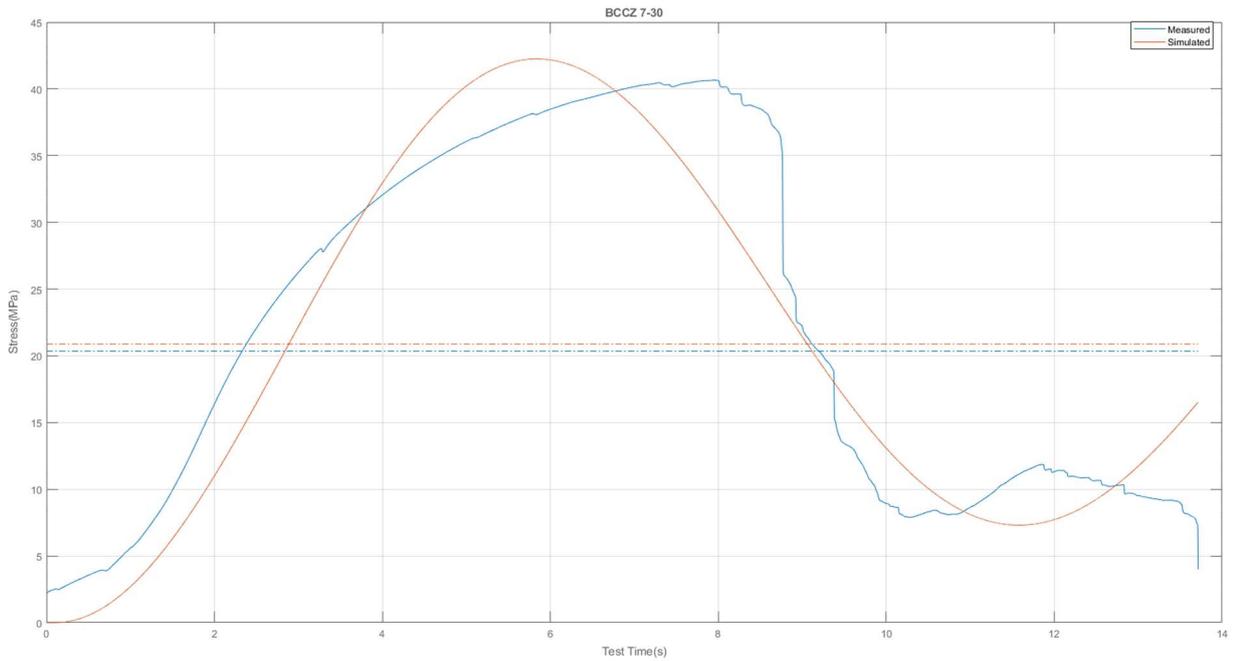


Figure 94 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-30 per grandi spostamenti

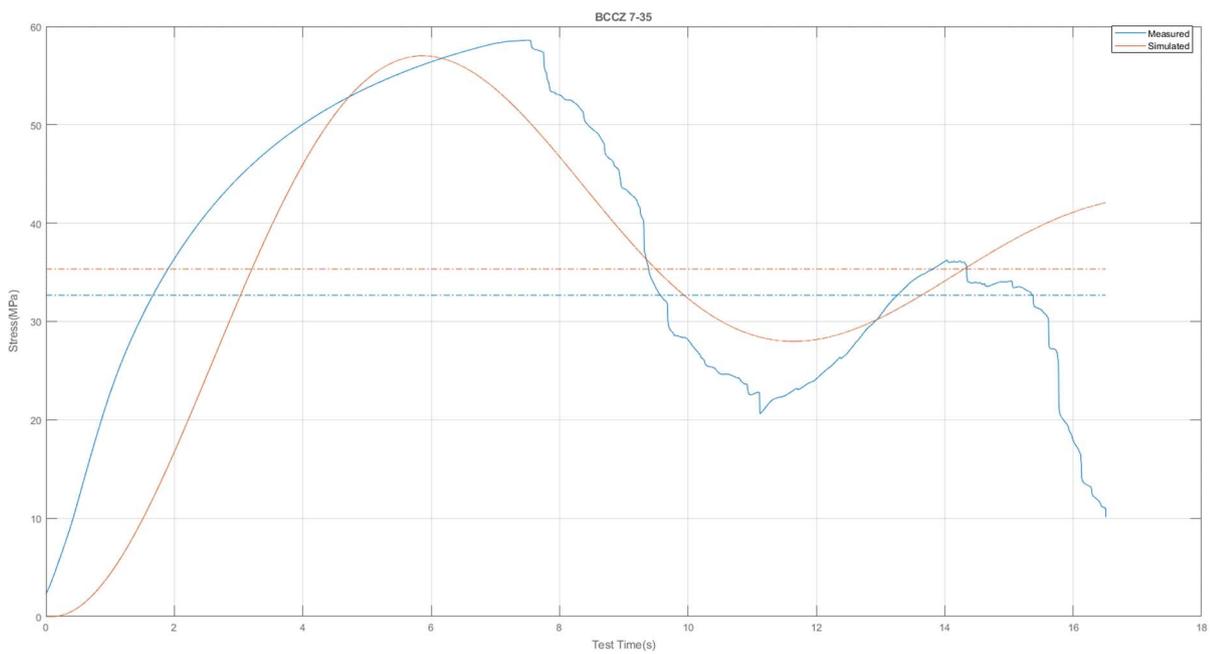


Figure 95 Grafico Sigma-Tempo per cella BCCZ 7-35 per grandi spostamenti

I modelli mostrano una sovrapposizione quasi totale quando vengono utilizzati per descrivere il comportamento meccanico fino al collasso del primo elemento per entrambe le tipologie di celle ROM e BCCZ.

Quando usati per modellizzare il comportamento sui grandi spostamenti le prestazioni decadono, rendendo necessario l'uso di modelli più evoluti.

5.2 Confronto coefficienti

Di seguito sono esposte le mappe tridimensionali per i coefficienti K e C, questi sono ottenuti attraverso minitab.

5.2.1 K

BCC Surface Plot of K vs Density; Cell Size

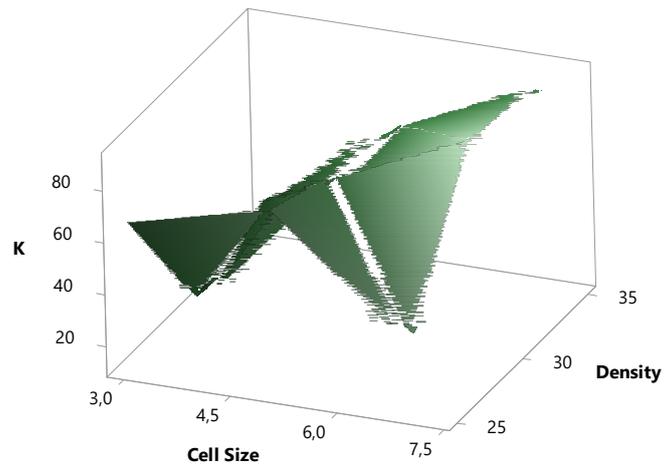


Figure 96 Grafico di superficie di K in funzione della densità e della cell size per celle BCCZ

ROM Surface Plot of K vs Density; Cell Size

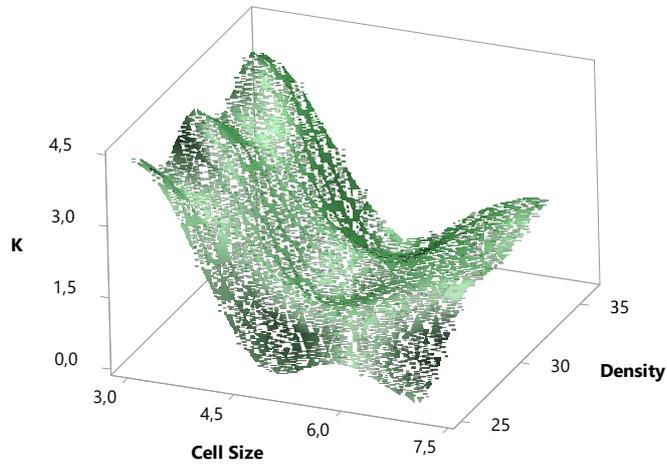


Figure 97 Grafico di superficie di K in funzione della densità e della cell size per celle ROM

5.2.2 C

BCC Surface Plot of C vs Density; Cell Size

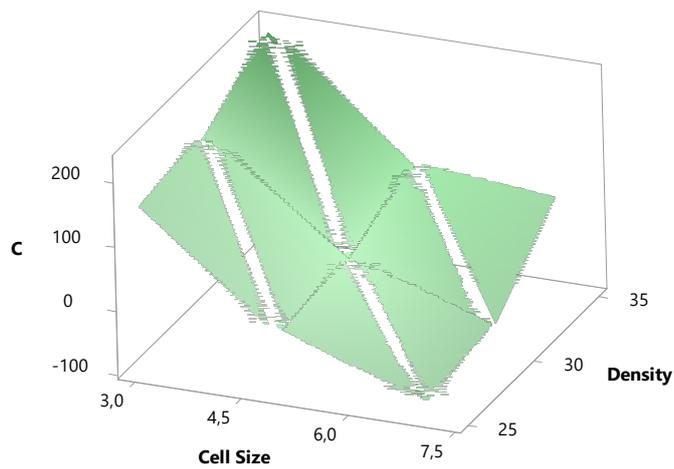


Figure 98 Grafico di superficie di C in funzione della densità e della cell size

ROM Surface Plot of C vs Density; Cell Size

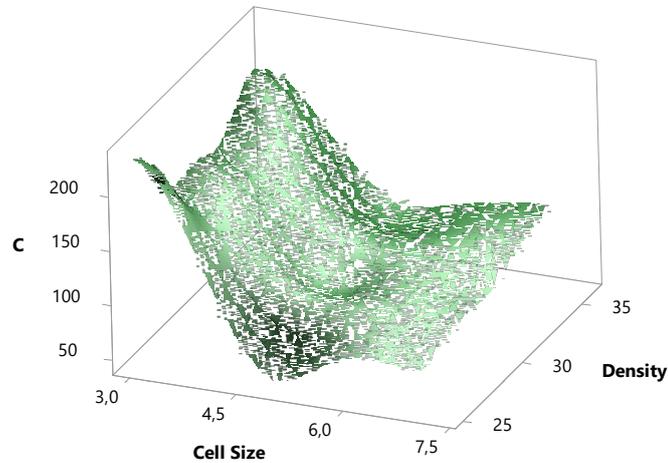


Figure 99 Grafico di superficie di C in funzione della densità e della cell size

5.2.3 R

Tra i parametri caratteristici del modello uno dei più importanti è la σ_{max} , infatti questo permette di effettuare una valutazione del Modulo elastico e costituisce già un parametro progettuale e di scelta del materiale o della sua configurazione. E' stato osservato durante l'ottimizzazione del modello che è necessario dare in input al modello uno Step di forzante che sia superiore al valore effettivo di σ_{max} , la motivazione di questo fenomeno è da ricercarsi nella risposta meccanica di un sistema massa-molla-smorzatore sottoposto ad un segnale a gradino. Dalla sua risoluzione analitica ci aspettiamo la necessità di un Overshoot del 30%. Questo valore è effettivamente quello che si riscontra in fase di ottimizzazione per tutte le tipologie e dimensioni di cella.

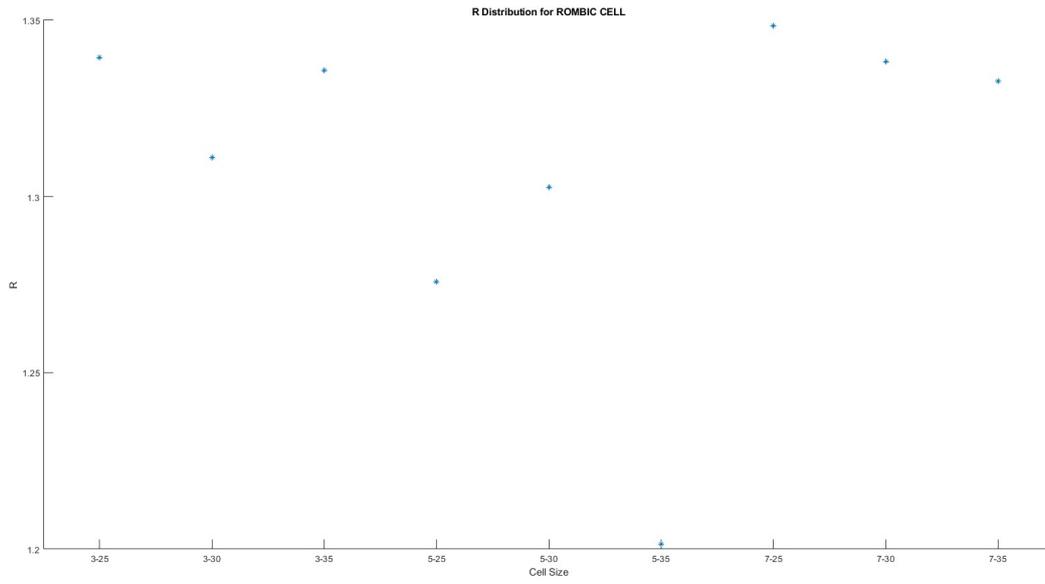


Figure 100 Grafico scatter dei valori di R in funzione della cell size per celle ROM

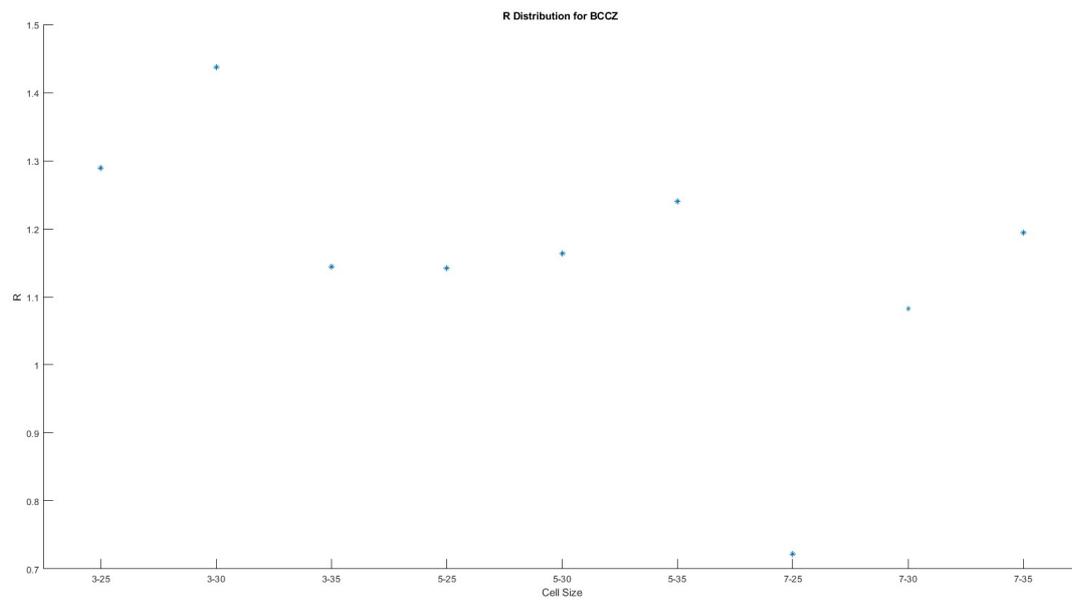


Figure 101 Grafico scatter dei valori di R in funzione della cell size per celle BCCZ

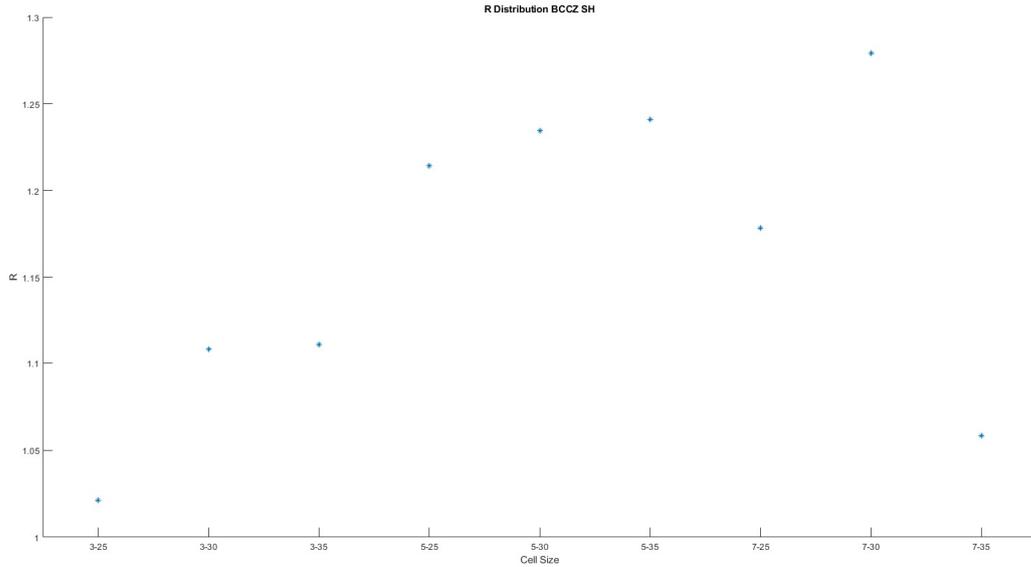


Figure 102 Grafico scatter dei valori di R in funzione della cell size per celle BCCZ in condizioni di non-linearità

A questo punto definiamo $R = \frac{F_{fin}}{\sigma_{max}} = 1,3$

5.3 Valutazione Modulo Elastico del modello

Tra le proprietà meccaniche dei materiali il modulo elastico o di Young ha sicuramente una posizione privilegiata per la stima del comportamento meccanico. Infatti già Gibson e Ashby hanno provato attraverso il loro lavoro ad ottenere una stima del suo valore in modo analitico. Con una funzione che legghi la variazione di modulo elastico con la variazione di densità nella forma:

$$\frac{E}{E_s} = f\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)$$

Dove il pedice s indica il valore della grandezza riferita al materiale solido. In questa sede si vogliono sfruttare le proprietà del modello di Voigt per calcolare numericamente il modulo Elastico. Infatti esso rappresenta la pendenza della rette tangente il tratto elastico. Sfruttando le considerazioni analitiche sviluppate nel capitolo sui modelli Reologici otteniamo

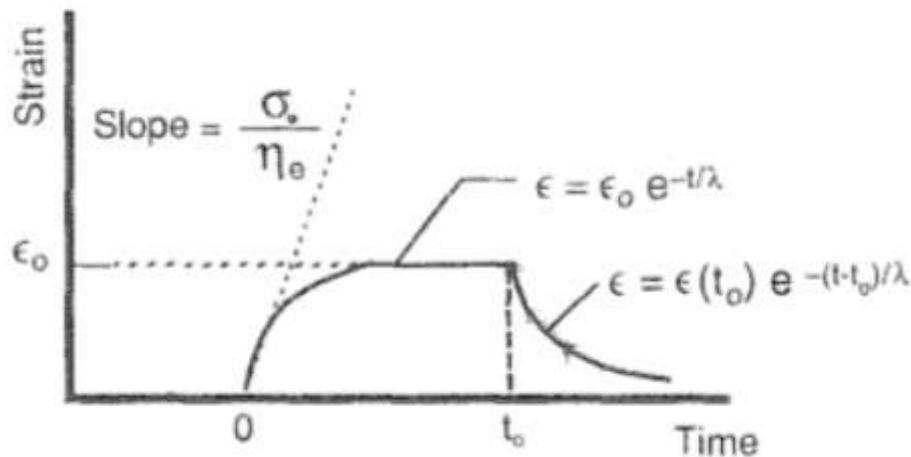


Figure 103 Rappresentazione grafica del metodo per calcolare il modulo elastico

Utilizziamo quindi la relazione

$$E = \frac{\sigma_0}{\eta_e}$$

Con $\sigma_0 = F_{fin} - F_{in}$, ovvero il modulo della forzante di compressione applicata al modello e η_e valore nel coefficiente di smorzamento viscoso dello smorzatore nel modello di Voigt. Otteniamo:

- Rombic

ROM		η_e	Ffin	Fin	E (Mpa)
3	25	331,62	11700	602,7476	3346,376
	30	272,95	13600	589,9933	4766,443
	35	304,40	18000	601,1132	5715,797
5	25	147,44	2400	574,1627	1238,393
	30	176,10	3800	586,2187	1825,006
	35	183,60	5100	540,636	2483,327
7	25	176,82	2450	606,7694	1042,433
	30	186,02	3750	602,2484	1692,139
	35	210,21	5400	599,7038	2283,572

Table 4 Valori calcolati di E per celle ROM in AlSi10Mg

- BCCZ Lineare

BCCZ lin		η_e	Ffin	Fin	E (MPa)
3	25	368,52	9500	459,4798	2453,197
	30	360,14	13100	498,5622	3499,039
	35	365,34	16500	499,8654	4379,519
5	25	225,77	3400	546,4286	1263,929
	30	273,63	5300	555,5556	1733,89
	35	295,76	7000	558,5106	2177,93
7	25	265,45	3500	530,303	1118,741
	30	319,41	5200	575,6458	1447,789
	35	235,07	6200	476,1905	2434,949

Table 5 Valori calcolati di E per celle BCCZ in AlSi10Mg

- BCCZ Non lineare

BCCZ		η_e	Ffin	Fin	E (MPa)
3	25	255,65	12000	580,3955	4466,89
	30	265,17	17000	646,9892	6166,922
	35	325,85	17000	515,0128	5059,072
5	25	97,88	3200	514,2857	2743,994
	30	109,19	5000	524,109	4099,113
	35	155,75	7000	558,5106	4135,788
7	25	23,49	2300	324,9608	8407,642
	30	41,69	4400	487,0849	9385,47
	35	139,72	7000	537,6344	4625,358

Table 6 Valori calcolati di E per celle BCCZ in AISi10Mg per valutazioni non lineari

Calcolando l'errore commesso con questo metodo rispetto al modulo Elastico ottenuto dalle prove sperimentali otteniamo una buona corrispondenza per le prove che coinvolgono la simulazione del comportamento meccanico fino al primo cedimento. In particolare otteniamo un errore relativo calcolato come

$$Err = \frac{E - E_{sper}}{E_{sper}} * 100$$

Entro il 20% sulle celle Rombic e sempre di segno positivo, quindi il modello sottostima di un valore quasi costante la rigidezza del provino reale. Mentre sulle BCCZ si possono ottenere errori piccoli nell'ordine del 10% per celle da 5mm e da 7mm e anch'essi sempre positivi e quindi di sottostima. Nelle celle da 3mm a bassa densità si riscontra un errore leggermente più alto nella media, la causa è da ricercarsi nei dati delle prove sperimentali, probabilmente inquinati dal non corretto utilizzo della macchina di prova.

- Rombic

E speri.	Err %
2853,10	17,28913
4253,50	12,05932
4972,3	14,95278
1096,2	12,97146
1609,2	13,41078
2089,8	18,83086
1008,4	3,374982
1440,1	17,50152
1899,2	20,23861

Table 7 Valori di Errore relativo per E su celle ROM in AISi10Mg

- BCCZ Lineare

E speri.	Err %
2999,00	-18,1995
4821,00	-27,4209
4314,6	1,504635
1233,1	2,500083
1579,3	9,788543
2020,1	7,81298
1281,6	-12,7075
1336,9	8,294496
2218,5	9,756533

Table 8 Valori di Errore relativo per E su celle BCCZ in AISi10Mg

- BCCZ Non Lineare

E sper.	Err %
2999,00	48,94598
4821,00	27,91789
4314,6	17,25472
1233,1	122,5281
1579,3	159,5525
2020,1	104,7318
1281,6	556,027
1336,9	602,0323
2218,5	108,4903

Table 9 Valori di Errore relativo per E su celle ROM in AlSi10Mg per valutazioni nonn lineari

Per le celle in lega di Titanio

- ROM Ti6Al4V

ROM		η_e	Ffin	Fin	E(MPa)
3	25	262,156	8500	1250	2765,529
5	35	241,84	18000	1450	6843,368
7	30	392,165	18500	1450	4347,66

Table 10 Valori calcolati di E per celle ROM in Ti6Al4V

- BCCZ Ti6Al4V

BCCZ		η_e	Ffin	Fin	E
3	30	239,778	15000	1600	5588,503
5	25	247,91	10700	1660	3646,485
7	35	415,389	22000	1200	5007,355

Table 11 Valori calcolati di E per celle BCCZ in Ti6Al4V

Calcolando anche in questo caso l'errore percentuale come

$$Err = \frac{E - E_{sper}}{E_{sper}} * 100$$

Otteniamo:

- ROM Ti6Al4V

E sper.	Err %
1826,7	51,39481
4220,73	62,13706
3712,7	17,10237

Table 12 Valori di Errore relativo per E su celle ROM in Ti6Al4V

- BCCZ Ti6Al4v

E speri.	Err %
4344,431	28,63601
3349,1	8,879538
3931,3	27,37147

Table 13 Valori di Errore relativo per E su celle BCCZ in Ti6Al4V

I modelli per la rappresentazione in lega di Titanio con geometria Rombic con taglia 3mm e 5mm mostrano un errore relativo compreso tra il 50% ed il 60% mentre le celle da 7mm un errore contenuto al 20% circa.

Le celle BCCZ mostrano un comportamento migliore con errori intorno al 30% con un minimo dell'8%. L'ampia variabilità dell'errore è da ricercarsi nel metodo di acquisizione dei dati. Infatti nonostante siano state effettuate tre prove di compressione per ogni provino ai fini della simulazione è stata presa solo una curva. L'elaborazione di tutte le prove e la scelta del metodo più adeguato per estrarre la curva più veritiera è tutt'ora oggetto di indagine. E' parere dell'autore che una volta elaborato correttamente il dato sperimentale il modello potrà stimare il modulo elastico con una maggiore accuratezza.

6 Conclusione e Sviluppi Futuri

In questa tesi è stato proposto un nuovo metodo di analisi per il comportamento meccanico di strutture trabecolari soggette a compressione uniassiale. I risultati sperimentali raccolti dalle prove di compressione sono stati confrontati con quelli analitici ottenuti con il modello reologico. L'obiettivo è stato di comprendere l'affidabilità dei modelli reologici sviluppati per validarli o evidenziare se siano necessarie ulteriori migliorie. Si può evidenziare come il comportamento a compressione delle celle che non presentano l'andamento a tooth saw sia stato ben colto con errori percentuali al di sotto del 20% in media. Se ci si riferisce invece alle celle bccz caratterizzate da cedimenti progressivi va evidenziato come il modello di maxwell adottato sia ancora impreciso nella valutazione del coefficiente angolare e richieda ulteriori miglioramenti inserendo degli switch che discretamente riducano la rigidità creando il classico pattern a dente di sega.

Complessivamente la metodologia adottata ha dimostrato la sua efficacia e la sua bontà per la stima delle performance di una cella elementare senza coinvolgere in prima battuta calcoli fem a volte troppo onerosi in una prima fase esplorativa.

Inoltre come è possibile osservare dalla sovrapposizione quasi ottimale tra il modello reologico e le curve sperimentale è possibile affermare che sia le celle ROM che quelle BCCZ presentano il comportamento di un solido viscoelastico. Questa affermazione è indipendente sia dal materiale che dalla tipologia di cella.

Nel futuro di questo lavoro si proseguirà con questo assunto, provando modelli reologici più complessi e atti a modellizzare altri fenomeni come la fatica. Inoltre sono a disposizione prove sperimentali su altre tipologie di celle che possono testare il modello.

Lo scopo ideale e ultimo è riuscire a trovare una relazione analitica che correli le caratteristiche della cella con le proprietà macroscopiche.

6.1 Correlazione parametri

Lo strumento di progettazione ideale è quello in cui a partire dalle caratteristiche della cella: tipologia, dimensione di cella e quindi diametro e lunghezza delle aste che la compongono si possa risalire attraverso delle equazioni ai valori di a , b , c e σ_{max} . Questo studio richiede la conoscenza approfondita della meccanica di microscala della schiuma ed al momento risulta difficile come compito ma rimane l'obbiettivo finale di che ha lavorato a questo progetto.

Una soluzione alternativa è creare un database ampio di dati sperimentali che possa fornire un numero di coefficienti tali da poter coprire un gran numero di esigenze progettuali. Questa soluzione può risultare di più semplice implementazione e consente di portare avanti l'utilizzo in ambito industriale di questi tipi di materiale e nel frattempo continuare a studiare la loro meccanica.

Il primo parametro da calcolare in modo analitico secondo l'autore della presente tesi è la quantità σ_{max} . Questa abbiamo avuto modo di osservare definisce all'interno del modello uno degli input di maggiore importanza ed ha una stretta correlazione con il modulo elastico, se si aggiunge il coefficiente di smorzamento ottenuto da valori tabulati con una semplice divisione è possibile ricavare la rigidezza del materiale. D'altronde la conoscenza della sola informazione di σ_{max} e di E costituisce la totalità delle informazioni necessarie per la maggior parte delle industrie.

Partendo dalle considerazioni fatte nel capitolo che tratta le prove sperimentali si è osservato che le celle Rombic e BCCZ cedono in prima istanza ad un nodo, e successivamente propagano lungo un piano. Avendo osservato che celle che presentano delle aste più snelle cedono prima di aste tozze si è ipotizzato un tipo di cedimento per buckling.

A partire da questa affermazione si può considerare il carico critico Euleriano per un'asta caricata in punta, da Gibson e Ashby:

$$P_{crit} = \frac{n^2 \pi^2 E_s I}{h^2}$$

Con n che rappresenta la rigidezza rotazionale del nodo dove convergono tre elementi.

E' possibile correlare lo stress applicato sul provino con il carico sperimentato dal singolo elemento come

$$P = 2\sigma_2 lb \cos(\theta)$$

Il collasso elastico si ha quando $P = P_{crit}$, ottenendo la $(\sigma_{el}^*)_2$ come

$$\frac{(\sigma_{el}^*)_2}{E_s} = \frac{n^2 \pi^2}{24} \frac{t^3}{lh^2} \frac{1}{\cos(\theta)}$$

Con $I = \frac{bt^3}{12}$.

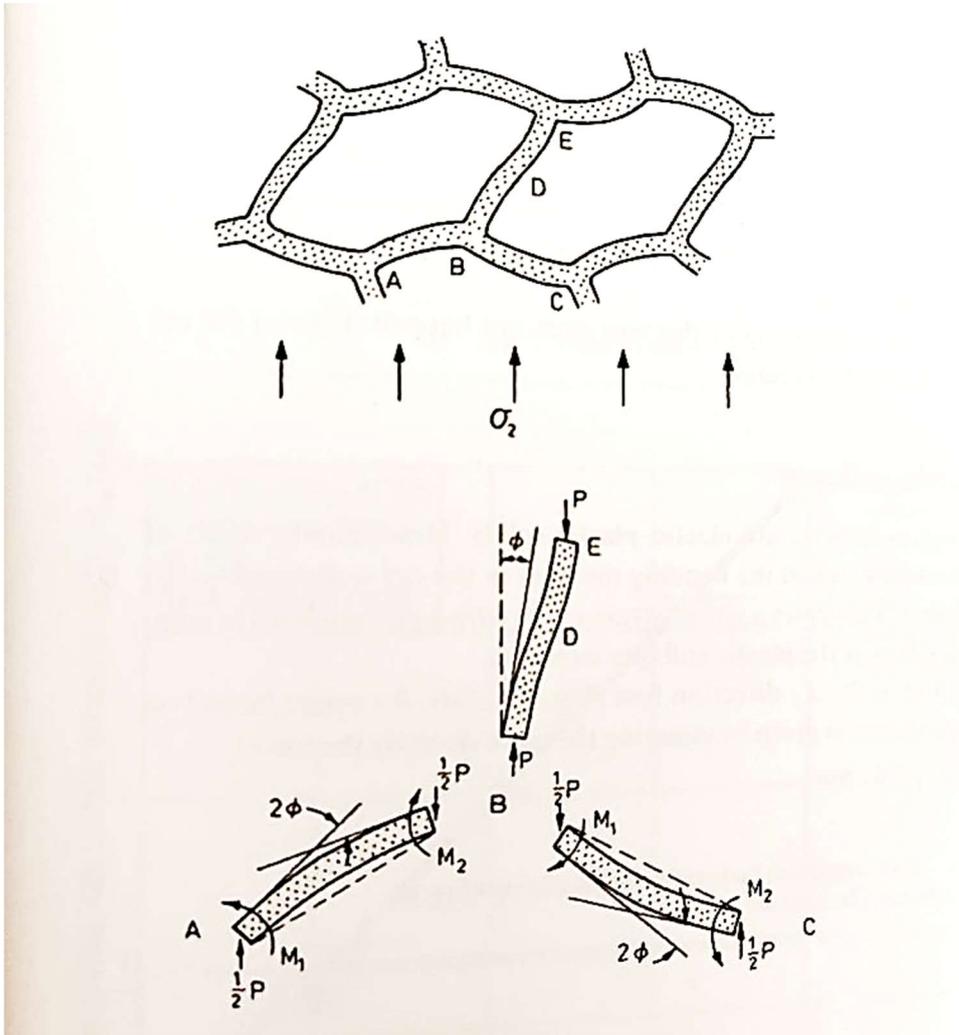


Figure 104 Correlazione tra sforzo distribuito e carico sugli elementi della cella

7 Bibliografia

- [1] S. B. Carlo Giovanni Ferro, Andrea Emanuele Maria Casini, Andrea Mazza, Paolo Maggiore, "A novel design approach for space components: application to a multifunctional panel," 2017.
- [2] P. Maggiore, Fabio Vitti, C. G. Ferro, and Varetti Sara, "Thermal anti ice system integrated in the structure and method for its fabrication," 102016000098196, 2016
- [3] G. D. M. Sara Varetti, Carlo Giovanni Ferro, Lorenzo Pezzolato and S. S. Andrea Mazza, Mariangela Lombardi, Paolo Maggiore, "Novel thruster reactor made by Selective Laser Melting in metal lattice structures for the catalytic decomposition of H₂O₂," 2019.
- [4] S. K. Thomas, R. P. Cassoni, and C. D. MacArthur, "Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling," *J. Aircr.*, vol. 33, no. 5, pp. 841–854, 1996, doi: 10.2514/3.47027.
- [5] "Supercooled Large Droplets (SLD)," *ALC-33: Inflight Icing*.
- [6] National Transportation Safety Board, "In-flight Icing Encounter and Loss of Control Simmons Airlines, d.b.a. American Eagle Flight 4184 Avions de Transport Regional (ATR) Model 72-212, N401AM," 1994.
- [7] C. Us *et al.*, "TP 185 - Aviation Safety Letter," pp. 1–8, 2009.
- [8] SkyBrary, "AT72, vicinity Manchester UK, 2016," 2018.
- [9] Goraj Zdobyslaw, "An overview of Deicing and antiicing technologies with prospects for the future," 2004.
- [10] C. J. Johnson, "Anti Icing Duct," US Patent 2320870, 1943
- [11] A. Vacca, "P180 main wing anti-ice system: analysis and improvements," Univerità degli Studi di Genova, 2013.
- [12] C. I. Protection, "About TKS Ice Protection Systems," 1940.
- [13] tks, "No TitleAbout TKS Ice Protection Systems," 2019.
- [14] Joseph J. GerardiRichard B. Ingram, "Electro-magnetic expulsion de-icing system," US 6102333, 1995
- [15] M. AM, "Metal Additive Manufacturing processes."
- [16] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, S. L. Bubb, P. Young, and D. Raymont, "Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 4, pp. 856–864, 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.004.
- [17] D. . Williams, C.B., Cochran, J.K., Rosen, "Additive manufacturing of metallic cellular materials via three-dimensional printing," *Int. J. ofAdvanced Manuf. Technol.*, 2011.
- [18] M. Ashby and L. Gibson, "Cellular solids: structure and properties," *Cambridge Univ. Press*, 1999.
- [19] L. Hao, D. Raymont, C. Yan, A. Hussein, and P. Young, "Design and additive manufacturing of cellular lattice structures," *Innov. Dev. Virtual Phys. Prototyp.*, no. May 2016, pp. 249–254, 2011, doi: 10.1201/b11341-40.
- [20] M. F. Ashby, "The properties of foams and lattices," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 364, no. 1838, pp. 15–30, 2006, doi: 10.1098/rsta.2005.1678.

- [21] T. Tancogne-Dejean, A. B. Spierings, and D. Mohr, "Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading," *Acta Mater.*, vol. 116, pp. 14–28, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.05.054.
- [22] G. Imbalzano, S. Linforth, T. D. Ngo, P. V. S. Lee, and P. Tran, "Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: Comparisons and parametric designs," *Compos. Struct.*, vol. 183, no. 1, pp. 242–261, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.03.018.
- [23] J. Vojislav Petrovic, Juan Vicente Haro, Olga Jordá, Javier Delgado and L. P. Ramón Blasco, "Additive Layer Manufacturing: State of the art in industrial applications through case studies," *Int. J. Prod. Res.*, 2011.
- [24] C. G. Ferro, A. E. M. Casini, and A. Mazza, "A novel design approach for space components: application to a multifunctional panel," *68th Int. Astronaut. Congr.*, no. September, pp. 25–29, 2017.
- [25] C. Ferro *et al.*, "A Robust Multifunctional Sandwich Panel Design with Trabecular Structures by the Use of Additive Manufacturing Technology for a New De-Icing System," *Technologies*, vol. 5, no. 2, p. 35, 2017, doi: 10.3390/technologies5020035.
- [26] S. Zhao, S. J. Li, W. T. Hou, Y. L. Hao, R. Yang, and R. D. K. Misra, "The influence of cell morphology on the compressive fatigue behavior of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 59, pp. 251–264, 2016, doi: 10.1016/j.jmbbm.2016.01.034.
- [27] A. Hussein, L. Hao, C. Yan, R. Everson, and P. Young, "Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 7, pp. 1019–1026, 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.020.
- [28] R. Gabbrielli, "Foam geometry and structural design of porous material.," University of Bath, 2009.
- [29] EOS GmbH - Electro Optical Systems, "Material Data Sheet: EOS Aluminium AlSi10Mg," vol. 49, no. 0, pp. 1–5, 2014.