

Politecnico di Torino

Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale A.A. 2022/2023 Sessione di Laurea Marzo 2023

Caratterizzazione e analisi di stabilità di strutture stampate in 3D

Relatori:

Enrico Zappino Alfonso Pagani Candidato:

Alessio Spinelli

Ringraziamenti

Ringrazio il Prof. Zappino, per avermi guidato e supportato nella fase più importante del mio percorso accademico, la mia famiglia che mi ha sempre e incondizionatamente sostenuto in questi anni di tribolazione, le mie compagne Giulia e Martina con cui ho condiviso gioie e dolori ed il compagno Cristian che mi pensa dall'alto dei cieli "è un pilota". Ringrazio inoltre i miei amici che mi hanno sopportato prestando orecchi ai miei mugugni.

Lista delle abbreviazioni

AM	Additive Manufactured
ASTM	American Standard for Testing and Materials
DIC	Digital Image Correlation
DPA	Destructive Physical Analysis
EASA	European Union Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FEM	Finite Element Method
NDT	Non-Destructive Testing
LEO	Low Earth Orbit
ТС	Type Certificate
VCT	Vibration Correlation Technique

Introduzione

Nella presente ricerca s'intende affrontare la tematica dei controlli non distruttivi in un contesto di tecnologie additive di stampati 3D. Si affronterà una prima parte concernente la caratterizzazione del materiale che è stato utilizzato per la creazione dei provini per poi analizzare e validare una metodologia di testing non distruttivo su pannelli soggetti a compressione, evitando di raggiungere la condizione di buckling, tramite l'ausilio della tecnologia VCT.

Questa ricerca risulta di particolare interesse per quelle applicazioni ad alto budget, quali ad esempio l'ambito spaziale, dove la validazione di un payload tramite controlli distruttivi risulterebbe troppo onerosa, lenta e poco efficace.

Si è partiti dalla creazione di provini conformi alla normativa ASTM-D638 ovvero, la normativa concernente i test più comuni per determinare le proprietà a trazione delle materie plastiche rinforzate e non rinforzate, così da poter condurre test distruttivi a trazione al fine di determinare le caratteristiche meccaniche del materiale plastico Onyx. È stata utilizzata, congiuntamente alle classiche prove di trazione, la tecnologia DIC in modo da poter determinare allo stesso tempo l'allungamento del provino parallelamente alla forza ed il restringimento perpendicolare ad essa, così da poter inoltre calcolare il Poisson e la sua variazione durante la prova. Dopo di che si è passati alle prove a compressione al fine di studiare il fenomeno del buckling per strutture sottili e, congiuntamente alla tecnica difetto superficiale iniziale, di validare la tecnologia VCT per la predizione del carico critico. In fine i dati ottenuti delle tecniche sperimentali sono stati comparati con quelli ottenuti tramite sperimentazioni sui i modelli 2D studiati tramite il software FEM Femap.

I test sono stati condotti in un ambiente ad atmosfera non controllata ma in numero sufficiente ad avere una validità sperimentale e poter trarre delle conclusioni coerenti. I materiali che sono stati presi in considerazione sono prettamente polimerici stampati in loco ed essenzialmente elastici non lineari. Il modello di calcolo utilizzato si è basato su strutture isotrope seppure sia noto che il comportamento dei materiali plastici stampati sia tendenzialmente ortotropo.

INDICE

Ringra	ziamenti	Ι
Lista d	elle abbreviazioni I	Ι
Introdu	nzione II	Ι
1. Sta	to dell'arte	1
1.1.	Certificazione	3
1.2.	Tecniche di stampa 3D per polimeri	5
1.3.	Testing distructivo	9
1.4.	Testing non distruttivo 1	1
2. Ca	ratterizzazione del materiale1	5
2.1.	Modello ASTM type I 1	5
2.2.	Condizioni di laboratorio e strumenti1	8
2.3.	Scheda tecnica del materiale Onyx 2	2
2.4.	Misurazioni e classificazione provini	4
2.5.	Analisi dei dati a trazione 20	6
2.6.	Analisi DIC 3	5
2.7.	Considerazioni sulla caratterizzazione	9
3. An	alisi VCT	5
3.1.	Validazione VCT con vincolo fisso	6
3.2.	Buckling con semplice appoggio 54	4
3.3.	Utilizzo della tecnica VCT su provini stampati in 3D	5

3.4. Modelli software FEM	. 75
Conclusioni	83
Indice delle figure	. 84
Indice delle tabelle	. 88
Bibliografia	89

1. Stato dell'arte

Le tecnologie di fabbricazione additiva sono relativamente giovani e rappresentano una svolta epocale, in ottica di industria 4.0, per molti settori ad alta tecnologia, in particolare v'è stato un impiego profuso di queste tecnologie nel settore industriale, aerospaziale e biomedico. I benefici della stampa 3D includono: ridotti costi di produzione, incremento di complessità delle strutture ottenibili, ampia scelta di materiali, designs facilmente generabili e ottimizzabili ed una significativa riduzione degli scarti di produzione; questo fattore contribuisce a rendere la stampa 3D un'alternativa green di produzione, inoltre, alcuni designs AM sono impossibili da ottenere tramite tecniche di lavorazione convenzionale.

Concentrandosi nel settore aerospaziale questa tecnologia risulta di particolare interesse in quanto, permette ottimizzando topologicamente le strutture, sia di avere un aumento di resistenza meccanica che una riduzione in massa delle stesse. Questa riduzione di massa presenta una tripla fonte di profitto poiché: riduce i tempi di creazione, i costi del materiale, ed i costi operativi legati al mandare in quota della massa parassita.

La Fig. 1.1 da un'idea di quanto sia cruciale la riduzione di massa nelle applicazioni aerospaziali, basti pensare che nei primi anni della corsa spaziale il costo per mandare un solo chilogrammo di payload in orbita bassa risultava in un range di $10'000 \div 100'000$. Seppure con l'avvento dei moderni lanciatori come il Falcon 9 e Falcon Heavy i costi si siano ridotti rispettivamente a 2'800/kg = 1'400/kg la variabile massa risulta sempre la più gravosa. Chiaramente la riduzione dei costi è frutto di un ridotto consumo di carburante e quindi anche ad una riduzione delle emissioni inquinanti derivanti dalla combustione.



Figura 1.1 Costi per chilo in LEO[1]

Ciò che frena un utilizzo più profuso delle tecnologie AM nell'ambito aerospaziale è la relativa giovinezza di quest'ultime, spesso si preferisce attenersi a tecniche ben strutturate e conosciute, ritenute sicure, per le quali si hanno già protocolli di verifica, validazione e le relative certificazioni di omologazione.

1.1. Certificazione

Prima che un nuovo velivolo possa operare, deve ottenere un certificato di tipo o di omologazione rilasciato dall'agenzia regolatrice EASA o dal corrispettivo americano FAA. Il certificato di omologazione prova che il tipo di velivolo soddisfa i requisiti di sicurezza dell'Unione Europea[2].

Il processo di certificazione si divide in quattro passi Fig. 1.2:



Figura 1.2 Iter per l'ottenimento di una certificazione di omologazione

1- Familiarizzazione tecnica e basi della certificazione

Il produttore del velivolo presenta un progetto all'EASA che stabilirà un set di regole che si applicheranno alla certificazione per il modello specifico di velivolo (base della certificazione).

2- Stabilire un programma di certificazione

L'EASA ed il produttore in mutuo accordo definiscono il modo per dimostrare la conformità del velivolo con le richieste della base della certificazione.

3- Dimostrazione di conformità

Il produttore dell'aeromobile deve dimostrare la conformità del proprio prodotto ai requisiti normativi: la struttura, i motori, i sistemi di controllo, i sistemi elettrici e le prestazioni di volo vengono analizzati nel rispetto della base di certificazione. Questa dimostrazione di conformità viene eseguita mediante analisi durante i test a terra ed in volo.

4- Chiusura tecnica e rilascio del benestare

Se tecnicamente soddisfatta con la dimostrazione di conformità, l'EASA chiude l'investigazione e rilascia il certificato che risulta parallelamente valido per le autorità del volo straniere al fine di operare nei loro spazi aerei.

Costi del certificato di omologazione

Per quanto riguarda i costi, tali certificazioni spaziano indicativamente dai 150'000\$ per un Light Sport Aircraft (LSA) passando per un milione di dollari per un aereo "primary category"¹ ed arrivando a 25 milioni di dollari per un velivolo Part 23[3]. Anche se le tecniche CFD promettono di ridurre i costi del testing per le certificazioni[4], questi rimangono comunque molto onerosi, ostacolando di fatto l'avvento di nuove tecnologie o riproposizioni di vecchi designs con materiali nuovi o lavorati con tecniche innovative.

¹ La "primary category" include gli aerei con semplice design intesi esclusivamente per uso personale e di piacere, come: mongolfiere, alianti, girocotteri, etc.

1.2. Tecniche di stampa 3D per polimeri

La stampa 3D, altresì nota come "manifattura additiva", consiste nella creazione di oggetti fisici a partire da modelli tridimensionali virtuali. Esistono varie tecniche di stampa, ognuna di queste tecnologie presenta caratteristiche specifiche e, inevitabilmente, una serie di vantaggi e svantaggi che la differenziano dalle altre. Di seguito si passerà in rassegna le tecniche più comuni di stampa polimerica:

- Modellazione a deposizione fusa (FDM)

Processo di estrusione a caldo del materiale polimerico che permette la realizzazione di oggetti a partire da un filamento solido, che viene fuso e depositato strato per strato attraverso la testina della stampante 3D. I materiali utilizzati sono polimeri termoplastici, tra cui i più comuni sono il PLA (acido polilattico) e l'ABS (acrilonitrile butadiene stirene). La temperatura di fusione varia a seconda del materiale, per il PLA risulta tra i 180 \div 220°C, per l'ABS tra i 220 \div 250°C. Oggi l'FDM è la tecnologia di stampa 3D più diffusa[5]. La post-produzione dei modelli realizzati avviene rimuovendo i supporti manualmente o tramite solventi. La Tab. 1 riassume le particolarità della tecnica FDM.

Pro:	Contro:
Tecnologia economica	Bassa velocità di stampa
Materiali biocompatibili	Nessun materiale trasparente
Supporti solubili	
Buona resistenza meccanica	
Materiali riciclabili	
Possibilità di stampare in più materiali	

Tabella 1 Vantaggi e svantaggi della tecnica di stampa FDM

- Stereolitografia (SLA)

È la prima tecnica di stampa 3D che è stata inventata, risale agli anni '80 ed è tuttora una delle tecnologie più diffusa. L'SLA utilizza laser ultravioletti per polimerizzare la resina fotosensibile liquida rendendola plastica dura attraverso il processo di fotopolimerizzazione. La principale applicazione è la prototipazione rapida al fine di testing prima della produzione industriale. La Tab. 2 riassume le particolarità della tecnica SLA.

Tabella 2 Vantaggi e svantaggi della tecnica di stampa SLA

Pro:	Contro:
Disponibili materiali trasparenti	Tecnologia costosa
Materiali biocompatibili	Rimozione meccanica dei supporti
Buona resistenza meccanica	Materiali non riciclabili
Elevata velocità di stampa	Monomateriale



Materiali morbidi opachi

Figura 1.3 Esempio di stereolitografia

- Sinterizzazione laser selettiva (SLS)

Questa tecnica si serve di un raggio laser ad alta potenza che fonde localmente particelle di polvere polimerica all'interno di una camera chiusa. Il materiale utilizzato è il nylon e risulta la tecnologia additiva più comune per le applicazioni industriali. La Tab. 3 riassume le particolarità della tecnica SLS.

Pro:	Contro:
Materiali biocompatibili	Tecnologia molto costosa
Nessun supporto necessario	Mono materiale
Elevata velocità di stampa	Ambiente controllato necessario
Ottima resistenza meccanica	Sistemi chiusi
Materiali morbidi opachi	Materiale non riciclabile
	Materiale non trasparente

Tabella 3 Vantaggi e svantaggi della tecnica di stampa ${\rm SLS}$



Figura 1.4 Esempio di oggetto stampato tramite tecnologia SLS

Il mondo delle stampe 3D non si limita alle tecniche citate in precedenza, e viene normato dalla norma ISO/ASTM 52900, per quanto riguarda la stampa polimerica risulta di particolare interesse la Fig. 1.5.



Figura 1.5 Estratto dello standard internazionale ISO/ASTM 52900 [10]

I provini analizzati in questo lavoro di tesi sono stati autoprodotti tramite tecnologie di stampa 3D FDM.

1.3. Testing distruttivo

Le prove distruttive (DPA) comportano la parziale o totale distruzione del provino in analisi e consistono in esami fisici atti a determinare le caratteristiche meccaniche del materiale. I DPA si effettuano prima che il componente venga prodotto in massa ed utilizzato, in modo da comprendere come reagisce a diversi tipi di stress.

I metodi di DPA più comuni sono[6]:

- Testing in ambiente avverso
- Testing di corrosione
- Testing di frattura e meccanico
- Testing a fatica
- Testing con idrogeno
- Misurazione di tensioni residue
- Testing a trazione
- Testing a torsione

In questo lavoro di tesi si è interessati ad utilizzare DPA a trazione e di compressione meccanica che porterà le strutture al buckling.

Buckling

I test a compressione sono tra i principali test distruttivi, insieme ai test a trazione e torsionali. Il loro fine è determinare il comportamento del materiale sotto carico, e sono tipicamente condotti applicando una pressione al provino tramite una macchina di testing a compressione. Durante il test, varie proprietà del materiale vengono calcolate e graficate, come ad esempio il diagramma carico-deformazione.

Il buckling è un fenomeno che avviene durante la compressione di componenti strutturali, consiste nell'improvvisa variazione di forma della struttura. Quando il carico compressivo raggiunge il valore critico, la struttura perde parzialmente la capacità di resistere al carico e collassa.

Nel caso di colonna sottile si utilizza la formula di Eulero, Eq. 1, al fine di stimare il carico critico.

Eq.1:
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\mu \cdot l)^2}$$

Si può notare una grande influenza delle condizioni di vincolo sul carico critico in Fig. 1.6.



Figura 1.6 Influenza del vincolo sulle condizioni di carico [12]

1.4. Testing non distruttivo

I testing non distruttivo (NDT) sono metodi di ispezione che permettono agli operatori di valutare e immagazzinare dati sul materiale, sistema o componente senza alterarlo permanentemente. si utilizzano quindi per testare un oggetto già operativo al fine di ricercare dei danneggiamenti prima che possano portare ad una faiulure distruttiva. Questi test risultano i fondamenti delle pratiche di manutenzione.

I metodi di NDT più comuni sono[7]:

- Controlli a vista
- Controlli ad ultrasuoni
- Radiografia
- Testing delle correnti parassite
- Controllo del campo magnetico
- Controllo di emissioni acustiche
- Colorante penetrante
- Testing di perdite

In questo lavoro di tesi si è interessati ad utilizzare una NDT chiamata Vibration Correlation Technique (VCT) che permetterà lo studio della condizione di buckling incipiente evitandolo al fine di trovare il carico critico e preservare allo stesso tempo l'integrità della struttura in esame. VCT

La Vibration Correlation Technique (VCT) è un metodo non distruttivo usato per dedurre il carico di buckling tramite la misurazione delle frequenze proprie delle strutture caricate e monitorando la loro variazione in relazione alla variazione del carico applicato[8]. È così possibile tracciare una curva carico-frequenze che all'annullamento della frequenza porterà al carico critico di buckling. Trattandosi di una relazione lineare con il quadrato delle frequenze, sono necessari solo pochi punti, anche lontani dalla condizione di buckling, al fine di poter interpolare una retta che possa predire il carico critico.

L'acquisizione dei dati in frequenza avviene tramite un accelerometro fissato alla struttura da analizzare sollecitata da un martelletto, Fig. 1.7, avendo cura di evitare rimbalzi a causa dell'elasticità della struttura, le frequenze vengono successivamente estrapolate ed analizzate.



Figura 1.7 A sinistra martelletto ed a destra sensore applicato al provino

Nonostante l'utilizzo della VCT per le colonne sia stata accettata come metodo non distruttivo pratico per il calcolo del carico di buckling, la sua applicazione per le piaste ed i gusci sottili non si è dimostrata altrettanto semplice. Per le piastre perfette con altre forme diverse o altre condizioni dovrebbe aspettare alcune piccole alcontorno ci si deviazioni. Tuttavia, le imperfezioni geometriche iniziali nelle piastre hanno un effetto significativo sul carico di punta e possono causare notevoli deviazioni dalla linearità con il quadrato frequenza[9]. In Fig. 1.8 è possibile notare come a ridosso del carico critico di buckling, nel caso di una piastra piana, il valore rilevato tramite la tecnica VCT tenda a discostarsi dal valore teorico. Per ovviare a questo effetto, che renderebbe la predizione del carico critico imprecisa, i dati verranno rilevati lontano dal punto di instabilità.



Figura 1.8 Risultati per una piastra piana teorico e VCT [13]

Come accennato, il difetto superficiale delle strutture a parete sottile gioca un ruolo importante nel discostare i risultati VCT sperimentali rispetto a quelli teorici. In Fig. 1.9 si vede infatti come maggiormente il difetto superficiale si fa marcato, maggiormente le curve tendono a discostarsi dal valore teorico perdendo la loro linearità.



Figura 1.9 Andamento delle curve carico-frequenza di piastre con difetto iniziale [13]

2. Caratterizzazione del materiale

2.1. Modello ASTM type I

Il modello utilizzato per condurre i primi test a trazione per la caratterizzazione del materiale, mostrato in Fig. 2.1, è tratto dalla normativa ASTM-D638. Esistono cinque tipi di campioni consentiti per ASTM-D638 che differiscono per dimensioni a seconda dello spessore del campione e della quantità di materiale disponibile. I più comunemente usati sono i campioni di tipo I, che hanno uno spessore di 3.2 mm e sono generalmente creati mediante stampaggio a iniezione. I campioni di tipo I hanno una lunghezza fuori tutto di 165 mm e una larghezza di 13 mm, con una lunghezza del calibro di 50 mm. I campioni piatti sono tipicamente modellati, fustellati o lavorati in una forma "dogbone" o "manubrio", che assicura che la rottura avvenga al centro del campione piuttosto che nelle aree di serraggio. Oltre ai campioni piatti, ASTM-D638 consente anche il test di tubi e aste rigidi, entrambi i quali devono essere lavorati anche a forma di dogbone. Nei casi in cui il materiale è limitato, molti laboratori utilizzeranno campioni di tipo IV o di tipo V[10].



Figura 2.1 Modello provino dog-bone

Sono state apportate alcune modifiche al modello tipo I al fine di renderlo compatibile alle morse degli strumenti di testing a trazione, in particolare i modelli sono stati allungati di circa 32mm portando la lunghezza totale a 197mm arrivando alle dimensioni elencate nella Tab. 4.

Lunghezza	[mm]	
l ₃	197	
l_2	97	
l_1	55	
1	115	
b_1	13	
b_2	19	
h	3.2	

Tabella 4 Dimensioni nominali dei provini AST-D638 adattati

Prima del testing i provini stampati sono stati tutti misurati, pesati e, laddove sono state individuate piccole imperfezioni di stampa, rettificati.



Figura 2.3 Provini a quindici wall layers



Figura 2.2 Provini a due wall layers

Gli stessi provini tipo I sono stati stampati in due diverse configurazioni, la prima con solo due wall layers Fig. 2.2 e la seconda con quindici wall layers Fig. 2.3. Questi due metodi di stampaggio porteranno a comportamenti meccanici e dinamiche di rottura molto diverse.

2.2. Condizioni di laboratorio e strumenti

I test sono stati condotti in un laboratorio non controllato dal punto di vista ambientale quindi non disponiamo di dati accurati per quanto riguarda i parametri di umidità e temperatura che potrebbero influenzare il comportamento meccanico e la degradazione dei provini. Tuttavia, i test sono stati condotti in rapida successione quindi ci si aspetta che i risultati siano coerenti tra loro. Inoltre, i trattamenti termici subiti dal lotto 4 hanno pressocché eliminato la variabile umidità.

I test a trazione sono stati condotti mediante un sistema di testing a colonna singola Instron 68SC-5 capace di applicare fino a 5KN di forza mostrato in diverse configurazioni in Fig. 2.4 e Fig. 2.5.

I dati della forza vengono integrati dai dati di elongazione in direzione assiale forniti dall'estensimetro e, per quanto riguarda i lotti 3 e 4, dal restringimento perpendicolare alla forza grazie alla tecnologia DIC implementata dal software ISTRA.



Figura 2.4 Layout ambiente di testing: <u>1</u> estensimetro, <u>2</u> ganasce autobloccanti, <u>3</u> provino, <u>4</u> colonna della macchina di testing

Inoltre, nei test dei lotti 3 e 4 abbiamo integrato questi dati con un sistema di acquisizione DIC in modo da poter ricavare anche il restringimento in direzione perpendicolare al carico.



Figura 2.5 Sistema di testing a trazione con sistema DIC installato a sinistra

Sono stati inoltre utilizzati degli strumenti per misurare e pesare i provini, in particolare un calibro digitale ed un bilancino di precisione.

I provini sono stati autoprodotti tramite una stampante 3D Fig. 2.6, e per il lotto 4 si è optato per un trattamento termico per eliminare l'umidità introdotta nei provini durante l'applicazione del pattern per l'analisi DIC.



Figura 2.6 Stampaggio 3D dei Provini

È d'interesse far notare che i lotti 1 e 2 sono stati stampati con un filamento di Onyx rimasto all'aria per diversi mesi il ché può aver degradato le proprietà meccaniche dei provini di queste stampe rispetto alle proprietà riportate nella scheda del materiale fornite dalla casa produttrice.

2.3. Scheda tecnica del materiale Onyx

Le informazioni elencate nella Tab. 5 sono tratte dal sito della casa produttrice del materiale Onyx (Markforged)[11].

L'Onyx è un nylon riempito con fibre in micro-carbonio. È 1.4 volte più forte e rigido dell'ABS e può essere rinforzato con qualsiasi fibra continua come le fibre di carbonio.

Base composita	Prova (ASTM)	Onyx
Modulo Elastico [GPa]	D638	2.4
Tensione di snervamento [MPa]	D638	40
Tensione di rottura [MPa]	D638	37
Deformazione a rottura [%]	D638	25
Resistenza a flessione [MPa]	D790	71
Modulo di flessione [GPa]	D790	3.0
Temperatura di rammollimento a flessione [°C]	D648 B	145
Prova d'urto di Izod con intaglio $[\rm J/m]$	D246-10 A	330
Densità $[g/cm^3]$	-	1.2

Tabella 5 Caratteristiche del materiale Onyx da catalogo



Figura 2.7 Diagramma tensione deformazione nominale dell'Onyx

La Fig. 2.7 mostra le curve di tensione-deformazione fornite dall'azienda produttrice e forniscono una base di comparazione per i risultati che verranno mostrati nei seguenti paragrafi. In particolare, l'interesse di questo lavoro si focalizza sul materiale Onyx.

2.4. Misurazioni e classificazione provini

Per la parte di caratterizzazione del materiale tramite prove a trazione sono stati stampati quattro lotti. Il codice identificativo "ID" di ogni provino è composto da quattro numeri nel formato XXYY dove XX rappresenta l'ordine di testing e YY il numero di wall layers.

Il lotto 1 e 2 contengono cinque provini ciascuno a diversi wall layers e sono stati realizzati con la bobina invecchiata e non è stata fatta un'analisi DIC.

Il lotto 3 è stato realizzato con una bobina nuova ma è stato esposto ad umidità durante la procedura di applicazione del pattern per l'analisi DIC e non ha subito trattamenti termici. Presenta sei esemplari a diversi wall layers.

Il lotto 4 presenta otto provini, è stato realizzato con la bobina nuova e metà di questi provini hanno subito un trattamento termico in forno per eliminare l'umidità introdotta con l'applicazione del pattern così da poter osservare direttamente gli effetti dell'umidità sulla struttura.

Nella Tab. 6 si elencano le misurazioni pre-test e le condizioni dei provini. Da notare che il Poisson viene fornito solo per i provini che sono stati analizzati con la DIC, il valore del Poisson indicato nella tabella deriva da un'analisi preliminare effettuata dal software ISTRA utilizzato per la DIC. Analisi più accurate verranno illustrate in seguito.

La dicitura "Wet" si riferisce ai provini che non hanno subito il trattamento termico, la dicitura "Dry" si riferisce ai provini che hanno subito il trattamento termico, la dicitura "Old" si riferisce all'utilizzo della bobina invecchiata.

OND	т 1	N°	Massa	Spessore	Lunghezza	Post
CND	Identificativo	Lotto	[g]	[mm]	[mm]	$\operatorname{processo}$
Old	0102	1	11.1	3.19	13.08	No
Old	0202	1	11.1	3.21	13.08	No
Old	0302	1	11.0	3.27	13.07	No
Old	0402	1	11.0	3.14	13.12	Si
Old	0505	1	11.1	3.18	13.10	No
Old	0615	2	11.3	3.19	13.22	Si
Old	0715	2	11.4	3.24	13.07	No
Old	0815	2	11.4	3.29	13.01	No
Old	0915	2	11.4	3.23	13.17	Si
Old	1015	2	11.4	3.27	13.01	No
Wet	1102	3	11.0	3.26	13.05	No
Wet	1202	3	11.0	3.27	13.01	No
Wet	1302	3	11.1	3.23	13.05	No
Wet	1415	3	11.3	3.23	13.10	No
Wet	1515	3	11.2	3.20	13.06	Si
Wet	1615	3	11.2	3.16	13.20	Si
Dry	1702	4	11.2	3.21	13.11	No
Dry	1802	4	11.3	3.22	13.10	No
Wet	1902	4	11.2	3.24	13.09	No
Wet	2002	4	11.2	3.25	13.03	No
Dry	2115	4	11.4	3.25	13.03	Si
Dry	2215	4	11.4	3.17	13.17	Si
Wet	2315	4	11.3	3.15	13.21	Si
Wet	2415	4	11.4	3.20	13.15	Si

Tabella 6 Misurazione dei provini

È stato inoltre segnalato in quali provini è stato necessario apportare un post processo di rifinitura superficiale ad esportazione di truciolo per eliminare eventuali difetti di stampa.

2.5. Analisi dei dati a trazione

Tramite i dati grezzi forniteci dalla macchina di testing è stato possibile graficare l'andamento dei diagrammi tensione-deformazione per i vari lotti. L'andamento del primo lotto è mostrato in figura Fig.2.8. Tutti i test di questo capitolo sono stati condotti in controllo di spostamento.



Figura 2.8 Modulo elastico dei provini del primo lotto a confronto

Il primo lotto contiene cinque provini con due wall layers. Si nota un andamento coerente tra i vari provini appartenenti allo stesso lotto e con proprietà similari. Questo lotto in particolare risulta avere le caratteristiche meccaniche più scarse tra quelli analizzati, con una $\sigma_{rottura}$ nell'ordine dei 37 ÷ 41MPa. I provini hanno subito rottura dopo un allungamento percentuale di oltre il 28%.



Figura 2.9 Provini del lotto 1 post rottura

Si può notare dalla Fig. 2.9 che la maggior parte dei provini analizzati ha subito una rottura lontana dalla mezzeria, inoltre lontano dalle pareti c'è la tendenza ad una rottura che segue un'inclinazione di 45°, questo è dovuto all'inclinazione delle linee di stampaggio.



Figura 2.10 Modulo elastico dei provini del secondo lotto a confronto

Il secondo lotto contiene cinque provini con quindici wall layers. Questo lotto risulta avere delle buone caratteristiche meccaniche come si può vedere in Fig. 2.10. Come il primo lotto, anche questo è proveniente da una bobina invecchiata e quindi ha perso parte delle sue caratteristiche meccaniche. la $\sigma_{rottura}$ è nell'ordine dei 53MPa, un incremento di circa il 35% rispetto al lotto precedente con due wall layers. Questi provini, tuttavia, hanno subito rottura dopo un allungamento percentuale del 10 ÷ 12% ovvero meno della metà del lotto precedente.



Figura 2.11 Provini del lotto 2 post rottura

Si può notare dalla Fig. 2.11 che le rotture del secondo lotto, caratterizzato da quindici wall layers, risultano tutte perpendicolari. È presente una rottura anomala nel provino 0815 in cui le linee di stampaggio si sono disfatte, un'anomalia riscontrabile anche dal grafico del modulo elastico guardando la linea gialla.


Figura 2.12 Modulo elastico dei provini del terzo lotto a confronto

Il terzo lotto contiene sei provini, per metà con due wall layers e per metà con quindici wall layers. È stata utilizzata una bobina nuova per la loro creazione quindi ci si potrebbe aspettare di ottenere delle prestazioni migliori. Tuttavia, per via dell'introduzione di umidità sulla superficie di testing del provino durante l'applicazione del pattern per l'analisi DIC le caratteristiche meccaniche sono risultate maggiormente degradate rispetto ai primi due lotti, in particolar modo per quanto riguarda i provini a due wall layers. L'effetto del numero diverso numero di wall layers si può facilmente notare nella Fig. 2.12.



Figura 2.13 Provini del lotto 3 post rottura

Nella Fig. 2.13 si possono notare facilmente le differenze delle rotture tra i provini a due wall layers, i primi tre dall'alto, con quelli a quindici wall layers, gli ultimi tre dal basso. Si può vedere inoltre il pattern che è stato applicato al fine dell'analisi DIC.



Figura 2.14 Modulo elastico dei provini del quarto lotto a confronto

Il quarto lotto è il più variegato, contiene otto provini in parte trattati termicamente "dry" ed in parte lasciati all'aria "wet", inoltre, sono per metà stampati con due wall layers e per metà con quindici wall layers. Il grafico di cui sopra, Fig. 2.14, permette di farsi un'idea di come fattori microstrutturali e ambientali possano influenzare il comportamento meccanico di un materiale stampato come l'Onyx.

I provini trattati termicamente per eliminare l'umidità possiedono caratteristiche meccaniche significativamente superiori rispetto ai provini dello stesso lotto ma esposti per qualche ora ad umidità. Si può notare come il diagramma tensione-deformazione che più si avvicina a quello esposto dall'azienda fornitrice dell'Onyx sia, infatti, quello che si riferisce ai provini a quindici wall layers che hanno subito il trattamento termico.

Meccanismo di rottura

Ci si potrebbe aspettare che i provini 2315 e 2415, come i provini 1902 e 2002, abbiano un allungamento coerente relativamente alla controparte termicamente trattata. In realtà si nota come i provini XX15, che non hanno subito trattamenti termici, si rompano prima dei provini XX15 secchi, mentre i provini XX02, che non hanno subito trattamenti termici, si allungano quasi il doppio rispetto ai provini XX02 secchi. Questo comportamento, in apparenza incoerente, è spiegabile tramite al riconoscimento di meccanismi di rottura diversi, propri di alcune strutture stampate in 3D.

Il comportamento anomalo dei provini 1902 e 2002 è dovuto allo sfaldamento delle fibre interne del provino inizialmente disposte a 45°, come mostrato in Fig. 2.15, che porta ad un allungamento molto più marcato ritardando la rottura nonostante la degradazione delle proprietà meccaniche dovuta all'aging. Questo effetto porterà, inoltre, ad avere un coefficiente di Poisson molto più alto del normale e che non sarà quindi associabile al materiale in sé ma piuttosto alla microstruttura del provino.



Figura 2.15 Sfaldamento delle fibre a 45°



Figura 2.16 Provini del lotto 4 post rottura

2.6. Analisi DIC

La digital image correlation è una tecnica ottica che combina la registrazione ed il tracking per misurazioni 2D dei cambiamenti di una serie di immagini. Questo permette di tracciare gli spostamenti verticali e orizzontali di ciascun punto del pattern applicato ai provini contemporaneamente.

Di seguito si mostreranno alcuni esempi di risultati ottenuti:

Per il provino 1302:



Figura 2.17 Provino 1302 allungamento verticale



Figura 2.18 Provino 1302 restringimento orizzontale

Si può notare come la struttura prima di venir sollecitata sia evidenziata in verde, il che significa che non è presente alcuna variazione di lunghezza.

Una volta che i carichi vengono applicati la struttura inizia a deformarsi; i colori caldi mostrano dove la struttura ha subito l'allungamento maggiore, mentre quelli freddi dove l'allungamento parallelo al carico applicato è stato minore, come mostrato dalla Fig. 2.17 e Fig. 2.19. Mentre nel caso perpendicolare al carico i colori freddi indicano un restringimento del cuore del provino come si può vedere dalla Fig. 2.18.

Per il provino 1415:



Figura 2.19 Provino 1415 allungamento verticale



Figura 2.20 Provino 1415 restringimento orizzontale

2.7. Considerazioni sulla caratterizzazione

Le prove di trazione sono state eseguite ad una velocità di spostamento fissa di 5 mm per minuto e la cattura dei dati è avvenuta ad intervalli di un decimo di secondo.

Vi è una tendenza dei provini con due wall layers di subire rottura a 45° nei pressi della mezzeria, a differenza dei provini con quindici wall layers che tendono a rompersi perpendicolarmente al carico applicato lontano dalla mezzeria. Questo è frutto dell'allineamento delle fibre stampate nella parte centrale dei provini, ciò porta i provini con quindici a poter resistere ad un carico maggiore potendo però subire meno elongazione prima della rottura.

Inoltre, dai risultati dell'analisi DIC, si evidenzia come il coefficiente di Poisson, proprietà che descrive l'elasticità di un solido elastico, dei provini XX02 si mantenga in un range di valori $0.6 \div 0.7$ mentre per i provini XX15 cali a $0.4 \div 0.5$. Questi elevati valori di Poisson non sono tuttavia da intendersi come propri del materiale di per sé, ma come frutto della composizione microstrutturale dettata dalle direzioni di stampa 3D che permettono alla struttura di deformarsi maggiormente.

Com'è possibile notare dai grafici seguenti in Fig. 2.21 e Fig. 2.22 l'andamento del coefficiente di Poisson è in sostanza debolmente decrescente per entrambi i lotti. Questa perdita di Poisson è da imputarsi al meccanismo accennato precedentemente in Fig. 2.15 ovvero a cambiamenti microstrutturali nei provini in analisi, virtualmente il coefficiente di Poisson diminuirebbe fino ad arrivare al valore proprio del materiale Onyx.



Figura 2.21 Poisson ratio lotto 3 $\,$



Figura 2.22 Poisson ratio lotto 4



Figura 2.24 Variazione di lunghezza e larghezza lotto $3\,$



Figura 2.23 Variazione di lunghezza e larghezza lotto 4



Figura 2.26 Allungamento verticale e restringimento orizzontale dei provini del lotto 3 $\,$



Figura 2.25 Allungamento verticale e restringimento orizzontale dei provini del lotto 4

ID	$E_{0.5\%}$ [GPA]	σ_R [MPA]	$G_{2\%} \; [\mathrm{GPA}]$	E _R [%]	$ u_{2\%}$
0102	1.57	39.0	-	25.8	_
0202	1.35	37.6	-	27.4	-
0302	1.50	37.4	-	28.7	-
0402	1.55	41.0	-	27.0	-
0502	1.63	40.3	-	27.2	-
0615	3.55	55.2	-	11.3	-
0715	3.74	54.1	-	9.70	-
0815	2.90	49.6	-	11.5	-
0915	3.69	55.2	-	11.5	-
1015	3.07	52.1	-	12.0	-
1102	0.666	24.6	0.134	34.4	0.668
1202	0.688	25.3	0.138	35.6	0.654
1302	0.856	29.2	0.171	35.9	0.645
1415	3.08	49.5	0.581	12.4	0.463
1515	2.88	49.0	0.570	11.5	0.462
1615	3.01	50.7	0.590	12.5	0.465
1702	1.91	44.0	0.403	16.8	0.606
1802	1.79	41.8	0.382	15.4	0.614
1902	1.01	30.2	0.220	26.6	0.642
2002	1.11	32.7	0.245	27.5	0.658
2115	4.97	73.0	0.833	9.90	0.477
2215	4.88	71.3	0.795	10.5	0.471
2315	4.55	57.7	0.711	6.60	0.455
2415	4.36	59.3	0.798	8.30	0.453

Tabella 7 Caratteristiche dei provini derivati dalle prove di trazione

Analizzando i dati dalla Tab. 7 possiamo notare come la media del coefficiente di Poisson per i provini della serie XX02 sia 0.641 significativamente maggiore della media per quanto riguarda la serie XX15 che risulta essere 0.464. Questo rimarca il grado di elasticità maggiore dei provini della serie XX02. Come accennato alla fine del Cap. 2.5 il coefficiente di Poisson che è stato rilevato, molto più elevato di quanto ci si aspetterebbe, non è unicamente frutto delle caratteristiche fisiche del materiale considerato nella sua sostanza ma è piuttosto una conseguenza della sua microstruttura e della disposizione delle fibre rispetto al carico.

I valori di Poisson ν sono stati rilevati ad un'elongazione ε pari al 2% per evitare la dispersione di dati che si ha per più basse elongazioni come si può notare dalle Fig. 2.21 e Fig. 2.22. Inoltre, il carico di snervamento è stato calcolato ad un'elongazione pari a 0.5%, e non 2% come accade normalmente per i materiali elastici lineari, poiché il materiale che stiamo analizzando presenta un certo grado di non linearità.

3. Analisi VCT

Una volta terminato un primo studio per caratterizzare il materiale e familiarizzato con le metodologie di testing è iniziata una nuova campagna di prove che ha visto integrazione della tecnica VCT. Come accennato nel paragrafo 1.4, noto lo spettro di carico e le frequenze proprie ad esso associate, che si ottengono tramite questo metodo, è possibile predire il carico critico di buckling. Affiancando la tecnica VCT alla tecnologia DIC, che permette di determinare il difetto superficiale iniziale dei provini, è inoltre possibile creare un modello FEM più calzante, tramite ad esempio l'applicazione di una forza fittizia che riporti l'effetto del difetto iniziale.

Nel seguente paragrafo, 3.1, si intende validare la tecnica VCT per un caso semplice e conosciuto per poi estendere lo studio ai provini stampati. Il caso di una lastra sottile di materiale metallico, che ben risponde alle sollecitazioni, in concomitanza a vincoli fissati, condizione semplice ed affidabile da replicare in laboratorio, risulta ottima per evidenziare l'efficacia della tecnica ed i suoi margini d'errore.

3.1. Validazione VCT con vincolo fisso

Al fine di liberarsi dalle incertezze sulla tipologia di vincolo utilizzato si è preferito usare una configurazione a vincolo fissato. Le estremità del provino, quindi, sono state pinzate eliminando la possibilità di traslare e ruotare. Solo l'estremità superiore è libera di muoversi in direzione parallela al carico.



Figura 3.1 Provino di alluminio

I provini della serie BSXX sono risultati incompatibili con il setup VCT allestito, quindi, si è preferito validare la tecnica VCT con l'ausilio di un materiale metallico, che ben risponde alle vibrazioni che vengono imposte. Il provino in questione è una barra di alluminio 305x40x1.9 mm, con una lunghezza fuori dal vincolo è pari a 200 mm Fig. 3.1.

È possibile calcolare, sempre tramite la formula del carico critico Euleriano Eq. 1, il carico di buckling al fine di starci ben lungi durante le prove di compressione per evitare di compromettere la struttura.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu L)^2} = \frac{\pi^2 E\left(\frac{b \cdot s^3}{12}\right)}{(0.5 \cdot L)^2} \approx 1467 N$$

Come mostrato in Fig. 1.6, nel caso di un vincolo fissato, $\mu = 0.5$ mentre il modulo di Young usato per l'alluminio è E = 65 GPa.

È quindi stata eseguita da prima una prova di trazione con applicazione del carico incrementale a gradini e raccogliendo dati VCT ad ogni gradino senza compromettere la struttura, ed in seguito allo stesso modo è stata eseguita una prova compressiva.

I risultati di questa sperimentazione sono stati in fine graficati ed interpolati linearmente al fine di mostrare la relazione lineare tra il quadrato delle frequenze della struttura ed il carico applicato Fig. 3.3. Intersecando la retta interpolata con l'asse delle ascisse è possibile avere un valore del carico critico, secondo la teoria VCT.

$$P_{cr_{VCT}} = 1234 N$$

Grazie al sensore installato dietro al provino vengono fornite le frequenze proprie dello stesso quando viene percosso dal martelletto. In Fig. 3.2, relativa alla compressione scaglionata, è possibile notare come i picchi nelle frequenze del provino si spostino sempre più verso sinistra all'aumentare del carico compressivo applicato.



Figura 3.2 A sinistra le vibrazioni dei colpi inferti al provino con il martelletto a destra le frequenze del provino in alluminio soggetto a compressione



Figura 3.3 Relazione tra il carico ed il quadrato delle frequenze

Al fine di poter saggiare l'accuratezza del metodo VCT non resta che testare la struttura a compressione fino a farla andare in instabilità di buckling, una volta fatto ciò potremo comparare il valore di carico critico sperimentale con quello teorico.

In Fig. 3.4 e Fig. 3.5 è possibile vedere il risultato di questo testing a compressione, da cui se ne può trarre il valore del carico critico sperimentale:

 $P_{cr_{EXP}} = 1318 N$



Figura 3.4 Deformazione verticale del provino in alluminio controllo di spostamento



Figura 3.5 Deformazione fuori dal piano del provino in alluminio controllo di spostamento



Figura 3.6 Post-buckling del provino in alluminio, è possibile vedere lo slot del sensore sul retro del provino.

La differenza che intercorre tra il valore del carico critico Euleriano e quello sperimentale è frutto del difetto strutturale del materiale. In questo senso l'utilizzo della tecnica VCT risulta più conservativo sia rispetto al risultato ottenuto analiticamente attraverso alla formula di Eulero sia al risultato sperimentale. Con il grafico in Fig. 3.7 e la Tab. 8 si intende comparare i risultati ottenuti.



Figura 3.7 Comparazione delle tecniche per il calcolo del carico critico

Le curve relative ad i risultati sperimentali e di Eulero vengono tratteggiate in quanto si conoscono solo due punti, quello di buckling associato alla frequenza nulla ed il punto iniziale a carico nullo rilevato tramite la tecnica VCT.

Carico Critico	Carico [N]	Errore [%]
Sperimentale	1318	-
Euleriano	1467	10.2
VCT	1234	-6.8

Tabella 8 Comparazione dei risultati ed errore percentuale relativamente al dato sperimentale per provino in alluminio

In Fig. 3.8 si evidenzia la difettologia superficiale iniziale, rilevata tramite la tecnologia DIC, sul provino in alluminio.



Figura 3.8 Difettologia superficiale provino in alluminio

3.2. Buckling con semplice appoggio

Le prime prove sono state condotte su una serie di provini denominati BSXX, testati a compressione in parte seguendo un controllo di spostamento con velocità di deformazione fissata a 0.5 mm/min, provini da BS01 a BS05 (lotto 1), ed in parte testati a controllo di forza con velocità di carico pari a 100 N/min, provini da BS07 a BS10 (lotto 2). Questi e gli altri provini che sono stati testati hanno una geometria che rientra nella categoria di parete sottile, il che permette l'utilizzo della semplice formula di Eulero al fine di calcolare il carico critico di buckling Eq.1.

Inoltre, tutti i provini sono stati trattati termicamente, prima del testing, al fine di eliminare il fattore umidità.

Purtroppo, la geometria e le condizioni di vincolo a cui è stata soggetta la serie BSXX non hanno permesso una rilevazione corretta delle frequenze proprie tramite la tecnica VCT. Nei successivi paragrafi, tuttavia, a fronte di una variazione di questi parametri è stato possibile rilevare le frequenze. Geometria dei provini serie BSXX

Le misure nominali dei provini della serie BSXX Fig. 3.9 sono riportate in Tab. 9.

Tabella 9 Misure nominali BSXX

Lunghezza	[mm]
h	144.5
b	40
t	4.5

Inoltre, al fine di creare un semplice supporto per i provini BSXX sono stati stampati in 3D due slot in cui il provino ha la possibilità di ruotare ma non di traslare.



Figura 3.9 Geometria dei provini serie BSXX



Figura 3.10 Layout di testing a compressione dei provini BSXX con supporti del provino stampati in 3D ed avvitati alle estremità della pressa

La Fig. 3.10 mostra la configurazione dei test condotti sui provini BSXX, si possono vedere le guide stampate al fine di ricreare la condizione di vincolo di semplice appoggio che garantisce la possibilità alla struttura di ruotare.

ID	Massa [g]	Base [mm]	Spessore [mm]
BS01	28.4	40.00	4.52
BS02	28.4	40.04	4.46
BS03	28.2	40.00	4.46
BS04	28.4	39.99	4.55
BS05	28.3	39.99	4.52
BS07	27.4	40.00	4.52
BS08	27.0	39.99	4.44
BS09	27.1	40.07	4.45

Tabella 10 Misurazioni effettuate sui provini BSXX

I provini sono stati poi misurati ed i dati trasposti in Tab. 10.

Per questa serie di provini è possibile calcolare il carico critico Euleriano:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu L)^2} = \frac{\pi^2 E\left(\frac{b \cdot s^3}{12}\right)}{L^2} \approx 265.6 N$$

Trattandosi di una configurazione a semplice appoggio il valore di $\mu = 1$. Per quanto riguarda il modulo di Young viene usato il valor medio dei provini XX02 sottoposti a trattamenti termici misurati nel capitolo precedente visionabili in Tab. 10 ovvero E = 1.85 GPa. Tramite i dati forniti dalla macchina di testing è possibile tracciare i grafici tensione-deformazione in direzione Y, ovvero dell'applicazione del carico, per entrambi i lotti BS Fig. 3.11 e Fig. 3.12. Si ricorda che l'unica differenza tra i lotti è la metodologia di testing, il primo è a controllo di spostamento e l'altro a controllo di forza.



Figura 3.11 Test compressivo dei provini BS01-BS05 controllo di spostamento

La forza massima raggiunta da ogni provino rappresenta il carico critico Euleriano che porta la struttura all'instabilità di buckling.



Figura 3.12 Test compressivo dei provini BS07-BS09 controllo di forza

Dalla comparazione dei due grafici precedenti si può notare la differenza dovuta alle modalità di testing, in particolare facendo riferimento alla Fig. 3.12 si vede come mantenendo costante la forza la deformazione continui comunque ad aumentare rapidamente. Questo è dovuto al fatto che, in seguito al buckling, la struttura perde parzialmente la capacità di resistere al carico. Il test a controllo di forza è stato interrotto, per sicurezza, quando la deformazione in direzione verticale ha raggiunto i 10 mm. Il controllo di forza verrà utilizzato più profusamente in quanto risulta più fedelmente ricostruibile ed implementabile nei software FEM.

Mentre la Fig. 3.11 è utile poiché restituisce un'idea di quanto venga compromessa la capacità della struttura di sostenere il carico dopo il buckling. Attraverso la tecnologia DIC già usata in precedenza è poi stato possibile tracciare i grafici di deformazione fuori dal piano per i provini della serie BS visibili in Fig. 3.13 e Fig. 3.14.



Figura 3.13 Deformazione fuori dal piano provini BS01-BS05 controllo di spostamento

Vi è tuttavia un appunto da fare riguardo a questi grafici. Infatti, per ragioni grafiche, si è preferito usare il valore assoluto dello spostamento fuori dal piano. Può essere d'interesse sapere quali provini abbiano collassato in direzione opposta, i provini: BS01, BS04, BS05, BS08 hanno richiesto l'utilizzo della funzione modulo in quando hanno subito un bending verso l'entrante al piano dove è stato posato il pattern.



Figura 3.14 Deformazione fuori dal piano provini BS07-BS09 controllo di forza

Questi andamenti risultano simili a quelli riportati nei grafici precedenti, lungo la verticale, questo è chiaramente dovuto alla relazione diretta tra i due spostamenti, lungo Y ed Z. Acquisendo, tramite DIC, le immagini di provini non ancora sollecitati, è possibile raccogliere informazioni sulla difettologia iniziale dei provini, dovuta ad imperfezioni nate durante il processo di stampa, questa misura viene data sotto forma di "distanza dal best-fit plane" ovvero lo scostamento dal piano medio, come da Fig. 3.15 e Fig. 3.16.



Figura 3.15 Difettologia superficiale dei provini BS01-BS05



Figura 3.16 Difettologia superficiale dei provini BS07-BS09

Una volta ottenuti i dati sul difetto iniziale di ciascun provino è possibile correlare questi dati con i relativi carichi critici Euleriani, che coincidono con i carichi massimi rilevati dalla prova a compressione, al fine di trovare una relazione tra le due serie di dati.

Per fare ciò è utile definire una grandezza che tenga conto efficacemente del difetto Eq. 2:

Eq. 2:
$$Difetto\ iniziale \equiv \bar{d}_i = \frac{\sum |d|}{n}$$

Con: "d", spostamento fuori dal piano e "n" numero di punti lungo la mediana.

Questa definizione mi permette di ottenere un grafico difetto-carico critico Fig. 3.17.



Figura 3.17 Relazione tra il difetto iniziale dei provini BSXX ed il loro carico critico

Questo grafico è molto importante poiché correla evidentemente la relazione presente tra difetto e carico critico di buckling. Al crescere del difetto superficiale, infatti, il carico critico necessario per portare ad instabilità la struttura diminuisce.

3.3. Utilizzo della tecnica VCT su provini stampati in 3D

In seguito alle difficoltà riscontrate dell'utilizzo della tecnologia VCT sui provini per la serie BSXX si è pensato di adottare un nuovo design e di utilizzare le condizioni di vincolo fissato, come nel caso del provino in alluminio del precedente paragrafo, al fine di poter individuare più facilmente le frequenze proprie della struttura. In particolare, i provini della serie CFXX sono stati stampati con al loro interno le fibre di carbonio, questo ha permesso di aumentarne la resistenza meccanica e di conseguenza sollecitarle maggiormente prima del raggiungimento del carico critico.

La geometria adottata risulta un prisma di dimensioni 180x25x3 mm con una lunghezza fuori dal vincolo di 100 mm. Nel caso dei provini CFXX la disposizione della fibra lungo la sezione del provino è come da Fig. 3.18.



Figura 3.18 Disposizione delle fibre lungo i provini CFXX
Il carico critico calcolato con la formula di Eulero, per i provini della serie CFXX, vale:

$$P_{cr_{CF}} = \frac{\pi^2 (E_{CF} I_{CF} + E_{Onyx} I_{Onyx})}{(\mu L)^2} \approx 1240 N$$

Il modulo di Young utilizzato per la fibra di carbonio è pari a 60 GPa. Come si può vedere, il carico critico di questi provini stampati è molto maggiore rispetto al corrispettivo calcolato per i provini della serie BSXX

Insieme ai provini CFXX sono stati stampati i provini NCFXX, Fig. 3.19, con la medesima geometria ma privi di fibra di carbonio, per poter comparare i risultati una volta terminata la sperimentazione.



Figura 3.19 Provini serie CFXX a destra ed NCFXX a sinistra

Il carico critico per i provini della serie NCFXX vale invece:

$$P_{cr_{NCF}} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu L)^2} = 411 N$$

I provini CF, aventi le fibre di carbonio, sono stati analizzati per primi. Al fine di condurre i test con la tecnologia VCT, si è implementato un metodo a compressione scaglionato con intervallo di carico tra le rilevazioni di 100 N ad ogni gradino di carico la macchina manterrà il carico per 40 secondi, permettendo di rilevare manualmente i dati vibrazionali sollecitando la struttura con il martelletto. Il test è stato condotto con una velocità di carico di 200 N al minuto e fino a raggiungere un carico di 400 N. Risultati visibili in Fig. 3.20 e Tab. 11.



Figura 3.20 Caricamento scaglionato per prova VCT sui provini CFXX controllo di forza

Dopo aver testato i provini per quanto concerne la tecnica VCT, sono stati testati fino al cedimento per buckling per poter ottenere un valore sperimentale del carico di buckling, Fig. 3.21.



Figura 3.21 Buckling dei provini CF con fibra di carbonio

Anche in questo caso, si può notare come il carico di buckling effettivo sia decisamente minore rispetto a quello ideale ricavato tramite la formula di Eulero Eq. 1. Tuttavia, la nuova geometria e le condizioni di vincolo adottate hanno permesso di rilevare facilmente la prima frequenza propria della struttura, necessaria per poter prevedere un cedimento della struttura con la tecnica VCT Fig. 3.22.



Figura 3.22 Predizione del carico critico tramite tecnica VCT

I risultati verranno tabellati insieme ad i risultati dei provini NCFXX, ma si può già vedere come il carico stimato con questa tecnica sia minore di quello calcolato con Eulero eppure maggiore di quello sperimentale a differenza di quello che accadeva per il caso del provino in alluminio dove il risultato VCT era conservativo qui sembra sovrastimare la forza necessaria per portare al buckling la struttura.

In Fig. 3.23 è possibile vedere il difetto superficiale dei provini CF02 e CF03.





Lo stesso procedimento condotto per i provini CFXX viene ripetuto per la controparte sprovvista della fibra di carbonio. Sopportando questa minor carico si è modificato il metodo che prevede ora scaglioni di forza di 30 N ciascuno fino ad arrivare al carico di 150 N.



Figura 3.24 Caricamento scaglionato per prova $\rm VCT$ sui provini $\rm NCFXX$ controllo di forza

Si può notare in Fig. 3.24 che nel caso dei provini NCFXX durante il tempo di attesa della macchina, pur la forza rimanendo costante, la struttura si accorcia. Questo è dovuto ad effetti viscoelastici particolarmente presenti per questo tipo di materiale che vengono molto attenuati dalla presenza delle fibre di carbonio, come si può vedere in Fig. 3.20. Si procede a portare ad instabilità i provini senza fibra di carbonio Fig. 3.25.



Figura 3.25 Buckling dei provini NCF senza fibra di carbonio

L'utilizzo della tecnica VCT per i provini senza fibra di carbonio ha permesso la realizzazione del grafico in Fig. 3.26 dove si può vedere il carico predetto eccedere il carico Euleriano.

In Tab. 11 si possono vedere i valori di carico critico e l'errore relativo al risultato sperimentale.



Figura 3.26 Predizione del carico critico tramite tecnica VCT

Provino	Exp[N]	VCT [N]	E [%]	Eulero [N]	E [%]
CF01	701	1089	55	1240	77
CF02	782	1175	50	1240	59
CF03	688	930	35	1240	80
CF	724	1065	47	1240	71

Tabella 11 Risultati CF del carico critico a confronto con il valore sperimentale

Tabella 12 Risultati NCF del carico critico a confronto con il valore sperimentale

Provino	Exp[N]	VCT [N]	E [%]	Eulero [N]	E [%]
NCF01	232	533	130	411	77
NCF02	296	674	128	411	39
NCF	264	604	129	411	56

Come si può dedurre dalle tabelle Tab. 11 e Tab. 12, i risultati del carico critico ottenuti tramite tecnologia VCT, per quanto riguarda i provini senza fibra di carbonio, sono estremamente inaccurati. Questo può essere dovuto al fatto che le rilevazioni sono state fatte in un intervallo ristretto rispetto alla forza applicata a causa della scarsa capacità di carico dei provini senza fibra di carbonio, ma anche alle imperfezioni della serie NCFXX che dopo un trattamento termico troppo rapido ne è risultata leggermente deformata, questo ha ridotto di molto il carico di compressione sostenibile dalla struttura prima di arrivare alla condizione critica di buckling.

3.4. Modelli software FEM

In questo capitolo verranno mostrati i dati ottenuti tramite il software FEM al fine di compararli con i risultati teorici e sperimentali derivanti dai capitoli precedenti. I modelli utilizzati sono 2D ed i materiali usati sono stati definiti nelle loro caratteristiche come segue in Tab. 13:

Modelli	Materiale	E [GPa]	ν	$\rho~[kg/m^3]$
BS e NCF	Onyx	1.85	0.50	1200
CF	Fibra di Carbonio	60	0.15	1100
Barra Al	Alluminio	65	0.33	4100

Tabella 13 Modelli dei materiali usati

Una volta definite le proprietà del solido, le tipologie di vincoli, i carichi applicati e una griglia tetragonale sono stati condotti principalmente due tipi di analisi con il software FEMAP; l'analisi di tipo "7-Buckling" che restituisce un autovalore che moltiplicato per il carico applicato fornisce il carico critico Euleriano, e l'analisi non lineare di tipo "10-Nonlinear Static" che restituisce le frequenze della struttura sottoposta al carico. Questo permette di poter tracciare una retta nel grafico Carico-Frequenza al quadrato.

Provino Serie BS

A causa della mancanza dei dati sperimentali sulle frequenze dei provini BS sotto carico, che non è stato possibile raccogliere per via della bassa risposta del materiale, le frequenze non verranno quindi studiate tramite il software FEM.



Figura 3.27 A sinistra la deformazione fuori dal piano dei provini BS a destra la configurazione prima dell'analisi

In Fig. 3.27 si può vedere un risultato tipo dell'analisi FEM 7-Buckling che restituisce una serie di autovalori. A fronte di un carico "sonda" pari a 100 N l'analisi ha restituito un autovalore pari a 2.873 che, moltiplicato al carico applicato, descrive un carico critico di buckling pari a 287.3 N.

Provino in alluminio

In Fig. 3.28 si può vedere come l'analisi eseguita tramite il software FEM, linea blu tratteggiata, tenda a sovrastimare la curva di carico ed il carico limite che porta al buckling la struttura rispetto alle curve teoriche e sperimentali, questo è frutto di una prima modellazione FEM che non comprendeva la massa concentrata derivante dalla presenza del sensore incollato sulla superficie del provino.



Figura 3.28 Comparazione delle curve carico-frequenza del provino in alluminio

In Fig. 3.29 si mostra come questa massa sia stata aggiunta al modello sotto forma di massa concentrata non strutturale. Quest'aggiunta ha permesso di tracciare la retta blu continua, si può vedere come questa retta sia molto più vicina agli altri risultati ottenuti. Inoltre, si nota che l'effetto di una massa non strutturale non fa altro che abbassare la risposta in frequenza iniziale ma non ha un'influenza rilevante sulla determinazione del carico limite di buckling.



Figura 3.29 Aggiunta della massa non strutturale al modello FEM in alluminio

Si evidenzia inoltre che la massa del sensore risulta pari a 7 grammi e la sua geometria è assimilabile ad un cubo di dimensioni 7x7x7 mm. Tale massa rende particolarmente influente la presenza del provino nelle prove condotte.

A fronte di un carico "sonda" pari a 100 N l'analisi ha restituito un autovalore pari a 15.244 che, moltiplicato al carico applicato, descrive un carico critico di buckling pari a 1524.4 N.

Carico [N]	Modo 1 [Hz]	Modo 2 [Hz]	Modo 3 [Hz]
0	176	548	641
100	170	539	639
200	164	530	637
300	158	522	636
400	151	512	634
500	145	503	632
600	138	494	631
700	130	484	629
1524	4	395	615

Tabella 14 Dati FEM delle frequenze al variare del carico del provino d'alluminio

In Tab. 14 vengono riportate le frequenze ottenute tramite l'analisi statica non lineare che rappresentano i punti che descrivono la retta blu presente in Fig. 3.28. Queste frequenze sono riferite al modello FEM con il sensore modellizzato.

Provini Serie NCF

In Fig. 3.30 si può vedere come l'analisi eseguita tramite il software FEM senza il sensore modellizzato, linea blu tratteggiata, tenda a sovrastimare di molto la curva di carico nel suo tratto iniziale il carico limite che porta al buckling la struttura rispetto alle curve teoriche e sperimentali.



Figura 3.30 Comparazione delle curve carico-frequenza dei provini senza la fibra di carbonio

Facendo una media dei risultati sperimentali e VCT ottenuti dai due provini ed eliminando la linea relativa al FEM senza la modellizzazione del sensore, si ottiene la Fig. 3.31.

A fronte di un carico "sonda" pari a 100 N l'analisi ha restituito un autovalore pari a 4.484 che, moltiplicato al carico applicato, descrive un carico critico di buckling pari a 448.4 N. In Tab. 15 vengono riportate le frequenze ottenute tramite l'analisi statica non lineare che rappresentano i punti che descrivono la retta blu presente in Fig. 3.30 e Fig. 3.31.



Figura 3.31 Comparazione mediata delle curve carico-frequenza dei provini senza la fibra di carbonio

Carico [N]	Modo 1 [Hz]	Modo 2 [Hz]	Modo 3 [Hz]
0	235	967	1069
50	222	959	1058
100	208	951	1028
150	193	944	997
200	176	936	964
250	158	928	931
300	137	896	920
350	112	860	912
400	79	822	904
448	16	783	896

Tabella 15 Dati FEM delle frequenze al variare del carico del provino della serie NCF

Provini Serie CF

In Fig. 3.32 si può vedere l'andamento delle rette di carico-frequenza al quadrato dei provini con fibra di carbonio ottenute mediante diversi metodi. Si conferma come i risultati sperimentali evidenzino un'instabilità prematura rispetto alle altre metodologie.



Figura 3.32 Comparazione delle curve carico-frequenza dei provini con la fibra di carbonio

Mediando i risultati al fine di renderli più chiari, si ottiene la Fig. 3.33.



Figura 3.33 Comparazione mediata delle curve carico-frequenza dei provini con fibra di carbonio

Conclusioni

La manifattura additiva è una delle tecnologie chiave per l'innovazione industriale e presenta opportunità per ridurre costi di produzione e di esercizio permettendo designs più spinti ed innovativi. Questa tesi si è data l'obiettivo di esplorare questo mondo e di validare alcune tecniche non distruttive adottabili dalle strutture stampate.

Si sono tuttavia presentate delle problematiche; nel capitolo 2 si è studiato l'effetto deleterio dell'aging, velocizzato dalla presenza di umidità, nei provini testati a trazione e l'influenza della disposizione delle fibre sul carico sopportabile.

Nel capitolo 3 è stato possibile trovare una relazione diretta e lineare tra il difetto superficiale dei provini e il carico critico di buckling da loro sopportabile. Inoltre, studiando le frequenze proprie delle strutture, per alcuni tipi di struttura, è stato possibile determinare il carico critico senza distruggere il provino. Questo metodo è risultato maggiormente accurato quando applicato al materiale metallico, con un errore del 6.8%, mentre per i provini stampati con le fibre di carbonio con un errore 47% probabilmente a causa dei difetti derivanti dalla stampa dei provini e della difficoltà di rilevamento delle frequenze sotto carico.

Futuri studi in questo ambito potrebbero allargare gli studi anche per provini di diverse forme come, per esempio, il guscio rinforzato o simulare il difetto superficiale di un provino tramite una forza fittizia nel modello FEM al fine di simulare più efficacemente una struttura reale.

Indice delle figure

Figura 1.1 Costi per chilo in LEO[1]
Figura 1.2 Iter per l'ottenimento di una certificazione di omologazione 3
Figura 1.3 Esempio di stereolitografia
Figura 1.4 Esempio di oggetto stampato tramite tecnologia SLS
Figura 1.5 Estratto dello standard internazionale ISO/ASTM 52900 $\left[10\right] 8$
Figura 1.6 Influenza del vincolo sulle condizioni di carico [12] 10
Figura 1.7 A sinistra martelletto ed a destra sensore applicato al provino 12
Figura 1.8 Risultati per una piastra piana teorico e VCT [13] 13
Figura 1.9 Andamento delle curve carico-frequenza di piastre con difetto
iniziale [13] 14
Figura 2.1 Modello provino dog-bone 16
Figura 2.2 Provini a due wall layers 17
Figura 2.3 Provini a quindici wall layers
Figura 2.4 Layout ambiente di testing: 1 estensimetro, 2 ganasce
autobloccanti, 3 provino, 4 colonna della macchina di testing 19
Figura 2.5 Sistema di testing a trazione con sistema DIC installato a
sinistra
Figura 2.6 Stampaggio 3D dei Provini 21
Figura 2.7 Diagramma tensione deformazione nominale dell'Onyx 23
Figura 2.8 Modulo elastico dei provini del primo lotto a confronto 26
Figura 2.9 Provini del lotto 1 post rottura
Figura 2.10 Modulo elastico dei provini del secondo lotto a confronto 28
Figura 2.11 Provini del lotto 2 post rottura
Figura 2.12 Modulo elastico dei provini del terzo lotto a confronto 30

Figura 2.13 Provini del lotto 3 post rottura
Figura 2.14 Modulo elastico dei provini del quarto lotto a confronto 32
Figura 2.15 Sfaldamento delle fibre a 45°
Figura 2.16 Provini del lotto 4 post rottura
Figura 2.17 Provino 1302 allungamento verticale
Figura 2.18 Provino 1302 restringimento orizzontale
Figura 2.19 Provino 1415 allungamento verticale
Figura 2.20 Provino 1415 restringimento orizzontale
Figura 2.21 Poisson ratio lotto 3
Figura 2.22 Poisson ratio lotto 4
Figura 2.23 Variazione di lunghezza e larghezza lotto 4 41
Figura 2.24 Variazione di lunghezza e larghezza lotto 3 41
Figura 2.25 Allungamento verticale e restringimento orizzontale dei provini
del lotto 4
Figura 2.26 Allungamento verticale e restringimento orizzontale dei provini
del lotto 3
Figura 3.1 Provino di alluminio 46
Figura 3.2 A sinistra le vibrazioni dei colpi inferti al provino con il
martelletto a destra le frequenze del provino in alluminio soggetto a
compressione
Figura 3.3 Relazione tra il carico ed il quadrato delle frequenze
Figura 3.4 Deformazione verticale del provino in alluminio controllo di
spostamento
Figura 3.5 Deformazione fuori dal piano del provino in alluminio controllo
di spostamento
Figura 3.6 Post-buckling del provino in alluminio, è possibile vedere lo slot
del sensore sul retro del provino
Figura 3.7 Comparazione delle tecniche per il calcolo del carico critico 52

Figura 3.8 Difettologia superficiale provino in alluminio
Figura 3.9 Geometria dei provini serie BSXX
Figura 3.10 Layout di testing a compressione dei provini BSXX con
supporti del provino stampati in 3D ed avvitati alle estremità della pressa
Figura 3.11 Test compressivo dei provini BS01-BS05 controllo di
spostamento
Figura 3.12 Test compressivo dei provini BS07-BS09 controllo di forza 59
Figura 3.13 Deformazione fuori dal piano provini BS01-BS05 controllo di
spostamento
Figura 3.14 Deformazione fuori dal piano provini BS07-BS09 controllo di
forza
Figura 3.15 Difettologia superficiale dei provini BS01-BS05
Figura 3.16 Difettologia superficiale dei provini BS07-BS09
Figura 3.17 Relazione tra il difetto iniziale dei provini BSXX ed il loro
carico critico
Figura 3.18 Disposizione delle fibre lungo i provini CFXX
Figura 3.19 Provini serie CFXX a destra ed NCFXX a sinistra
Figura 3.20 Caricamento scaglionato per prova VCT sui provini CFXX
controllo di forza
Figura 3.21 Buckling dei provini CF con fibra di carbonio
Figura 3.22 Predizione del carico critico tramite tecnica VCT 69
Figura 3.23 Difetto superficiale provini CFXX
Figura 3.24 Caricamento scaglionato per prova VCT sui provini NCFXX
controllo di forza
Figura 3.25 Buckling dei provini NCF senza fibra di carbonio
Figura 3.26 Predizione del carico critico tramite tecnica VCT 73

Figura 3.27 A sinistra la deformazione fuori dal piano dei provini BS a
destra la configurazione prima dell'analisi
Figura 3.28 Comparazione delle curve carico-frequenza del provino in
alluminio
Figura 3.29 Aggiunta della massa non strutturale al modello FEM in
alluminio
Figura 3.30 Comparazione delle curve carico-frequenza dei provini senza la
fibra di carbonio
Figura 3.31 Comparazione mediata delle curve carico-frequenza dei provini
senza la fibra di carbonio
Figura 3.32 Comparazione delle curve carico-frequenza dei provini con la
fibra di carbonio
Figura 3.33 Comparazione mediata delle curve carico-frequenza dei provini
con fibra di carbonio

Indice delle tabelle

Tabella 1 Vantaggi e svantaggi della tecnica di stampa FDM 5
Tabella 2 Vantaggi e svantaggi della tecnica di stampa SLA
Tabella 3 Vantaggi e svantaggi della tecnica di stampa SLS7
Tabella 4 Dimensioni nominali dei provini AST-D638 adattati 16
Tabella 5 Caratteristiche del materiale Onyx da catalogo 22
Tabella 6 Misurazione dei provini
Tabella 7 Caratteristiche dei provini derivati dalle prove di trazione 43
Tabella 8 Comparazione dei risultati ed errore percentuale relativamente
al dato sperimentale per provino in alluminio
Tabella 9 Misure nominali BSXX 55
Tabella 10 Misurazioni effettuate sui provini BSXX 57
Tabella 11 Risultati CF del carico critico a confronto con il valore
sperimentale
Tabella 12 Risultati NCF del carico critico a confronto con il valore
sperimentale
Tabella 13 Modelli dei materiali usati
Tabella 14 Dati FEM delle frequenze al variare del carico del provino
d'alluminio
Tabella 15 Dati FEM delle frequenze al variare del carico del provino della
serie NCF

Bibliografia

- H. Jones, «Changes in launch cost per kilogram to low earth orbit. Note: From The Recent Large Reduction in Space Launch Cost», 2018. https://www.researchgate.net/figure/Changes-in-launch-costper-kilogram-to-low-earth-orbit-Note-From-The-Recent-Large_fig2_349159890/actions#reference (consultato 12 gennaio 2023).
- [2] EASA, «Aircraft certification», https://www.easa.europa.eu/en/domains/aircraft-products/aircraftcertification. https://www.easa.europa.eu/en/domains/aircraftproducts/aircraft-certification (consultato 12 gennaio 2023).
- [3] Dan Johnson, «The cost of certification», General Aviation News, 9 settembre 2012. Consultato: 12 gennaio 2023. [Online]. Disponibile su: https://generalaviationnews.com/2012/09/09/the-cost-ofcertification/
- [4] Andrew McComas, «Aerospace engineering services company uses Simcenter STAR-CCM+ to reduce aircraft certification cost», Siemes. https://resources.sw.siemens.com/en-US/case-study-tlgaerospace (consultato 12 gennaio 2023).
- [5] «La Stampa 3D: tecnologie a confronto», Medics 3D, 14 ottobre
 2020. https://www.medics3d.com/la-stampa-3d-tecnologie-aconfronto/ (consultato 12 gennaio 2023).

- [6] Flyability, «What is destructive testing and how does it work? », *Flyability*. https://www.flyability.com/destructive-testing (consultato 12 gennaio 2023).
- [7] Flyability, «What is NDT (non-destructive testing)? », Flyability. https://www.flyability.com/ndt (consultato 12 gennaio 2023).
- [8] H. Abramovich, «The Vibration Correlation Technique A reliable nondestructive method to predict buckling loads of thin-walled structures», *Thin-Walled Structures*, vol. 159, pag. 107308, feb. 2021, doi: 10.1016/J.TWS.2020.107308.
- M. A. Arbelo *et al.*, «Vibration correlation technique for the estimation of real boundary conditions and buckling load of unstiffened plates and cylindrical shells», *Thin-Walled Structures*, vol. 79, pagg. 119–128, giu. 2014, doi: 10.1016/j.tws.2014.02.006.
- [10] Erica Lawrence, «ASTM D638: Guida definitiva ai test di trazione delle materie plastiche». https://www.instron.com/it-it/testingsolutions/astm-standards/astm-d638 (consultato 12 gennaio 2023).
- [11] Markforged, «Scheda del materiale», gen. 2022. Consultato: 12 gennaio 2023. [Online]. Disponibile su: https://s3.amazonaws.com/mf.product.doc.images/Datasheets/Trans lations/IT/Markforged_CompositesV5.1_it.pdf
- [12] Дмитрий Сорокин aka Dimsa, «Buckling», https://it.wikipedia.org/wiki/Carico_critico_euleriano#/media/File
 :Buckling.gif, 29 gennaio 2009.
- [13] H. Lurie, «Lateral vibrations as related to structural stability», California Institute of Technology, 1950.