



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Caratterizzazione sperimentale di materiali
cellulari ricoperti superficialmente
Experimental characterization of
surface-coated cellular materials**

Candidato:
Giordano Cecchini

Relatore:
Prof. Marco Sasso

Correlatore:
Prof. Mattia Utzeri

Anno Accademico 2022-2023

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Sommario

Partendo da un'idea del Dott. Utzeri Mattia abbiamo cercato le risposte alle seguenti domande: Se e Come è possibile ricoprire una struttura cellulare stampata 3D con un film protettivo di resina? E questa operazione come ne modificherebbe le caratteristiche meccaniche?

In questa tesi, dopo una doverosa introduzione sull'Additive Manufacturing, illustriamo tutto il processo seguito per dare risposte alle nostre domande.

Per prima cosa abbiamo sperimentato la ricopertura su strutture stampate autonomamente. Questa sperimentazione preliminare ha avuto lo scopo di testare le varie modalità per effettuare la ricopertura così da individuare la migliore e renderci conto di eventuali problematiche nella realizzazione. Ottenuti i risultati della prima sperimentazione e tratte le nostre conclusioni abbiamo sviluppato un metodo di ricopertura e lo abbiamo impiegato per ricoprire dei provini con altissime caratteristiche meccaniche. Una volta ricoperti anche questi li abbiamo testati con prove Dinamiche e Quasi-Statiche, riportando tutti i dati e confrontandoli con quelli di provini non ricoperti. Abbiamo scoperto che la ricopertura migliora sensibilmente le proprietà meccaniche, soprattutto l'energia assorbita specifica.

Indice

1	Panoramica sull'Additive Manufacturing	1
1.1	Introduzione	1
1.2	Analisi dei principali metodi di stampa 3D	1
1.2.1	FDM: Fused Deposition Modeling [1]	1
1.2.2	SLA: Stereolitography [1]	2
1.3	Punti di forza (PRO)	3
1.4	Punti di debolezza (CONTRO)	3
1.5	Materiali Impiegati	4
1.6	Nuove strutture realizzabili solo tramite l'AM	5
2	SPERIMENTAZIONE PRELIMINARE	7
2.1	Obbiettivi	8
2.2	Metodologie di impiego testate	8
2.3	Risultati della Sperimentazione Preliminare	10
3	Ricopertura strutture	13
3.1	PROCEDURA OPERATIVA	13
3.2	TEST	14
3.2.1	Test Dinamico	14
3.2.2	Test Quasi-Statico	15
3.3	Risultati dei Test	16
3.3.1	Risultati Test Dinamico	17
3.3.2	Risultati Test Quasi-Statico	18
4	Discussione dei risultati	19
4.1	Confronto tra grafici dei provini ricoperti e non ricoperti	19
4.1.1	Confronto Test Dinamici	19
4.1.2	Confronto Test Quasi-Statici	20
4.2	Analisi coerente dei grafici e delle proprietà meccaniche più interessanti	21
4.2.1	Modulo di Young	22
4.2.2	Picco di Stress	24
4.2.3	Energia Specifica Assorbita	25
5	CONCLUSIONI	27

Elenco delle figure

1.1	Singola cella della struttura Gyroid	5
1.2	Singola cella della struttura Diamond	6
2.1	Confronto tra Provini delle varie densità specifiche (Gyroid)	7
2.2	Immagine del prodotto: SMALTO VERNICE ATOSSICA TRASPARENTE DURALOID AL-30 2.0 A+B	7
2.3	Panoramica del Fotopolimero impiegato nella realizzazione dei provini per la sperimentazione preliminare [2]	8
2.4	Estratto della scheda tecnica dello smalto	8
2.5	Lista provini della sperimentazione preliminare affiancata dai dettagli di ogni diverso metodo testato	10
2.6	Stato della vasche impiegate per l'immersione durante la Sperimentazione Preliminare, usate per ricoprire i provini serie 4-5-6 nella figura 2.5	11
2.7	Grafico indicativo dei risultati della Sperimentazione Preliminare	12
3.1	Esempio di provino in NylonPA fornito dal Politecnico di Torino (Diamond 1.6)	13
3.2	Test Dinamico: Barra Frazionata di Hopkins presente all'Università Politecnica delle Marche, Ancona (AN), Italia	15
3.3	Test Dinamico: Riprese della videocamera ad alta velocità degli impatti	15
3.4	Test Quasi-Statico: Esempio di 4 dei provini testati, sopra due Gyroid 1.6, sotto due Diamond 1.6	16
3.5	Risultati ottenuti per i provini Diamond 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda	17
3.6	Risultati ottenuti per i provini Gyroid 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda	17
3.7	Risultati ottenuti per i provini Diamond 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda	18
3.8	Risultati ottenuti per i provini Gyroid 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda	18
4.1	Test Dinamico: Confronto tra i grafici dei provini Diamond 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda	19
4.2	Test Dinamico: Confronto tra i grafici dei provini Gyroid 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda	20

Elenco delle figure

4.3	Test Quasi-Statico: Confronto tra i grafici dei provini Diamond 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda	20
4.4	Test Quasi-Statico: Confronto tra i grafici dei provini Gyroid 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda	21
4.5	Tutti i grafici significativi messi a confronto: sopra i Test Dinamici, sotto i test Quasi-Statici	22
4.6	Modulo di Young valutato nei test Dinamici 4.5	23
4.7	Modulo di Young valutato nei test Quasi-Statici 4.5	23
4.8	Picco di Stress valutato nei test Dinamici 4.5	24
4.9	Picco di Stress valutato nei test Quasi-Statici 4.5	24
4.10	Energia Specifica Assorbita valutata nei test Dinamici 4.5	25
4.11	Energia Specifica Assorbita valutata nei test Quasi-Statici 4.5	26

Capitolo 1

Panoramica sull'Additive Manufacturing

1.1 Introduzione

In questo primo capitolo fornirò i concetti essenziali di Additive Manufacturing per poter comprendere il lavoro di sperimentazione svolto (si possono ritrovare queste stesse informazioni in modo più approfondito nel documento da cui io stesso ho estratto questo sunto [1]). L' Additive Manufacturing (Manifattura Additiva), conosciuta anche come stampa 3D è un processo che al suo interno comprende già oggi tante metodologie diverse per la creazione di Manufatti tridimensionali, non dalla sottrazione di materiale del grezzo di partenza bensì da una aggiunta progressiva di materiale. Questa “Addizione” viene effettuata da una macchina che si muove secondo determinati comandi forniti da un programma che rielabora un modello 3D dividendolo in tanti strati (chiamati Layer). Il materiale verrà poi “depositato” riproducendoli uno alla volta per andare a formare poi il pezzo finale.

L'AM fu introdotta per la prima volta commercialmente nel 1987 con la stereolitografia (SLA) [1]. Da allora l'Additive Manufacturing si è evoluta molto rapidamente specialmente nell'ultima decade. Sono state sviluppate diverse tecniche, alcune anche diverse dall'idea originale di depositare un layer di materiale sopra l'altro: ora si spazia dall'utilizzo di materiali innovativi al posizionare l'estrusore in configurazioni diverse fino all'eliminazione dell'estrusore sostituito da raggi UV proiettati in una bacinella piena di fotopolimero liquido.

Al giorno d'oggi le varie tecniche di AM vengono classificate in molti modi nella letteratura, le due principali distinzioni sono fatte per il metodo con cui il materiale viene depositato e per le tipologie di materiale che può “stampare”. Si possono classificare i processi di AM in 7 categorie principali [1]. Ai fini di questa tesi ci concentreremo su oggetti stampati tramite due metodologie: **Fused Deposition Modeling** e **Stereolitography**

1.2 Analisi dei principali metodi di stampa 3D

1.2.1 FDM: Fused Deposition Modeling [1]

Le stampanti che usano questo metodo sono le più utilizzate e diffuse, nonchè il riferimento comune per quando si parla di Additive Manufacturing. Il loro funziona-

mento è basato sull'estrusione di un polimero termoplastico filiforme. L'organo mobile di stampa è costituito da un ugello con una resistenza che riscaldandosi ammorbidisce il polimero inducendolo in uno stato semiliquido. Questa "testa" è montata su 3 assi e movimentata, tramite questi, da altrettanti motori. Un programma converte il file di un oggetto tridimensionale dividendolo in tanti strati sovrapposti e progetta quindi il movimento che la testa dovrà effettuare per produrre il pezzo finito. Questa, muovendosi, deposita il materiale strato per strato, i vari Layer, fino a creare una struttura 3D, ovvero il prodotto finito.

I filamenti usati più comunemente in questo specifico tipo di stampa sono polimeri termoplastici appunto, primo tra tutti il PLA. Alcuni di questi possono essere mischiati con altri materiali, come ad esempio microfibre di carbonio, per migliorare le proprietà del prodotto finito.

Esiste, per questo metodo, anche la possibilità di creare, in un unico processo di stampa, oggetti costituiti da diversi materiali; infatti esistono ugelli capaci di cambiare filo durante la lavorazione aumentando esponenzialmente le capacità di impiego (nonché il costo).

1.2.2 SLA: Stereolitography [1]

La Stereolitografia si distingue dagli altri metodi di stampa per le sue particolari modalità. Questo metodo impiega infatti un raggio laser UV che induce la Polimerizzazione. Il materiale, un fotopolimero, viene tenuto in un apposito serbatoio. Così il laser muovendosi sul piano X-Y crea i layer mentre la base di stampa si muove sull'asse Z ogni qual volta un layer è stato completato. La Stampa **SLA** si divide in due tipi principali: Top-Down e Bottom-Up (*in questa tesi approfondirò solo uno dei due perchè è il metodo che è stato usato per creare i provini*).

Bottom-Up: In questo tipo di stampa il raggio laser UV è direzionato verso l'alto. Il serbatoio che contiene la resina ha, infatti, una finestra trasparente attraverso la quale il laser passa inducendo il materiale alla polimerizzazione e formando un layer. Dopo la creazione di ogni layer la base di stampa viene sollevata e il processo riparte. Questo approccio porta una maggiore risoluzione ma richiede anche un numero maggiore di supporti, la qual cosa, per pezzi particolarmente complessi, può diventare problematica. Una volta che la stampa è terminata (tutti i layer sono stati creati), il prodotto si può rimuovere dalla stampante ma la sua lavorazione non è ancora terminata: mancano ancora due passaggi fondamentali.

Nel primo passaggio il pezzo stampato viene "lavato", solitamente per immersione, con un solvente al fine di rimuovere dalla superficie eventuali rimanenze di resina liquida (quindi non polimerizzata).

L'ultimo fondamentale passaggio consiste in una fase di "cottura", chiamata in gergo tecnico "cura", dove il pezzo finito viene posto in un "forno" a raggi UV: questo passaggio finisce la polimerizzazione di tutto il pezzo e lo consolida facendogli ottenere le proprietà meccaniche di durezza, resistenza e plasticità finali.

I materiali più spesso utilizzati nell'**SLA** sono resine Acriliche e Epossidiche. Concludiamo quindi dicendo che questo processo permette di ottenere un'elevata precisione e risoluzione ma evidenziando al contempo che è molto lento, indi per cui è consigliabile usare tale metodo per la stampa di piccoli pezzi precisi.

1.3 Punti di forza (PRO)

Come ogni nuova tecnologia, anche l'AM ha dei punti di forza innegabili e difficilmente riproducibili con altre tecniche.

- Primo tra tutti, va menzionata l'elevata *Versatilità* visto che non c'è alcun bisogno di una catena di produzione specifica per ogni singolo componente, ma ogni stampa può essere profondamente diversa l'una dall'altra e con delle tempistiche di cambio di produzione minime, in relazione a una catena produttiva per estrusione.
- Sicuramente al secondo posto ci sono le numerose *Potenzialità* perchè la "creazione" così puntuale del manufatto permette di avere un controllo totale sul prodotto finale. Questo apre il campo alla possibilità, tra le altre cose, di generare strutture la cui realizzazione sarebbe altrimenti impossibile (come strutture cellulari complesse, lo vedremo più avanti nella tesi).
- Un altro vantaggio è rappresentato dall'*ingombro tendenzialmente ridotto* di una stampante 3D in relazione a un macchinario che potrebbe produrre lo stesso tipo di pezzo o a una catena di produzione con vari passaggi di lavorazione.
- Come ultimo vantaggio c'è anche da citare una *Semplicità* di utilizzo: non è necessaria nessuna logistica che abbia lo scopo di valutare quale sia il miglior modo per impiegare le macchine al fine di realizzare il pezzo; basta caricare il file tridimensionale dell'elemento e un programma apposito lo analizza e rielabora in informazioni per la stampante, e possiamo essere certi che il prodotto finale sarà esattamente come lo vogliamo.

Unica postilla che per onestà intellettuale va aggiunta, alcuni pezzi, con forme o baricentri strani, potranno aver bisogno di supporti in fase di creazione che permettano alla struttura di non collassare su se stessa prima che il processo sia completato. In ogni caso anche questi supporti vengono automaticamente elaborati dai programmi e sono molto semplici da rimuovere una volta che il pezzo è pronto.

1.4 Punti di debolezza (CONTRO)

Naturalmente essendo una, relativamente, nuova tecnologia la stampa 3D ha ancora degli svantaggi, alcuni anche evidenti, ma che anno dopo anno vengono sempre più limati, dato anche il crescente interesse verso questa tecnologia.

- Il primo e più evidente limite dell'AM consiste nella sua *Limitata capacità di impiego*. Infatti, se è vero che si può creare praticamente ogni forma concepibile, non sono molti i materiali che si prestano al processo di stampa 3D; generalmente si parla di polimeri (come indicato anche nei due casi in analisi **SLA 1.2.2** e **FDM 1.2.1**), anche se negli ultimi anni sono state sviluppate nuove metodologie che permettono di stampare: Metallo, Polimeri compositi con altri materiali come Carbonio (che vedremo più avanti nella tesi) e addirittura il legno.
- Probabilmente il secondo maggior svantaggio dell'AM è la "Velocità" o meglio il *tempo*. Le stampanti 3D sono dei macchinari estremamente precisi nell'esecuzione ma questa creazione così specifica necessita di tempi molto lunghi per essere portata a termine. Infatti, dipendentemente da diversi fattori, come la dimensione, il tipo di materiale impiegato, le specifiche di stampa e anche la finitura superficiale richiesta, un singolo processo di stampa può richiedere dalle 2 alle 20+ ore.
- Un altro evidente Contro dell'AM è il *costo*: come tutte le tecnologie "nuove" o comunque "non ampiamente diffuse" non ha ancora una produzione su larga scala (anche questo sta cambiando, soprattutto negli ultimi anni, durante i quali modelli di macchina con funzioni basilari sono diventati alla portata di acquirenti privati). Questo si ripercuote sul costo di questi macchinari, soprattutto per le recentissime tecnologie di stampa dei metalli e dei materiali compositi, che possono toccare cifre elevate e rendere quindi l'acquisto di una stampante 3D una scelta mirata a uno scopo produttivo ben preciso e certamente non un sostituto efficace degli attuali metodi di produzione "per sottrazione" in serie.
- Un ultimo contro che potrebbe essere estrapolato dai punti sopraelencati, ma vale la pena di evidenziare, è *il piano di stampa*. Questo rappresenta *lo spazio tridimensionale massimo entro cui una stampante può produrre un pezzo* e quindi **ne definisce le dimensioni massime** rendendolo uno dei fattori più rilevanti per una macchina di AM. Qui troviamo il limite più evidente delle stampanti 3D, infatti all'aumento del piano di stampa il prezzo cresce esponenzialmente.

1.5 Materiali Impiegati

Come già accennato precedentemente ci sono diversi materiali che è possibile impiegare. Per questa sperimentazione ne abbiamo usati due in particolare.

Per la sperimentazione preliminare effettuata solo per capire quale sarebbe stato il miglior modo di effettuare lo studio, i provini impiegati sono stati prodotti tramite la **SLA 1.2.2** utilizzando quindi dei fotopolimeri [2].

Per la Sperimentazione rigorosa atta a valutare le nostre ipotesi, invece, sono stati impiegati dei provini stampati tramite **FDM 1.2.1**, quindi con un polimero termoplastico, in particolare **Nylon PA**, con l'aggiunta di un **10% di fibre di carbonio corte**. Questi provini ci sono stati forniti dal Politecnico di Torino.

1.6 Nuove strutture realizzabili solo tramite l'AM

Grazie alle potenzialità dell'Additive Manufacturing nella creazione di qualsiasi forma complessa è stato possibile creare delle strutture con delle geometrie non realizzabili in altro modo. In particolare in questa tesi ci interesseremo delle strutture cellulari e più specificatamente delle **Triplic Periodic Minimal Surface o TPMS** [3]. In questa Tesi abbiamo infatti utilizzato provini realizzati con due di queste forme, denominate **Gyroid** e **Schwarz Diamond** (che da ora in poi chiameremo solo Diamond per semplicità).

Le TPMS sono strutture geometriche particolari. Si basano sulle *superfici minime*, elaborate risolvendo la Trasformata di Fourier. Queste vengono poi sviluppate in modo *periodico* in *tutte e tre le direzioni* (da qui il nome Triplic Periodic Minimal Surface appunto) [3]

- **GYROID** Tra i migliori fattori di queste strutture altamente ingegnerizzate possiamo annoverare soprattutto una grande deformazione quando soggette a compressione o tensione. Questo permette a queste strutture di assorbire una grande quantità di energia ed è stato inoltre osservato che ad una maggiore densità relativa corrisponde un incremento ulteriore di energia assorbita.



Figura 1.1: Singola cella della struttura Gyroid

- **DIAMOND** Le strutture Diamond presentano una maggiore rigidità. Hanno una resistenza più alta che le porta ad assorbire meno energia e a deformarsi di meno. Queste caratteristiche sono probabilmente dovute alla sua struttura che vede una maggiore distribuzione di materiale all'interno del dominio del volume e quindi una distribuzione delle sollecitazioni più efficace.

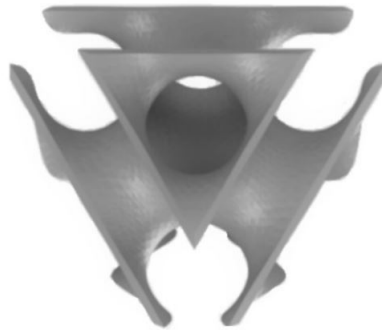


Figura 1.2: Singola cella della struttura Diamond

Capitolo 2

SPERIMENTAZIONE PRELIMINARE

In questa fase l'obiettivo è testare dei provini delle due strutture cellulari: **Gyroid** 1.6 e **Diamond** 1.6. Oltre alla differenza nelle strutture cellulari, prenderemo un campione di provini stampati con varie densità specifiche, così da valutare l'eventuale influenza di questo fattore nel nostro studio. Le densità saranno: **15%, 20%, 25%, 30%**.

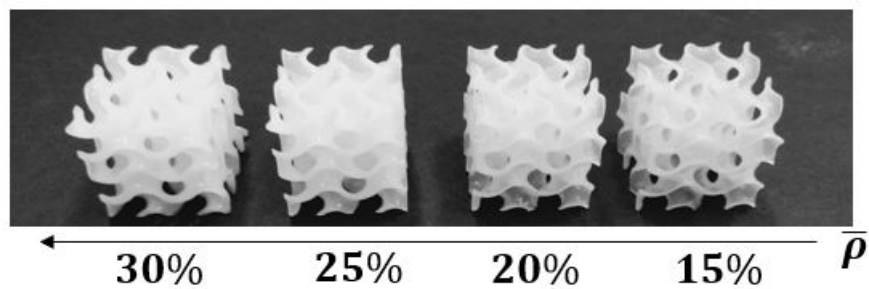


Figura 2.1: Confronto tra Provini delle varie densità specifiche (**Gyroid**)

Il materiale usato per la ricopertura è uno smalto epossidico bicomponente della Prochima [4]



Figura 2.2: Immagine del prodotto: SMALTO VERNICE ATOSSICA TRASPARENTE DURALOID AL-30 2.0 A+B

Durante questa **Sperimentazione Preliminare** non abbiamo usato i provini in Nylon PA con fibre di carbonio, ma dei provini stampati internamente con il metodo **SLA** 1.2.2 utilizzando come materiale il **Liqucrate, PREMIUM FLEX** [2].

Capitolo 2 SPERIMENTAZIONE PRELIMINARE

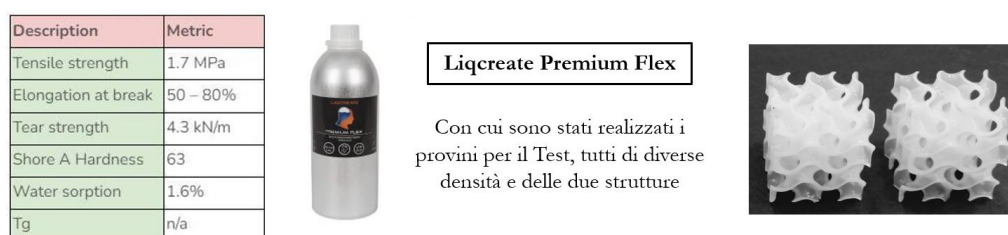


Figura 2.3: Panoramica del Fotopolimero impiegato nella realizzazione dei provini per la sperimentazione preliminare [2]

2.1 Obiettivi

L'obiettivo di questa prima sperimentazione non sarà tanto validare o confutare la nostra ipotesi ?? bensì valutare quale siano le migliori modalità con cui effettuare la ricopertura dei provini e individuare quali invece potranno essere le maggiori sfide tecniche che dovremo affrontare.

2.2 Metodologie di impiego testate

Effettuando una approfondita ricerca preliminare abbiamo ottenuto tutte le specifiche dei vari elementi che avremmo impiegato. Tra queste forse le più importanti sono le caratteristiche tecniche dello smalto epossidico ovvero il nostro Gelcoat. Questo è venduto dal produttore in due componenti le quali, una volta accorpate, **polimerizzano**. Il processo dura qualche minuto in cui il prodotto passa da uno stato liquido a uno solido aumentando progressivamente la viscosità man mano che la polimerizzazione si completa. Per questo era fondamentale conoscere le esatte proporzioni e tempistiche di impiego. Queste informazioni sono state molto importanti per definire una linea di azione preliminare.

Componente A: resina epossidica liquida esente da solventi.
Componente B: indurente addotto a base di ammina ciclo alifatica ad alta tenuta all'ingiallimento.

Caratteristiche

	Componente A	Componente B	Miscela
Viscosità (mPa.sec a 25°C)	2.000±100	700±50	1.500±50
Densità (Kg/Lt a 25°C)	1,16	1,03	1,12

Rapporto Base/Indurente	peso/peso	100/33
Tempo di lavorazione (pot-life) ¹	minuti	35
Indurimento fuori polvere (330µm a 25°C) ²	ore	8
Indurimento totale (330 µm a 25°C)	ore	72
Tempo sovraverniciatura (330 µm a 25°C)	ore	10
Resa media per spessore 330 µm	mq/Kg	3,0

Figura 2.4: Estratto della scheda tecnica dello smalto

I valori evidenziati nella figura 2.4 sono le tempistiche di impiego, fondamentali quando si utilizza un prodotto del genere

Evidenziamo come informazioni maggiormente degne di nota la **Temperatura di impiego di 25°** e, in caso di temperature inferiori o applicazione a spruzzo, la possibilità di **diluire il composto con varie percentuali di alcool dal 4 al 10%**. Inoltre viene indicato di applicare una sola mano in condizioni di temperatura di impiego e di non interagire con il composto fino al termine del tempo di indurimento totale poichè risulta ancora relativamente fragile e potrebbe compromettere il risultato finale.

Una volta ottenute le specifiche di impiego della resina abbiamo elaborato le varie metodologie di ricopertura possibili; le variabili che abbiamo individuato erano principalmente:

- Applicazione con il pennello
 - Grandezza del pennello
 - Diluizione del prodotto con alcool (con le modalità indicate dallo stesso produttore)
 - Numero di "mani" applicate

- Immersione del provino nel prodotto
 - Tempo di immersione dei provini
 - Immersione dei provini contemporanea o uno successivamente all'altro
 - Diluizione del prodotto con dell'alcool

E così abbiamo ricoperto i provini testando ognuna di queste variabili. La figura sottostante 2.5 mostra le immagini di ognuno dei provini ricoperti così ottenuti con una dettagliata lista di tutte le modalità impiegate per ricoprire ognuno di essi, dal metodo di applicazione alla eventuale diluizione e le altre discriminanti.

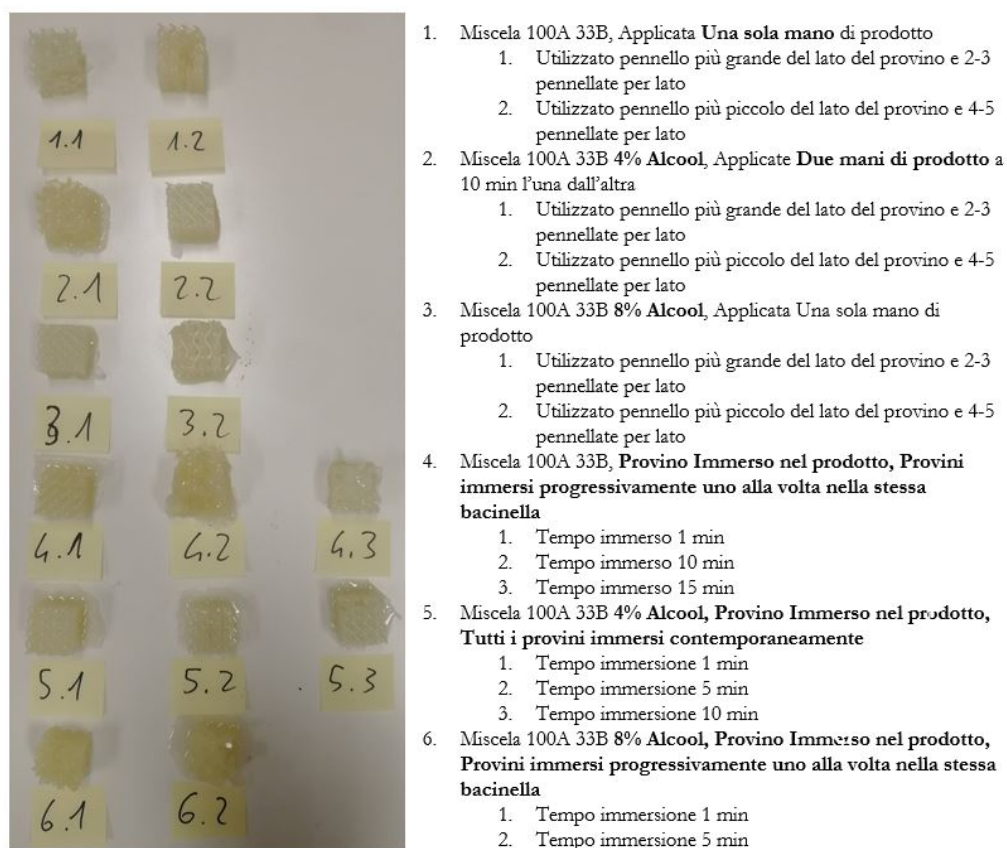


Figura 2.5: Lista provini della sperimentazione preliminare affiancata dai dettagli di ogni diverso metodo testato

2.3 Risultati della Sperimentazione Preliminare

Già durante la fase di ricopertura abbiamo potuto fare delle osservazioni che ci hanno aiutato a renderci conto delle sfide da affrontare in questa sperimentazione.

Le prime problematiche le abbiamo riscontrate già in fase di ricopertura, durante la quale siamo giunti alla conclusione che **il metodo per immersione** è completamente da bocciare. Di seguito elenchiamo i principali motivi di questa nostra affermazione:

- In primo luogo si potrebbe citare il fatto che il prodotto (Gelcoat della Prochima [4]) non è pensato per questo utilizzo.
- Il tempo in immersione diventa una variabile fondamentale che però deve essere considerata anche insieme al tempo trascorso dal momento in cui le due componenti del Gelcoat sono state accorpate (ricordiamo il tempo di impiego evidenziato in precedenza 2.4); questo perchè abbiamo notato che, introducendo un provino nel prodotto già miscelato da 10 minuti, anche per tempistiche di immersione ridotte (come 5 o 1 minuto), ne fuoriusciva con ammassi grumosi solidificati che avevano ormai aderito in modo quasi stabile alla struttura, e otturato le cellette interne.

2.3 Risultati della Sperimentazione Preliminare

- Da considerare poi, per ragioni di sicurezza, che, trattandosi di una resina epossidica, essa genera la superficie di smalto trasparente tramite processo di polimerizzazione. Questo è un processo esotermico: quindi, tanto prodotto raggruppato in poco spazio genera una elevata quantità di calore, al punto da diventare un pericolo. Abbiamo potuto riscontrare questa problematica in modo più accentuato nella miscela che era stata diluita con una percentuale di alcool: la miscela ha addirittura "bollito" in superficie [6 nella figura 2.6 sottostante].
- Infine, un fattore non meno importante, anzi fondamentale in un'ottica di impiego futuro, è lo spreco di materiale. Infatti la quantità di prodotto andato "perso" perchè solidificatosi nella vaschetta e che quindi non ha aderito alla superficie dei provini, è molto elevata. Questa osservazione risulta più significativa per il fatto che, invece, nell'applicazione tramite pennello lo spreco è molto ridotto.

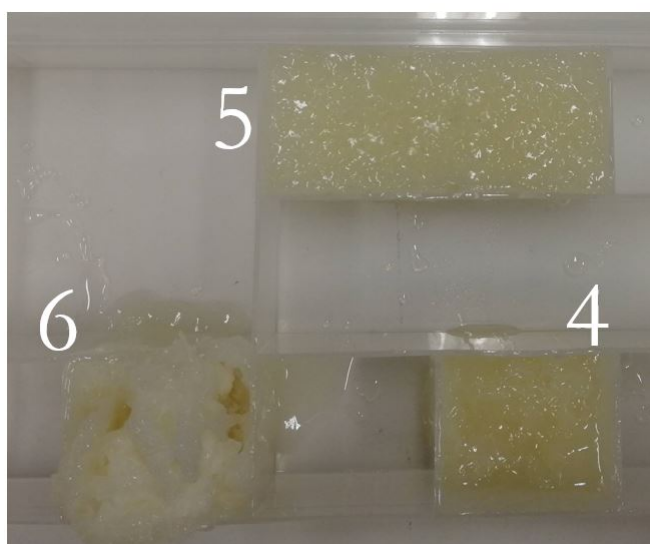


Figura 2.6: Stato della vasche impiegate per l'immersione durante la Sperimentazione Preliminare, usate per ricoprire i provini serie 4-5-6 nella figura 2.5

Pesando i provini così ottenuti abbiamo notato che la ricopertura porta il nuovo oggetto composito (provino in polimero con forma cellulare, ricoperto superficialmente di resina epossidica) ad aumentare la sua densità relativa di un fattore pari a **+1.14** (es: per i provini 15% abbiamo riscontrato un aumento del 2% portandoli a una densità relativa di 17%).

A questo punto abbiamo testato i provini con una **prova a compressione Quasi-Statica** le dimensioni dei provini sono **30x30x30mm** e la velocità di deformazione che abbiamo impiegato è stata di 4 mm/min fino a una compressione di 20 mm, circa il 70% cioè fino al punto di densificazione [5].

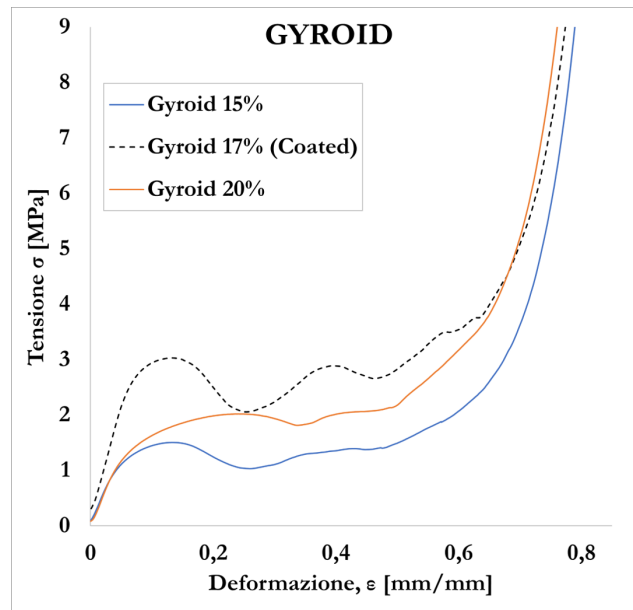


Figura 2.7: Grafico indicativo dei risultati della Sperimentazione Preliminare

Nella legenda della figura 2.7 vengono indicati due provini non ricoperti di densità differenti e un provino ricoperto con densità specifica compresa tra i due.

I risultati così ottenuti ci hanno permesso di fare le ultime valutazioni in merito al miglior metodo di impiego, e ci hanno anche fornito una prima prova di validità della nostra ipotesi.

Prima descriviamo le osservazioni di tipo qualitativo:

- Non ci sono variazioni apprezzabili nella ricopertura del provino utilizzando pennelli di dimensioni diverse ma abbiamo riscontrato una maggiore praticità a eseguire l'operazione utilizzando un pennello di larghezza contenuta, pari circa alla base del provino.
- Non abbiamo notato miglioramenti significativi nell'applicazione del prodotto diluito con alcool (oltre alle problematiche individuate nel caso dell'immersione) pertanto eviteremo di impiegarlo.

Inoltre questi risultati sono incoraggianti per la validità della nostra ipotesi poiché, come possiamo notare in maniera evidente nella figura 2.7, **per densità relative simili l'area sottesa dal grafico del provino ricoperto è maggiore. Il che denota una maggiore energia assorbita.**

Capitolo 3

Ricopertura strutture

Dopo aver valutato le varie modalità di impiego e le possibili sfide tecnologiche di questo processo è arrivato il momento di sperimentare sui provini che ci erano stati forniti, stampati in **FDM 1.2.1** in NylonPA con 10 % di fibre di carbonio corte, dal politecnico di Torino.



Figura 3.1: Esempio di provino in NylonPA fornito dal Politecnico di Torino (Diamond 1.6)

3.1 PROCEDURA OPERATIVA

1. Preparare il composto di Gelcoat [4] in una bacinella seguendo le proporzioni indicate dal produttore 2.4 senza utilizzare nessun additivo.
2. Impiegare un pennello di dimensioni simili alla base del provino.
3. Applicare una sola mano di prodotto effettuando 4-5 pennellate **per ogni lato** (ruotando spesso il provino così che il prodotto possa penetrare bene in tutte le celle (ricordiamo che queste sono strutture a celle ripetute periodicamente [3]).
4. Dopo aver applicato il Gelcoat su tutte le superfici appoggiare il pezzo su una griglia. Questo permetterà la colatura del prodotto in eccesso così da evitare aberrazioni sul fondo del provino e scongiurare il rischio di occlusione delle celle.

5. Porre una bacinella al di sotto della griglia così da recuperare l'eventuale prodotto superfluo che colerà dai pezzi appena trattati. Questo permetterà di diminuire sensibilmente gli sprechi dato che il prodotto colato può essere reimpiegato fino a 15-20 min dopo la miscelazione originale (ricordiamo i tempi di impiego indicati dal produttore 2.4). Passato quel tempo la viscosità del prodotto è aumentata al punto da rendere molto probabile l'occlusione delle celle.

Abbiamo così ricoperto 12 provini: 8 destinati al Test **Quasi-Statico** e 4 al test **Dinamico**.

Ricordiamo che la densità specifica dopo la ricopertura aumenta per i provini al 15% di un 2% (come già detto, abbiamo individuato come fattore di incremento della densità specifica derivante dalla ricopertura **1.14**).

Descrizione degli 8 provini per il test Quasi-Statico:

- **Diamond 1.6**
 - densità specifica 17%
 - densità specifica 22%
 - densità specifica 28%
 - densità specifica 34%
- **Gyroid 1.6**
 - densità specifica 17%
 - densità specifica 22%
 - densità specifica 28%
 - densità specifica 34%

Per il test **Dinamico** abbiamo usato solo i provini **Diamond** e **Gyroid** di densità specifiche **17%** e **22%**.

3.2 TEST

Per provare la bontà della nostra ipotesi e effettuare uno studio più completo testeremo i provini con prova **Quasi-Statica** e prova **Dinamica**.

3.2.1 Test Dinamico

I Test Dinamici sono stati effettuati dal dott. Utzeri tramite la **Barra Frazionata di Hopkins**. Questo macchinario agisce provocando sul provino 3 impatti in rapidissima successione. Tramite la registrazione degli impatti con una videocamera ad alta velocità è possibile analizzare le configurazioni dei provini prima e dopo il test, ricavando così i dati della tensione/deformazione.

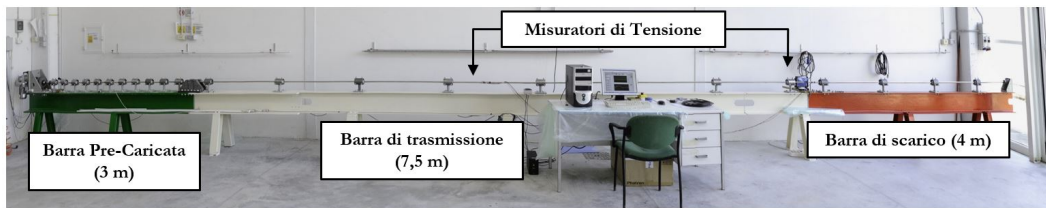


Figura 3.2: Test Dinamico: Barra Frazionata di Hopkins presente all'Università Politecnica delle Marche, Ancona (AN), Italia

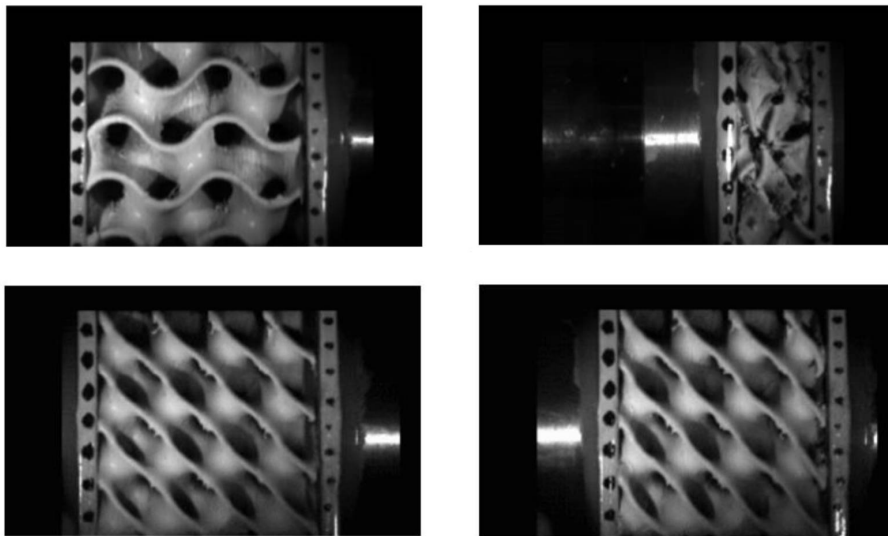


Figura 3.3: Test Dinamico: Riprese della videocamera ad alta velocità degli impatti

Nella figura 3.3 le immagini superiori sono della struttura **Gyroid** 1.6 mentre nelle immagini inferiori possiamo vedere la struttura **Diamond** 1.6.

3.2.2 Test Quasi-Statico

Il test Quasi-Statico è invece stato effettuato con gli stessi criteri utilizzati durante la **Sperimentazione Preliminare** 2.3. Utilizzando una pressa abbiamo applicato una tensione sempre crescente indicativamente fino alla riduzione del 70% del volume che corrisponde circa a 20-25 mm di compressione, cioè al punto definito come di Densificazione [5] (ricordiamo che le dimensioni dei provini sono 30x30x30 mm).

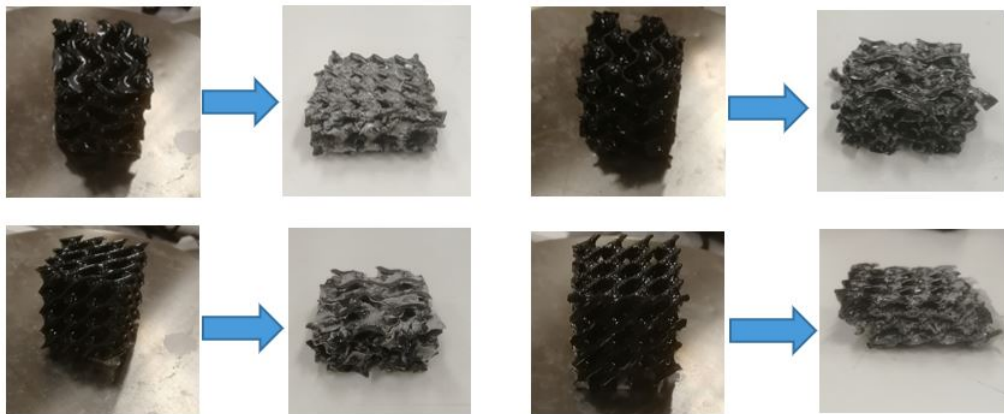


Figura 3.4: Test Quasi-Statico: Esempio di 4 dei provini testati, sopra due **Gyroid** 1.6, sotto due **Diamond** 1.6

3.3 Risultati dei Test

Abbiamo trattato poi i dati ottenuti dai test e tabulati in dei grafici Tensione[Mpa] /Deformazione specifica.

Notare che nei grafici viene utilizzato il termine inglese "Coated" per indicare se un provino è ricoperto.

Notare che nel test Quasi-Statico vi sono delle linee tratteggiate. Queste intersecano le curve dei grafici indicando la quota di densificazione del provino [5].

3.3.1 Risultati Test Dinamico

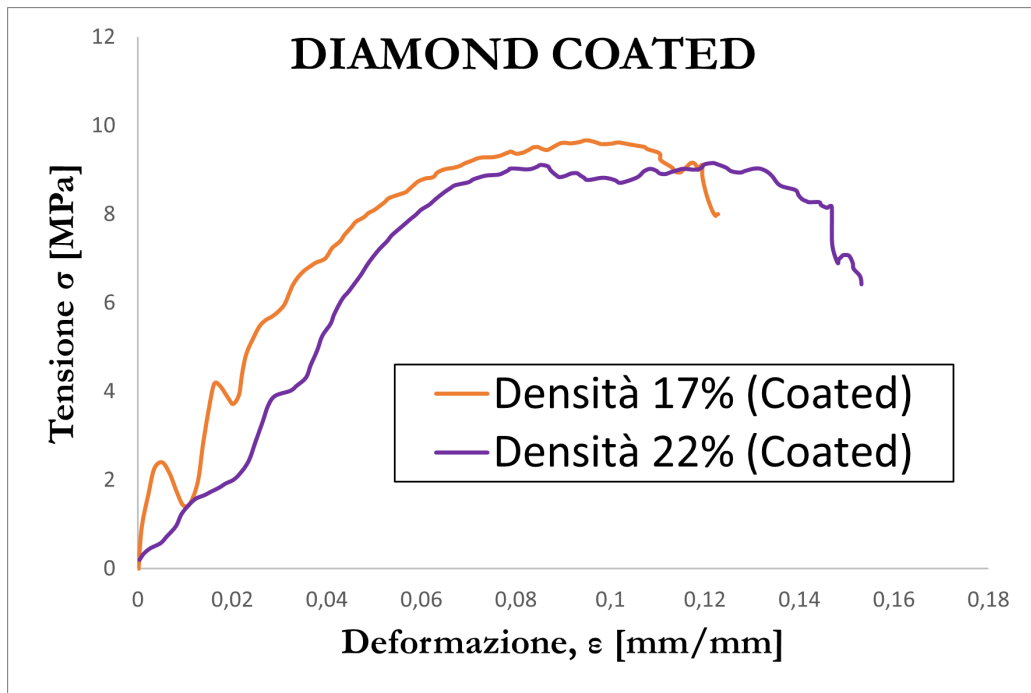


Figura 3.5: Risultati ottenuti per i provini Diamond 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda

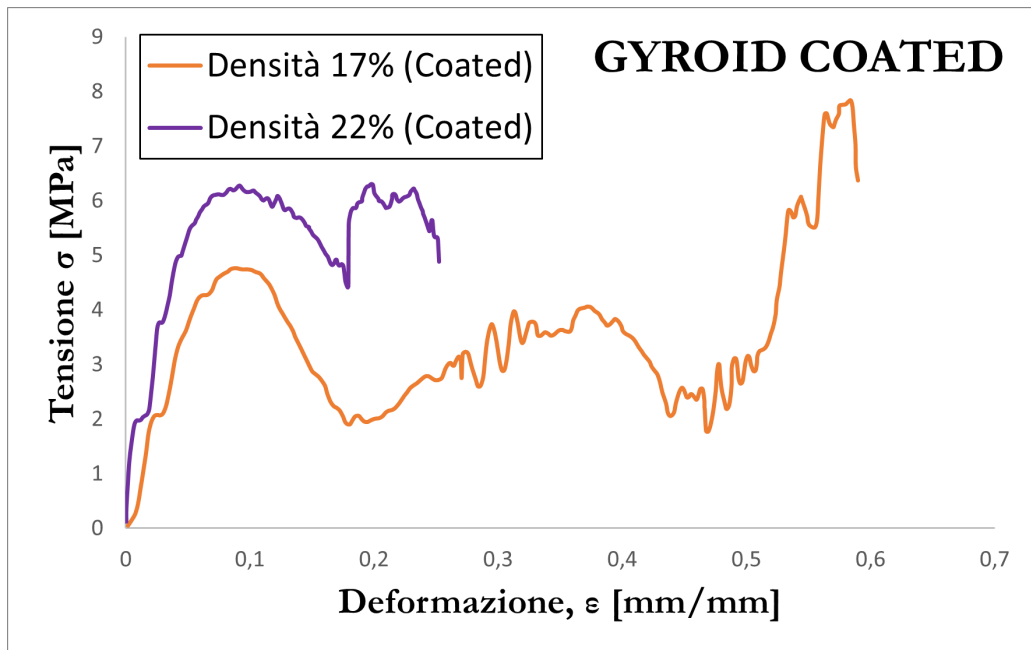


Figura 3.6: Risultati ottenuti per i provini Gyroid 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda

3.3.2 Risultati Test Quasi-Statico

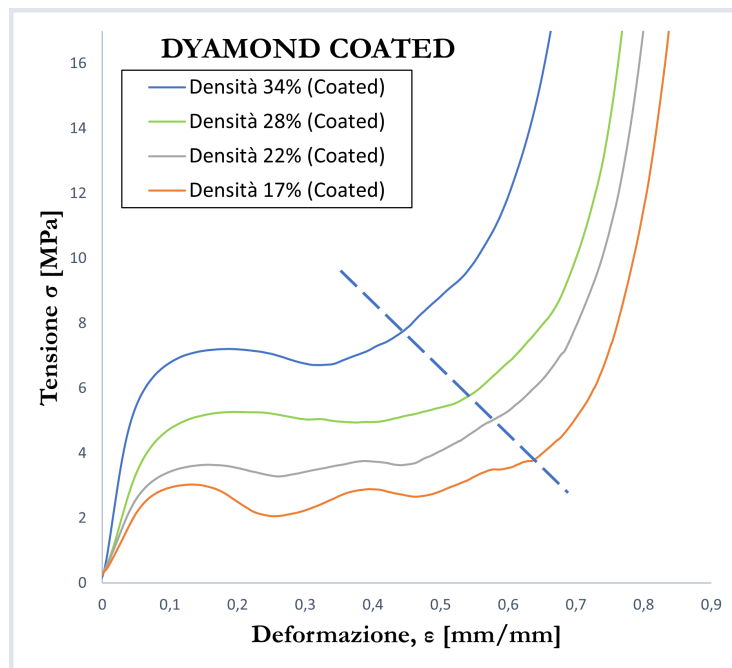


Figura 3.7: Risultati ottenuti per i provini Diamond 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda

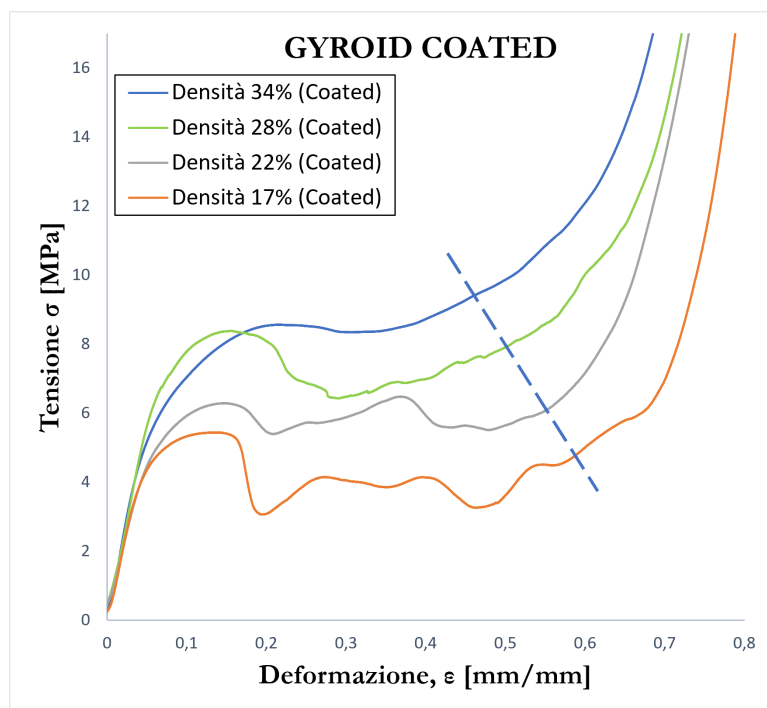


Figura 3.8: Risultati ottenuti per i provini Gyroid 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda

Capitolo 4

Discussione dei risultati

Grazie alle nostre sperimentazioni abbiamo ottenuto un set di dati coerenti. Per capire se sono promettenti al fine di verificare la nostra ipotesi, li abbiamo confrontati con i dati degli stessi provini **NylonPA con 10% di fibre di carbonio corte** non ricoperti forniti dal Politecnico di Torino i quali riportano le caratteristiche meccaniche delle strutture senza ricopertura.

4.1 Confronto tra grafici dei provini ricoperti e non ricoperti

4.1.1 Confronto Test Dinamici

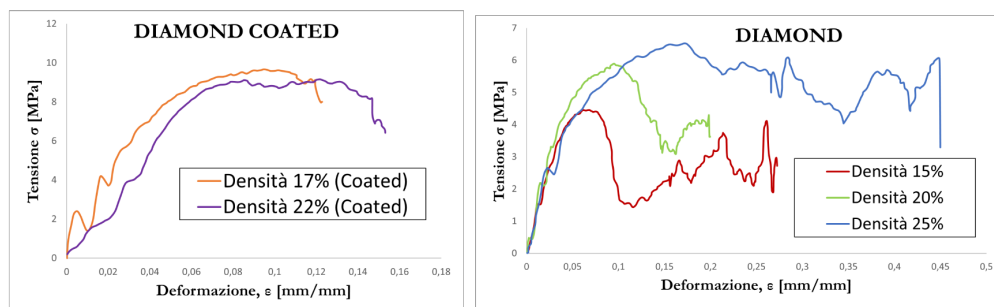


Figura 4.1: Test Dinamico: Confronto tra i grafici dei provini Diamond 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda

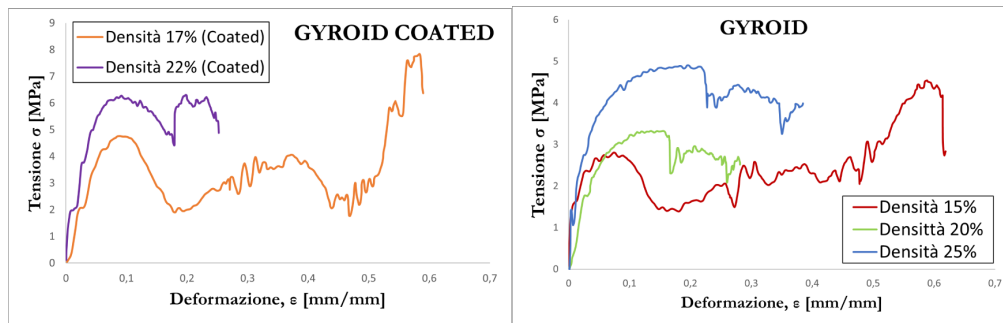


Figura 4.2: Test Dinamico: Confronto tra i grafici dei provini Gyroid 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda

Possiamo già notare osservando le ordinate che la tensione sopportata dai provini Ricoperti (Coated) è, per densità specifiche simili, maggiore.

4.1.2 Confronto Test Quasi-Statici

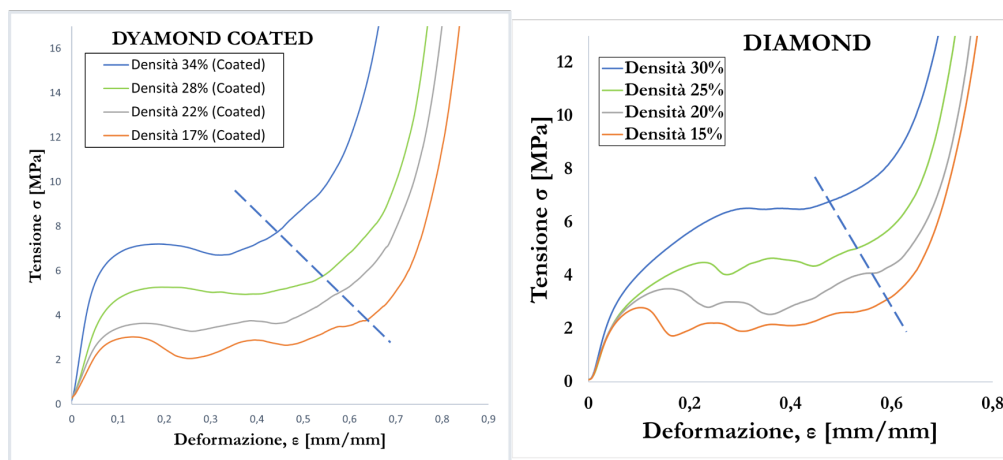


Figura 4.3: Test Quasi-Statico: Confronto tra i grafici dei provini Diamond 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda

4.2 Analisi coerente dei grafici e delle proprietà meccaniche più interessanti

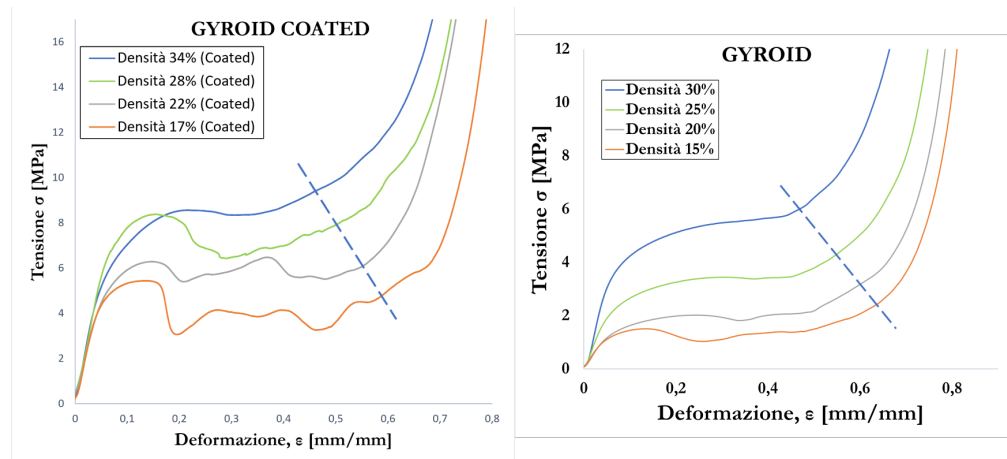


Figura 4.4: Test Quasi-Statico: Confronto tra i grafici dei provini Gyroid 1.6, le densità specifiche sono indicate nella legenda

4.2 Analisi coerente dei grafici e delle proprietà meccaniche più interessanti

Come possiamo osservare dalle scale dei grafici i provini ricoperti (coated), per densità specifiche simili, con riferimento allo stesso punto di deformazione raggiungono valori di tensione mediamente maggiori.

A questo punto dobbiamo estrapolare dei risultati scientifici da questi grafici.

Prendiamo come situazione di studio esemplificativa le tre curve rispettivamente di densità specifica 15%, 17%, 20%. Riportiamo queste curve per ogni test e per ogni struttura, rispettivamente, sullo stesso piano cartesiano.

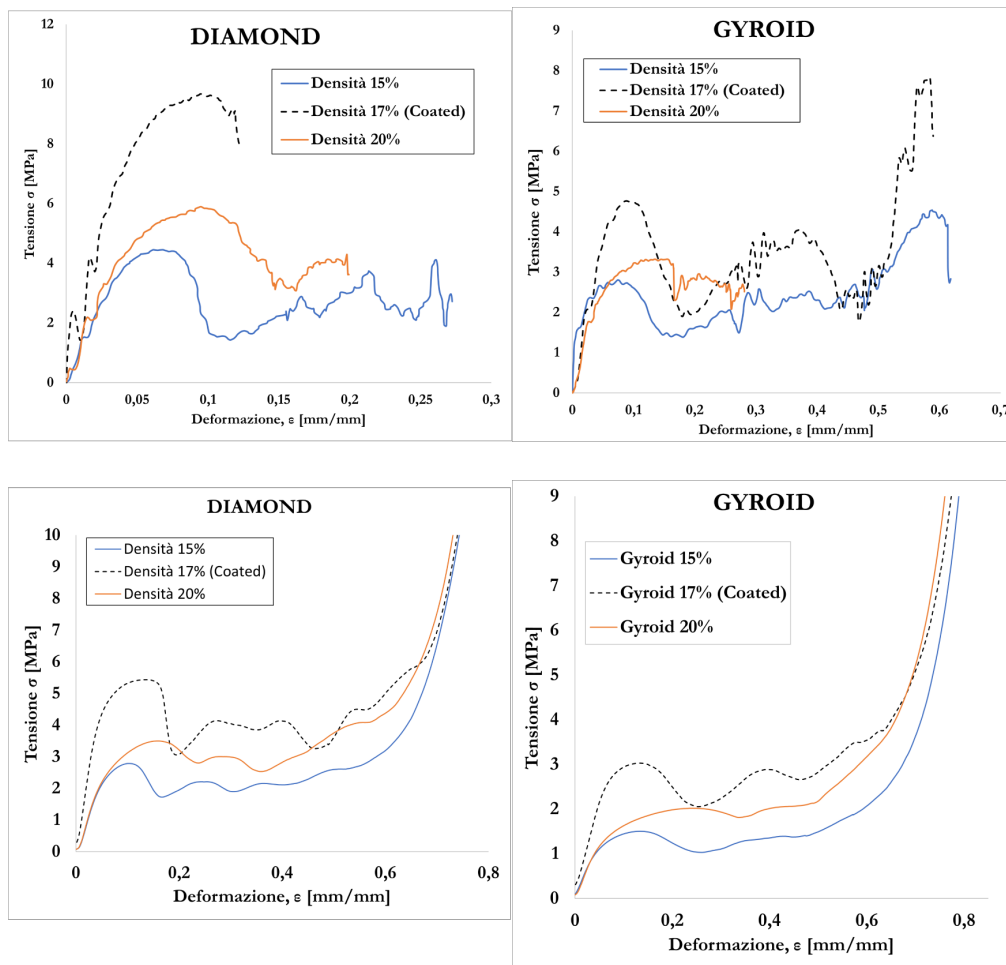


Figura 4.5: Tutti i grafici significativi messi a confronto: sopra i Test Dinamici, sotto i test Quasi-Statici

Le proprietà meccaniche che vogliamo valutare sono:

- Modulo di Young [Mpa]
- Tensione di Picco [Mpa]
- Energia Specifica Assorbita [J/g]

4.2.1 Modulo di Young

Abbiamo calcolato il modulo di Young dei vari provini in modo geometrico, cogliendo cioè un punto nella zona di deformazione elastica e facendo il rapporto, in quel punto, tra la tensione e la deformazione.

4.2 Analisi coerente dei grafici e delle proprietà meccaniche più interessanti

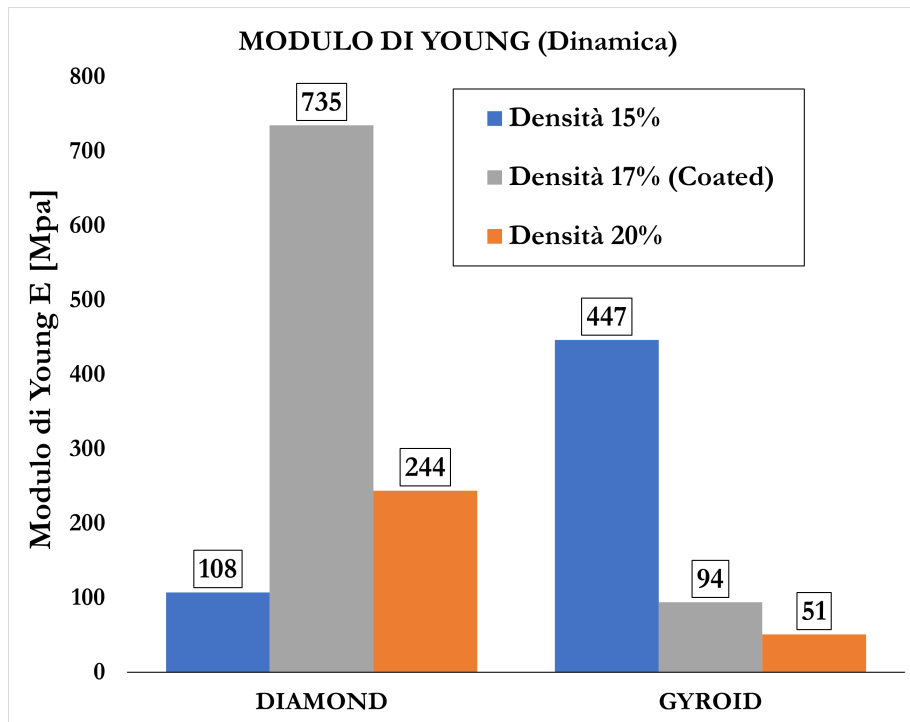


Figura 4.6: Modulo di Young valutato nei test Dinamici 4.5

Possiamo verificare come caso curioso che il Gyroid non ricoperto sembri avere un Modulo di young fuori scala; questo può essere dovuto a un errore di analisi dei dati. In ogni caso l'analisi sugli altri grafici fornisce dei risultati coerenti.

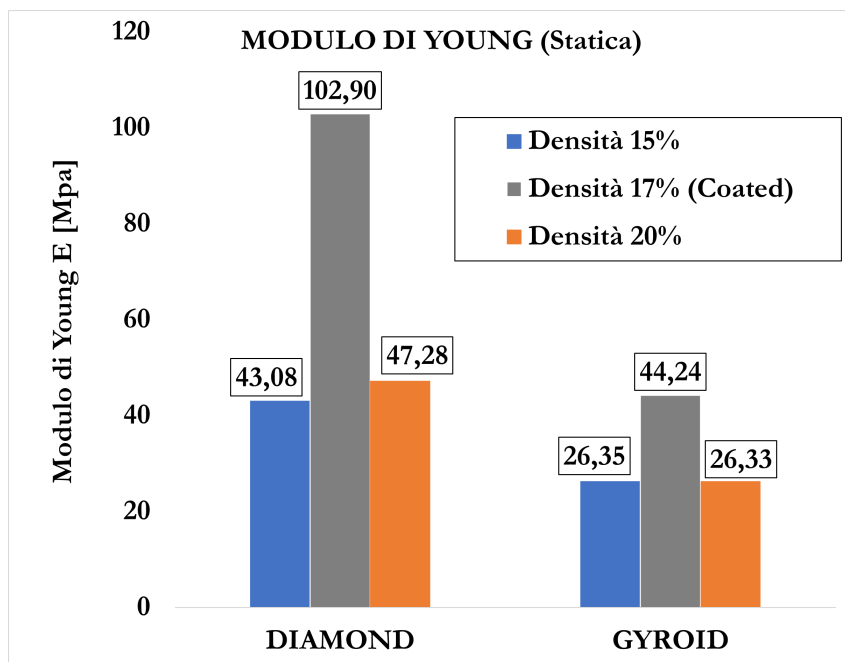


Figura 4.7: Modulo di Young valutato nei test Quasi-Statici 4.5

Osserviamo che mediamente i provini ricoperti riscontrano un Modulo di Young maggiore.

4.2.2 Picco di Stress

Calcoliamo il Picco di Stress in modo geometrico, valutando cioè il punto a tensione maggiore nel primo picco di ogni grafico.

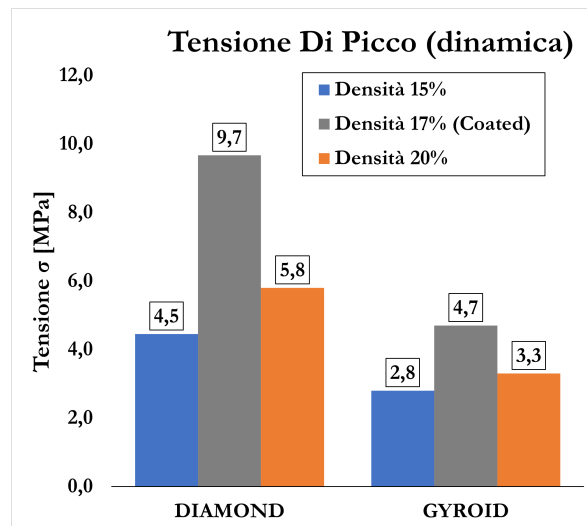


Figura 4.8: Picco di Stress valutato nei test Dinamici 4.5

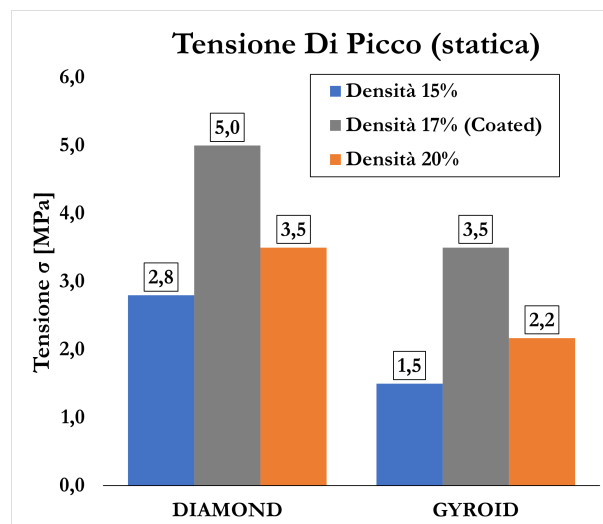


Figura 4.9: Picco di Stress valutato nei test Quasi-Statici 4.5

Osserviamo che per ogni serie di grafici i provini ricoperti hanno un Picco di Stress maggiore.

Possiamo anche notare, a supporto della bontà di questi dati, che i provini Diamond hanno tutti Picchi di stress maggiori per densità specifiche simili. Ci aspettavamo

4.2 Analisi coerente dei grafici e delle proprietà meccaniche più interessanti

questo comportamento dai Diamond essendo una struttura pensata per avere una elevata rigidità 1.6.

4.2.3 Energia Specifica Assorbita

Abbiamo calcolato l'Energia Specifica Assorbita in modo matematico, tramite foglio di calcolo, ricavando l'area sottesa da ogni punto del grafico, dall'inizio fino al punto di densificazione individuato visivamente nei grafici dalla linea tratteggiata 4.3 e 4.4 (tracciata con i criteri indicati in [5]).

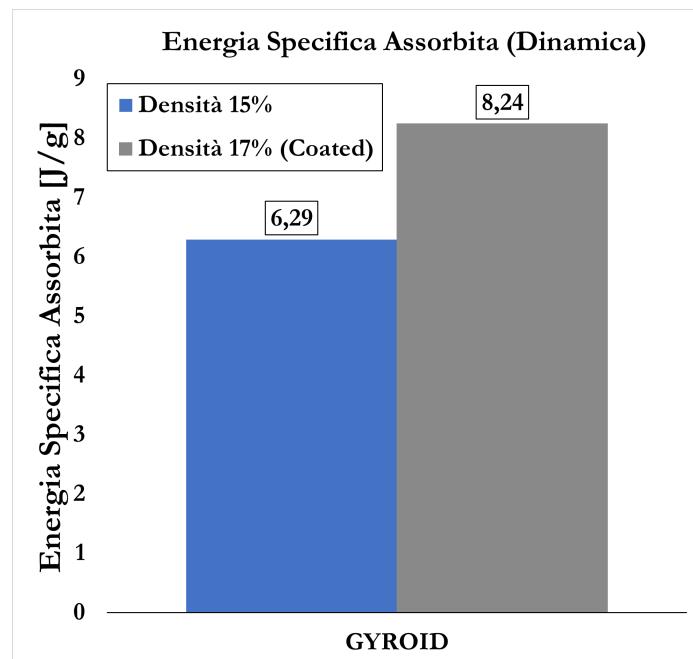


Figura 4.10: Energia Specifica Assorbita valutata nei test Dinamici 4.5

Nel grafico superiore 4.10 possiamo notare la mancanza dei dati di diversi provini. Purtroppo non è stato possibile calcolare l'Energia Specifica Assorbita per i Diamond essendo i loro grafici troppo sfasati, mentre per i Gyroid abbiamo riscontrato un problema similare che ci ha permesso di fare una valutazione coerente solo per i provini di densità 15% e 17%.

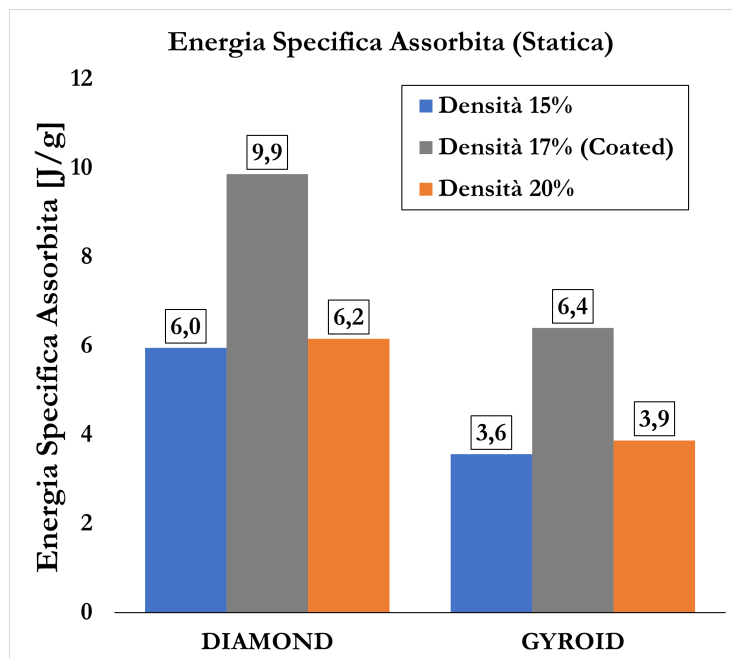


Figura 4.11: Energia Specifica Assorbita valutata nei test Quasi-Statici 4.5

Osserviamo infine che anche i risultati relativi ai calcoli dell'Energia Specifica Assorbita avvalorano la nostra ipotesi. **In ogni grafico l'Energia Specifica Assorbita è, per densità specifiche simili, maggiore.**

Capitolo 5

CONCLUSIONI

La sperimentazione che abbiamo effettuato è partita da una idea con fondamenta scientifiche teoriche solide. Abbiamo effettuato una intera fase di test preliminari al solo scopo di valutare le possibili complicazioni di implementare questo procedimento. Da tali informazioni abbiamo sviluppato un processo chiaro e ripetibile per eseguire la ricopertura. Abbiamo testato i provini in modo rigoroso e ne abbiamo elaborato i dati seguendo logica e ricerche affidabili.

Pertanto i risultati ottenuti da questa ricerca possono considerarsi attendibili, e soprattutto verificabili, oltre che naturalmente molto incoraggianti.

Possiamo affermare che le nostre ipotesi sono state del tutto attese. Il processo di ricopertura ha provocato un miglioramento sostanziale nelle proprietà meccaniche dei provini e, soprattutto, questo ampio aumento delle proprietà è stato ottenuto a fronte di un aumento di peso specifico molto contenuto.

Per concludere, è da citare anche il fatto che, ricoperti in questo modo, i provini ottengono indirettamente anche alcune delle caratteristiche riconosciute del Gelcoat: tra le più degne di nota individuiamo l'atossicità e la possibilità di entrare in contatto col cibo [4].

Queste sono tutte ottime notizie per un metodo che risulta davvero promettente al fine di creare materiali compositi leggeri e ad alte prestazioni meccaniche.

Bibliografia

- [1] Shukantu Dev Nath and Sabrina Nilufar. An overview of additive manufacturing of polymers and associated composites. *Polymers*, 12(11):2719, 2020.
- [2] Liqcreate. Liqcreate premium flex | resina per stampa 3d flessibile e morbida.
- [3] Nikolaos Kladovasilakis, Konstantinos Tsongas, and Dimitrios Tzetzis. Mechanical and fea-assisted characterization of fused filament fabricated triply periodic minimal surface structures. *Journal of Composites Science*, 5(2):58, 2021.
- [4] PROCHIMA. Resina vernice atossica trasparente duraloid al-30 2.0 a+b - prochima originale.
- [5] QM Li, I Magkiriadis, and John J Harrigan. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids. *Journal of cellular plastics*, 42(5):371–392, 2006.