



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Influenza del materiale e di difettosità sul
comportamento dinamico di una ruota airless
realizzata tramite manifattura additiva**

Influence of material and defects on the dynamic
behavior of an airless wheel made by additive
manufacturing

Relatore:

Prof. Paolo Castellini

Candidato:

Dieghi Alessandro

Correlatore:

Ing. Alessandro Annessi

Sommario

INDICE DELLE FIGURE	I
INDICE DELLE TABELLE	III
1 INTRODUZIONE	1
2 ADDITIVE MANUFACTURING (AM)	3
2.1 CARATTERISTICHE DELL'AM	3
2.1.1 <i>Classificazione dei processi</i>	5
2.1.2 <i>Classificazione dei materiali usati nell'AM</i>	6
2.2 STEREOLITOGRAFIA	7
2.3 MATERIALI USATI NELLA STEREOLITOGRAFIA	9
2.3.1 <i>Fotopolimeri</i>	9
2.3.1.1 Effetto della temperatura sui fotopolimeri	10
2.3.1.2 Effetto dell'umidità sui fotopolimeri	10
2.3.2 <i>Black resin-V4</i>	11
3 CENNI SULL'ANALISI MODALE	13
3.1 SCELTA DEL DRIVING POINT	13
3.2 APPLICAZIONE DI UN INPUT NOTO	14
3.3 RISPOSTA IN FREQUENZA (FRF)	14
3.4 FUNZIONE DI COERENZA	15
3.5 CURVEFITTING MODALE E FORME MODALI	15
4 APPLICAZIONE DELL'ANALISI MODALE ALLO STUDIO DELL'INFLUENZA DEL DIFETTO	16
4.1 PROVE SIMULATE APPLICATE ALLE RUOTE	16
4.1.1 <i>Risultati delle prove simulate</i>	18
4.2 PROVE SPERIMENTALI APPLICATE ALLE RUOTE	20
4.2.1 <i>Setup delle prove</i>	20
4.2.2 <i>Esecuzione delle prove: vincolo, geometria e condizioni</i>	21
4.2.3 <i>Risultati delle prove sperimentali</i>	22
5 ANALISI DELL'INFLUENZA DI ALTRI FATTORI SUL COMPORTAMENTO DINAMICO DEL PEZZO	24
5.1 INFLUENZA DELL'INVECCHIAMENTO DEL MATERIALE	24
5.1.1 <i>Esecuzione delle prove sperimentali sulle travette: setup, geometria, vincolo e intervalli temporali</i>	24
5.1.2 <i>Risultati delle prove sperimentali</i>	26
5.2 INFLUENZA DELLO STAMPAGGIO	27
5.3 INFLUENZA DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI	31
5.3.1 <i>Effetti dell'umidità sul comportamento delle ruote</i>	32
5.3.1.1 Analisi degli effetti dell'umidità sulla ruota 1	32
5.3.1.2 Analisi degli effetti dell'umidità sulla ruota 2	34
5.3.1.3 Discussione dei risultati sugli effetti dell'umidità	35
5.3.2 <i>Effetti della temperatura sul comportamento del pezzo</i>	36
5.3.2.1 Analisi degli effetti della temperatura sulla ruota 1	36
5.3.2.2 Analisi degli effetti della temperatura sulla ruota 2	38
5.3.2.3 Discussione dei risultati sugli effetti della temperatura	39
5.3.3 <i>Analisi delle variazioni massive</i>	40
5.3.3.1 Andamento della massa rispetto alla temperatura e all'umidità	40
5.3.3.2 Considerazioni sui valori di massa utilizzati nelle analisi e sugli effetti dovuti al fissaggio o meno del filo	41
5.3.3.3 Discussione dei risultati sulle variazioni massive	42
5.3.4 <i>Analisi delle variazioni delle frequenze relative ai primi quattro picchi (posizione)</i>	43
5.3.4.1 Andamento delle posizioni rispetto alla temperatura e all'umidità	43
5.3.4.2 Discussione dei risultati sulle variazioni delle posizioni	45
6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	46
BIBLIOGRAFIA	48

Indice delle figure

<i>Figura 1, andamento economico e previsioni riguardanti il settore additivo</i>	3
<i>Figura 2, composizioni di triangoli con risoluzione crescente di un file "STL"</i>	7
<i>Figura 3, confronto tra diversi tipi di "slicing"</i>	7
<i>Figura 4, elementi della Form3</i>	8
<i>Figura 5, schema funzionamento Form3</i>	8
<i>Figura 6, laser durante la polimerizzazione</i>	9
<i>Figura 7, cartuccia di Black resin-V4</i>	11
<i>Figura 8, solidificazione Black resin-V4 in vasca</i>	11
<i>Figura 9, confronto tra diverse scelte di "driving point"</i>	13
<i>Figura 10, esempio di diagramma di stabilizzazione</i>	15
<i>Figura 11, modello usato per simulazioni</i>	16
<i>Figura 12, modi sperimentali e simulati con E pari a 2.80 GPa</i>	17
<i>Figura 13, difetti in direzione radiale per simulazioni</i>	17
<i>Figura 14, difetti in direzione circonferenziale per simulazioni</i>	17
<i>Figura 15, schema setup usato per le prove</i>	20
<i>Figura 16, file CAD punti di misura ruota</i>	21
<i>Figura 17, FRF ruota 3 in condizione 1,2 e 3</i>	22
<i>Figura 18, confronto prove su ruota 1</i>	23
<i>Figura 19, confronto prove su ruota 2</i>	23
<i>Figura 20, file CAD punti misura travette</i>	25
<i>Figura 21, riproduzione su CAD setup per misura</i>	25
<i>Figura 22, FRF somma travetta 1 dopo vari intervalli temporali</i>	26
<i>Figura 23, confronto punti del raggio delle ruote stampate (a)</i>	27
<i>Figura 24, confronto punti del raggio delle ruote stampate (b)</i>	27
<i>Figura 25, punti di misura per spessore delle ruote</i>	28
<i>Figura 26, confronto spessore ruote</i>	28
<i>Figura 27, variazione circonferenze interne ed esterne per la ruota 1</i>	29
<i>Figura 28, variazione circonferenze interne ed esterne per la ruota 2</i>	30
<i>Figura 29, variazione circonferenze interne ed esterne per la ruota 3</i>	30
<i>Figura 30, FRF della ruota 1 con temperatura pari a 10 C e umidità variata a 50 % (condizione 4)</i> ,.....	32
<i>Figura 31,FRF della ruota 1 con temperatura pari a 20 C e umidità variata a 50 % (condizione 7)</i> ,.....	33
<i>Figura 32, FRF della ruota 1 con temperatura pari a 30 C e umidità variata a 50 % (condizione 10)</i> ,.....	33
<i>Figura 33, FRF della ruota 2 con temperatura pari a 10 C e umidità variata a 50 % (condizione 4)</i> ,.....	34
<i>Figura 34, RF della ruota 2 con temperatura pari a 20 C e umidità variata a 50 % (condizione 7)</i> ,.....	34
<i>Figura 35, FRF della ruota 2 con temperatura pari a 30 C e umidità variata a 50 % (condizione 10)</i> ,.....	35
<i>Figura 36, FRF della ruota 1 con umidità pari a 50 % e temperatura variata a 10 C (condizione 4)</i> ,.....	36
<i>Figura 37, FRF della ruota 1 con umidità pari a 70 % e temperatura variata a 10 C (condizione 5)</i> ,.....	37
<i>Figura 38, FRF della ruota 1 con umidità pari a 90 % e temperatura variata a 10 C (condizione 6)</i> ,.....	37
<i>Figura 39, FRF della ruota 2 con umidità pari a 50 % e temperatura variata a 10 C (condizione 4)</i> ,.....	38
<i>Figura 40, FRF della ruota 2 con umidità pari a 70 % e temperatura variata a 10 C (condizione 5)</i> ,.....	38

<i>Figura 41, FRF della ruota 2 con umidità pari a 90 % e temperatura variata a 10 C (condizione 6),</i>	39
<i>Figura 42, variazione massa ruota 1 rispetto al cambiamento di umidità e temperatura</i>	40
<i>Figura 43, variazione massa ruota 2 rispetto al cambiamento di umidità e temperatura</i>	40
<i>Figura 44, FRF ottenute per la ruota 1 in condizione 7</i>	41
<i>Figura 45, FRF ottenute per la ruota 2 in condizione 7</i>	41
<i>Figura 46, FRF ottenute per la ruota 1 in condizione 8</i>	42
<i>Figura 47, FRF ottenute per la ruota 2 in condizione 8</i>	42
<i>Figura 48, andamento frequenza relativa al primo picco di risonanza (posizione) della ruota 1 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità</i>	43
<i>Figura 49, andamento frequenza relativa al secondo picco di risonanza (posizione) della ruota 1 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità</i>	43
<i>Figura 50, andamento frequenza relativa al terzo picco di risonanza (posizione) della ruota 1 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità</i>	43
<i>Figura 51, andamento frequenza relativa al quarto picco di risonanza (posizione) della ruota 1 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità</i>	43
<i>Figura 52, andamento frequenza relativa al primo picco di risonanza (posizione) della ruota 2 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità</i>	44
<i>Figura 53, andamento frequenza relativa al secondo picco di risonanza (posizione) della ruota 2 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità</i>	44
<i>Figura 54, andamento frequenza relativa al terzo picco di risonanza (posizione) della ruota 2 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità</i>	44
<i>Figura 55, andamento frequenza relativa al quarto picco di risonanza (posizione) della ruota 2 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità</i>	44

Indice delle tabelle

<i>Tabella 1, macrocategorie in cui sono divisi i processi dell'AM.....</i>	<i>5</i>
<i>Tabella 2, materiali usati per i vari processi</i>	<i>6</i>
<i>Tabella 3, scheda tecnica elementi pericolosi presenti nella resina e che necessitano di particolare attenzione nell'utilizzo</i>	<i>12</i>
<i>Tabella 4, parametri usati per simulazioni.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabella 5, esempi di modi ottenuti tramite simulazioni</i>	<i>18</i>
<i>Tabella 6, frequenze relative ai modi nelle differenti casistiche (prima parte)</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 7, frequenze relative ai modi nelle differenti casistiche (seconda parte).....</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 8, condizioni svolgimento prove (prima parte).....</i>	<i>22</i>
<i>Tabella 9, data delle prove per invecchiamento materiale sulle travette</i>	<i>25</i>
<i>Tabella 10, dati variazione spessore delle ruote</i>	<i>29</i>
<i>Tabella 11, condizioni svolgimento prove (seconda parte)</i>	<i>31</i>

1 Introduzione

Nel seguente documento si ha l'intento di dare una caratterizzazione del comportamento dinamico di pezzi stampati tramite Additive Manufacturing (AM), in particolare mediante stereolitografia. Queste informazioni sono state ricavate tramite prove simulate, sperimentali (impact test) e analisi modale, svolte su due particolari tipi di campioni.

Per prima cosa sono state stampate tre ruote partendo dallo stesso file CAD e sono state testate per valutare l'accuratezza dello stampaggio.

In seguito su una di queste, è stato creato un difetto. Inizialmente tramite saldatrice è stata realizzata una cavità in un raggio fino a metà profondità e sono stati eseguiti i test; successivamente si è arrivati alla rottura completa del raggio (difetto passante) e si sono svolte di nuovo le prove. Inoltre sono stati simulati dieci tipi di difetti con varie profondità.

Questo ci ha permesso di comprendere l'influenza che lo stampaggio, la presenza di un difetto e le sue caratteristiche hanno sul comportamento dinamico del pezzo.

Durante le analisi si sono potute notare alcune variazioni a livello dinamico, non dovute alla presenza del difetto.

Dopo alcune ricerche, sui principali fattori che impattano sulle caratteristiche dei pezzi una volta stampati, si è ipotizzato che queste variazioni fossero dovute all'invecchiamento del materiale e alle variazioni delle condizioni ambientali, in particolare della temperatura e dell'umidità (non possono essere invece attribuite alla luce UV, in quanto i pezzi sono stati conservati non esposti a tale radiazione).

Perciò gli studi sono proseguiti effettuando dei cicli in camera climatica di almeno 48 h per le due ruote prive di difetti, variando temperatura e umidità, per analizzare l'influenza di tali parametri nel post-stampa. Inoltre sono stati stampati altri due campioni, delle travette, e sono state fatte delle prove man mano che il materiale invecchiava per studiarne il processo di stabilizzazione.

Infatti, uno dei problemi maggiori dei materiali usati nell'AM sono le variazioni delle proprietà una volta che il pezzo è stato stampato come avvenuto per i nostri campioni. Ultimamente si è cercato di sviluppare nuovi materiali in cui l'assorbimento dei principali fattori in grado di modificare le proprietà del materiale, come luce UV, calore e umidità, fosse ridotto. Ma, nonostante ciò, i loro effetti sono ancora di elevata importanza e spesso non sono presenti informazioni da parte dei principali produttori. Gli unici dati disponibili derivano da prove e analisi svolte successivamente su pezzi stampati. Con il presente documento si vuole contribuire ad aumentare le informazioni disponibili, in modo da rendere gli utilizzatori maggiormente consapevoli e da poter risolvere le principali problematiche di questi materiali.

Nel capitolo 2 si introduce il lettore nel mondo dell'Additive Manufacturing, mettendo in luce i principali vantaggi e svantaggi di questa tecnologia. Si porge poi una particolare attenzione al processo della stereolitografia (processo usato per la stampa dei campioni analizzati) e ai materiali usati per tale processo: i fotopolimeri.

Nel capitolo 3 viene riassunta la teoria che è alla base dell'analisi modale, dall'esecuzione di una prova generica all'analisi dei risultati.

Nel capitolo 4 sono descritte le prove simulate e sperimentali eseguite sulle ruote per l'analisi dell'influenza di diverse tipologie di difetti e sono esposti i risultati ottenuti.

Nel capitolo 5 si continua la descrizione di ulteriori test e i relativi risultati, eseguiti per l'analisi dell'influenza dell'invecchiamento su due travette, dello stampaggio e delle condizioni ambientali (umidità e temperatura) sulle ruote e lo studio delle variazioni di massa e delle frequenze relative ai primi quattro picchi (posizione) dovuti al cambiamento di tali parametri.

In conclusione si sono potuti caratterizzare gli effetti di alcuni dei principali fattori che influiscono sulle proprietà dei pezzi stampati con l'obiettivo di continuare tali analisi per permettere un utilizzo dell'Additive Manufacturing maggiormente consapevole delle caratteristiche di ciò che sarà prodotto.

2 Additive Manufacturing (AM)

2.1 Caratteristiche dell'AM

L'Additive Manufacturing viene definito dal comitato F42 (Additive Manufacturing technologies), dell'American Society for Testing and Materials (ASTM) nato nel 2009, come un "processo di giunzione di materiale per costruire un oggetto 3D, partendo dal modello CAD (Computer Aided Design), generalmente strato su strato, in opposizione alle tradizionali tecnologie di manifattura sottrattiva". La diffusione di questa tecnologia è dovuta alle caratteristiche proprie del processo che permettono un'ottimizzazione topologica, ottenendo i seguenti vantaggi:

- risparmio di materia prima poiché è previsto il materiale solo dove è estremamente necessario;
- riduzione di peso;
- riduzione di scarti (sempre presenti nella manifattura tradizionale, sotto forma ad esempio di trucioli e bave);
- ecosostenibilità (possibile riciclaggio delle materie prime inutilizzate);
- elevata personalizzazione (produzione su richiesta), senza costi aggiuntivi, come quelli dovuti all'acquisto/produzione di stampi;
- elevata precisione di produzione, consentendo bassi discostamenti tra progetto e produzione.

Tutto questo ha portato attualmente ad un forte sviluppo dell'AM in molti ambiti oltre alla meccanica, provocando un'enorme crescita economica e, come si può vedere dalla figura 1, le prospettive sono molto positive anche per gli anni successivi.

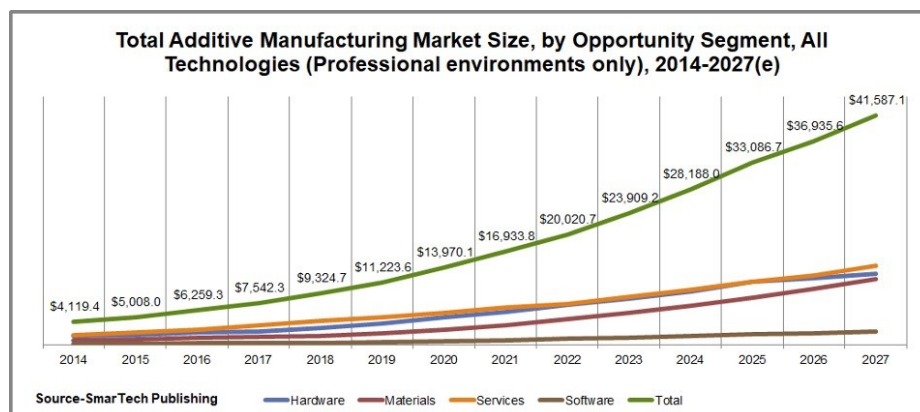


Figura 1, andamento economico e previsioni riguardanti il settore additivo

L'estrema leggerezza, per esempio, è in grado di risolvere uno dei maggiori problemi del trasporto elettrico, settore anche questo in forte sviluppo, ovvero la pesantezza; l'elevata personalizzazione ha permesso di trovare ampio impiego nella biomedica; in particolari condizioni, l'assenza di stampi e la possibilità di ottenere geometrie estremamente complicate, hanno portato l'AM ad essere l'unico candidato per la produzione.

Ovviamente non è privo di punti deboli, alcuni dovuti anche alla "giovinezza" del processo, e quindi, in alcuni casi non rappresenta la miglior soluzione. Questa tecnologia è da intendersi come complementare alle altre, non come sostitutiva.

I principali svantaggi sono:

- necessità di trattamenti post-stampa;
- elevata rugosità superficiale e porosità;
- costo iniziale relativamente alto anche se spesso recuperato dal risparmio che la produzione additiva permette;
- esposizione dei lavoratori a materiali pericolosi, calore, fonti laser;
- la non convenienza a stampare pezzi a basso valore aggiunto e l'impossibilità attualmente di usare l'AM per elevati volumi di produzione a causa dei "lunghi" tempi di stampaggio.

L'impegno è rivolto a migliorare questi punti, per arrivare a sfruttare tutto il potenziale della produzione additiva, talmente grande da essere definito "illimitato" se confrontato con le tecnologie tradizionali, ma ancora poco sfruttato.

2.1.1 Classificazione dei processi

Esistono più tipologie di stampaggio 3D, raggruppate, come previsto da normative, secondo il tipo di processo nelle 7 gradi categorie di seguito riportate.

Categorie di processo	Tecnologia	Materiali
Binder Jetting	3D Printing	Metallo
	Ink-jetting	Polimero
	S-Print	Ceramico
	M-Print	
Direct Energy Deposition	Direct Metal Deposition	Metallo
	Laser Deposition	
	Laser Consolidation	
	Electron Beam Direct Melting	
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling	Polimero
Material jetting	Polyjet	Fotopolimero
	Ink-jetting	
	Thermojet	
Powder bed fusion	Selective Laser Sintering	Polimero, Ceramico
	Selective Laser Melting	Metallo
	Electron Beam Melting	Metallo
Sheet lamination	Ultrasonic Consolidation	Ibrido
	Laminated Object Manufacture	Metallico
		Ceramico
Vat photopolymerization	Stereolithography	Fotopolimero
	Digital Light Processing	Fotopolimero

Tabella 1, macrocategorie in cui sono divisi i processi dell'AM

Le ruote e le travette, oggetti delle analisi di questo documento, sono state stampate tramite stereolitografia, spesso indicata con la sigla “SLA”, processo che sfrutta la fotopolimerizzazione.

2.1.2 Classificazione dei materiali usati nell'AM

I materiali usati per l'AM dipendono soprattutto dalla tecnologia utilizzata. I più usati appartengono principalmente a quattro macrofamiglie: polimerici, metallici, compositi e ceramici.

Materiali	Tecnologie
Fotopolimero (Resina termoindurente)	Stereolithography, Polyjet, Project, Direct Light Projection
Termoplastico a basso punto di fusione	Drop on Demand
Termoplastico definitivo	Fused Deposition Modelling, Selective Laser Sintering
Ceramici	Three Dimensional Printing, Selective Laser Sintering
Metalli	Three Dimensional Printing, Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Laser Deposition
Compositi	Ultrasonic Additive Manufacturing

Tabella 2, materiali usati per i vari processi

La diffusione di materiali non metallici è dovuta soprattutto al fatto che leghe metalliche stampabili o che consentono di avere una buona microstruttura (priva di cricche e grandi grani colonnari), nonostante le forti dinamiche di stampa sono molte poche. Data la “similitudine” tra il processo di stampaggio e di saldatura, in generale, si dicono stampabili le leghe saldabili. Per questo motivo ci si orienta sempre di più verso la ricerca di nuovi materiali che ben si adattano a questi processi.

2.2 Stereolitografia

La prima tra tutte le tecnologie di fabbricazione additiva, ad oggi disponibile, ad essere stata brevettata fu proprio la stereolitografia. Questo processo nacque all'inizio degli anni '70, quando il ricercatore giapponese Hideo Kodama inventò il moderno approccio alla stereolitografia su strati, usando la luce ultravioletta per polimerizzare polimeri fotosensibili. Nel 1984 fu poi sviluppata da Charles Hull, come risposta ai lunghi tempi di produzione per pezzi personalizzati, difetto tipico della manifattura e della formatura, fino al rilascio del brevetto nel 1986, anno della fondazione della propria azienda: la 3D Systems. Nel 1988 proposero sul mercato il loro primo prodotto, lo SLA-1; oggi, 3D Systems è una delle più grandi aziende di stampa 3D.

La prima fase della stereolitografia, come qualsiasi altro processo additivo, è la modellazione tridimensionale dell'oggetto tramite software CAD (Computer-Aided Design) e la successiva conversione del file in formato STL (Stereo Lithography interface format) in cui la superficie viene suddivisa in una composizione di più triangoli (maggiore numero di triangoli con conseguente minore dimensione consentirà di ottenere migliore risoluzione). Segue lo "slicing", la divisione in più strati, che corrisponderanno a quelli stampati in sequenza dalla macchina.

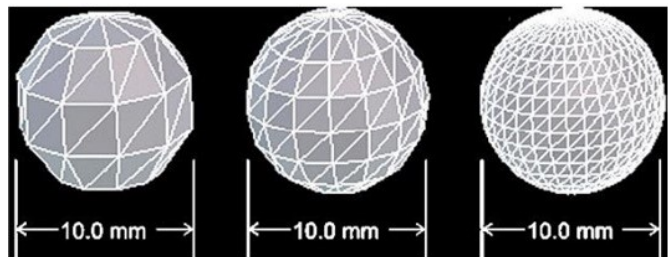


Figura 2, composizioni di triangoli con risoluzione crescente di un file "STL"

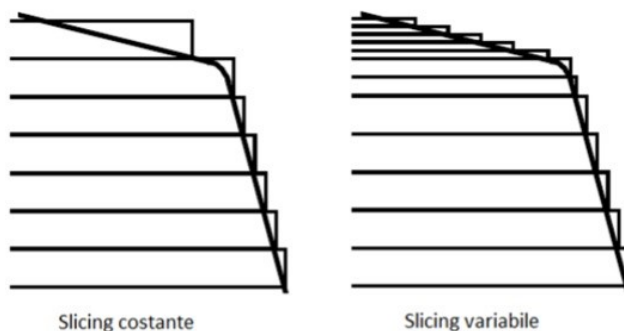


Figura 3, confronto tra diversi tipi di "slicing"

La superficie viene intersecata da piani posti a distanza costante se si parla di "slicing uniforme", o variabile in caso di "slicing adattivo", che, come visibile dalla figura 3, permette di ottenere minore variazione della superficie del pezzo stampato rispetto al file CAD. La distanza tra i piani è un parametro fondamentale in quanto definisce proprio lo spessore degli

strati che saranno stampati in progressione e sovrapposti l'uno all'altro. Questo e il conseguente numero di strati influenza la precisione dimensionale, la finitura superficiale, i tempi e i costi di stampaggio; sarà quindi indispensabile un'attenta analisi per trovare il compromesso che più si adatta alle varie situazioni. Prima di avviare lo stampaggio si deve prevedere l'eventuale necessità di posizionare appositi supporti per il sostegno dell'oggetto e per facilitare la diffusione del calore, riducendo gli stress termici. I supporti sono stampati allo stesso modo dell'oggetto, ma saranno poi rimossi al termine del processo.

Una volta giunti a questo punto, noti e stabiliti tutti i parametri di stampa, è possibile iniziare lo stampaggio; in seguito si parlerà solo della tecnologia adottata per la stampa dei campioni analizzati, poiché ogni processo si discosta troppo dagli altri per fare una descrizione comune.

Per la stereolitografia la prossima fase è rappresentata dalla stesa del materiale sul piano di stampaggio. In generale queste stampanti, hanno una vaschetta contenente il liquido da polimerizzare, che viene riempita direttamente dalla cartuccia oppure da uno sweeper, una piattaforma in grado di muoversi perpendicolarmente al piano di stampa, tale da consentire la solidificazione di strati progressiva e un sistema ottico formato da laser e specchi in grado di indirizzarlo nei punti “dettati” dal file CAD. Nel caso della Form3, dispositivo utilizzato per la stampa dei nostri casi studio, abbiamo la cartuccia che

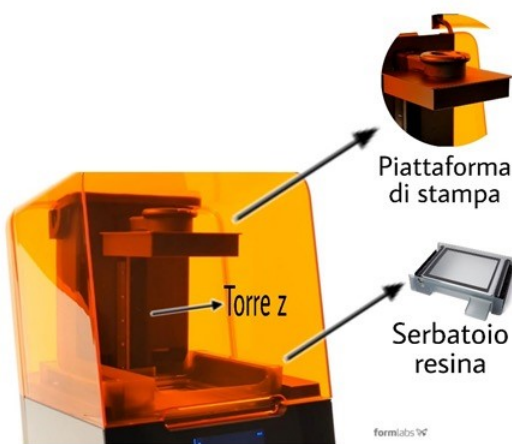


Figura 4, elementi della Form3

versa la resina, tramite un beccuccio, direttamente sul serbatoio.

All’inizio dello stampaggio la piattaforma di stampa viene immersa nella resina lasciando solo un sottile strato di liquido tra la piattaforma e la parte inferiore del serbatoio. Una serie di galvanometri e specchi dirige il laser sul fondo del serbatoio attraversandolo tramite una finestra trasparente e provocando la solidificazione della resina fotosensibile (processo analizzato successivamente) seguendo lo spaccato del file CAD. Ogni volta che uno strato è solidificato, la

piattaforma e le parti stampate si sollevano consentendo il “refill” di resina fresca. Il tempo per il riempimento della vaschetta, chiamato “tempo d’attesa”, deve essere il risultato di un buon compromesso, poiché tempi troppo brevi potrebbero compromettere l’accuratezza della lavorazione, a fronte di una bassa quantità di legami fra gli strati, al contrario, tempi troppo elevati comportano un processo di costruzione estremamente lento. La piattaforma poi si abbassa di nuovo e il processo viene ripetuto per ogni strato fino all’ottenimento della forma finale. Dopo lo stampaggio, l’oggetto subisce una pulizia tramite bagno in alcool isopropilico e l’operazione di rimozione dei supporti. Successivamente si dovranno eseguire alcune operazioni post-stampaggio poiché, come si è visto, uno dei principali svantaggi dell’additive è rappresentato proprio dalle “scarse” proprietà del materiale appena stampato. Inoltre andranno svolti trattamenti termici e di “stress relief”, per evitare la deformazione del pezzo dovuta alle tensioni causate implicitamente dal processo di stampa, trattamenti



Figura 5, schema funzionamento Form3

per ottenere una migliore rifinitura superficiale, limite dell'AM, e trattamenti di invecchiamento per raggiungere il "plateau" delle prestazioni del materiale. Dalle analisi svolte si è potuto notare che le resine usate per la stampa hanno proprietà stabili solo dopo alcuni cicli di invecchiamento perciò, specialmente per utilizzi in cui sono richieste particolari prestazioni o stabilità, l'oggetto, nonostante alcuni trattamenti, è ancora inutilizzabile senza questi cicli. Alla fine dello stampaggio, inoltre si potrebbe notare la presenza di materiale non reticolato, indice della necessità di ulteriori trattamenti termici o di esposizione alla radiazione ultravioletta.

2.3 Materiali usati nella stereolitografia

2.3.1 Fotopolimeri

I fotopolimeri sono polimeri e resine che hanno la capacità di assorbire una porzione della luce diventando solidi e compatti. La fabbricazione di un oggetto nella stereolitografia avviene grazie alla solidificazione di una resina polimerica fotosensibile attraverso un processo di polimerizzazione esotermico (fenomeno noto come curing), caratterizzato da reazioni chimiche di cross-linking, che danno luogo alla generazione di un network polimerico tridimensionale che non può essere portato a fusione, insolubile e altamente reticolato.

L'energia necessaria per far avvenire tale reazione è fornita proprio dal laser che, indirizzato sul fondo del serbatoio, attraversando un film sottile, giunge sul liquido fotosensibile, contenente fotoiniziatori che liberano radicali o ioni che vanno ad innescare le reazioni tra monomeri reattivi, ottenendo un materiale polimerico solido. I principali fattori che influenzano queste reazioni sono principalmente l'intensità della luce, la temperatura e la composizione della resina utilizzata. I polimeri infatti sono materiali viscoelastici. Le loro proprietà, e di conseguenza quelle del pezzo stampato in SLA, dipendono da fattori come il tempo di stampaggio, i trattamenti, i parametri di stampa e di reazione, la temperatura, l'umidità e l'esposizione alle radiazioni UV. È importante proteggere il pezzo da questi ultimi fattori, per evitare variazioni prestazionali post-stampa, oltre a quelle inevitabili dell'invecchiamento.

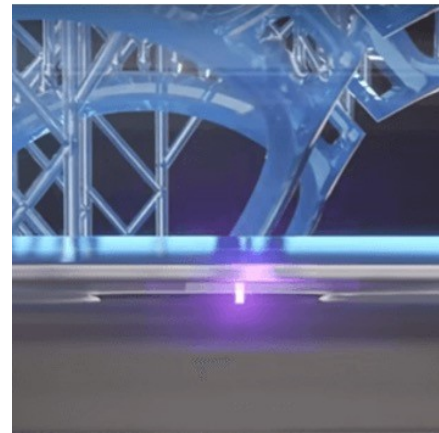


Figura 6, laser durante la polimerizzazione

2.3.1.1 Effetto della temperatura sui fotopolimeri

L'esposizione del pezzo stampato a una fonte di calore ne provoca variazioni nelle prestazioni e nell'aspetto fisico. Quest'ultimo è certamente meno importante ma può essere usato come indice di "invecchiamento termico". Carola Tröger et al. (2008) hanno osservato particolari cambiamenti del colore (effetto con maggior importanza nelle superficie rispetto al centro) di pezzi stampati tramite stereolitografia. Secondo le loro analisi questi sono dovuti alla decomposizione chimica degli additivi aggiunti (spesso presenti) nonché da una termo-ossidazione della matrice polimerica favorita dall'aumento della temperatura che si traduce direttamente in un aumento del tasso di foto-ossidazione per tutti i polimeri. Una delle cause potrebbe essere che una temperatura più alta aumenta la velocità di diffusione superficiale dell'ossigeno. Un altro motivo potrebbe derivare dalla termo-ossidazione che crea sottoprodotti ossidativi come idroperossidi o radicali carbonilici. Questi cambiamenti chimici si riflettono in cambiamenti delle proprietà meccaniche del materiale e del pezzo stesso.

È molto difficile dare una spiegazione precisa agli effetti dovuti solamente alla temperatura, perché spesso si ha la sua azione combinata a quella di altri agenti, come per esempio l'umidità.

2.3.1.2 Effetto dell'umidità sui fotopolimeri

Seppur con delle variazioni tra materiale e materiale, i fotopolimeri in generale sono in grado di assorbire umidità provocando variazioni delle proprietà meccaniche. È importante capire come viene assorbita l'umidità e gli effetti di tale meccanismo, in particolare la relazione con la variazione del modulo di Young (E) e della rigidità (S). A tal fine sono state svolte varie prove. In particolare, K. Altaf et al. hanno effettuato dei test su alcune resine e hanno mostrato come varia il modulo di Young rispetto alla concentrazione di umidità, ottenendo la seguente relazione:

$$E_t = E_d - \left[\frac{C_t}{C_\infty} (E_d - E_s) \right]$$

Con E_t si indica il modulo di Young di una resina dopo essere stata per un tempo "t" in ambiente umido e caratterizzata in quell'istante dalla concentrazione C_t . Con E_d , E_s , C_∞ si indicano rispettivamente il modulo di Young in condizioni di non umidità, in condizioni di saturazione e la concentrazione di umidità in saturazione. In caso di oggetto con composizione omogenea e sezione costante è possibile calcolare la rigidità come $S = \frac{EA}{L}$ (dove A e L indicano rispettivamente l'area e la lunghezza dell'oggetto considerato) e, sostituendo alla relazione il modulo di Young poco prima descritto, è possibile trovare l'andamento della rigidità rispetto alla concentrazione di umidità. In alcuni casi in

presenza di umidità, come avviene per il legno, si potrebbe notare un rigonfiamento del pezzo accompagnato da variazioni di massa.

2.3.2 Black resin-V4

Per la stampa dei campioni di questo documento è stata usata una resina della Formlabs, caratterizzata da un colore nero, spesso usata come fondo per pezzi che subiranno in seguito verniciatura o ulteriori trattamenti superficiali. Il nome di questo materiale è “black resin-V4” e il suo costo attualmente è circa 150 \$ al litro. Supporta risoluzioni di stampa fino a 25 micron e permette di avere buone proprietà. Rispetto ad altre resine dello stesso produttore, alcuni utenti hanno messo in luce un particolare difetto di questa resina: il liquido, dopo 1-2 giorni lasciato nel serbatoio (pur essendo ben sigillato), solidifica, lasciando nel fondo dei precipitati che non permettono la corretta stampa del pezzo.

Questo problema potrebbe essere dovuto dalla pesantezza del pigmento nero, che ne provoca la precoce precipitazione. Una soluzione, anche se poco pratica, è quella di mescolare e raschiare il materiale nel serbatoio e riversarlo nella cartuccia, agitarla e riavviare la stampa.



Figura 7, cartuccia di Black resin-V4

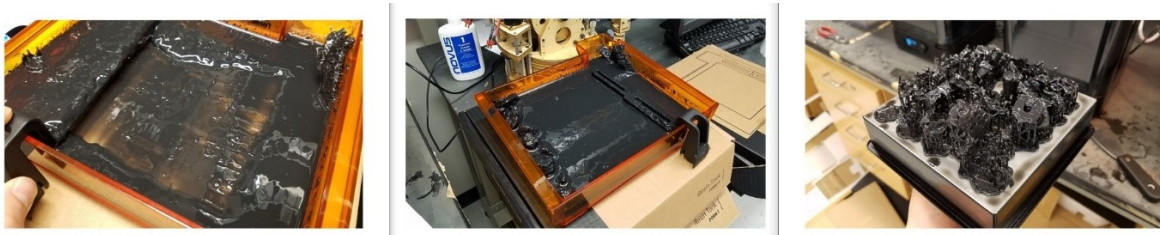


Figura 8, solidificazione Black resin-V4 in vasca

Come dichiarato dagli stessi produttori, i principali elementi presenti nella miscela che necessitano di particolare attenzione sono:

Identificazione	N. di registrazione REACH	Nome	Classificazione secondo la Normativa (CE) n. 1272/2008 (CLP)	Peso %
Numero CAS: 72869-86-4 Numero CE: 276-957-5	-	Dimetacrilato di uretano	Skin Sens. 1; H317 Aquatic Chronic 2; H411	55-75
Numero CAS: Segreto commerciale Numero CE: Segreto commerciale	-	Monomeri di metacrilato	Skin Sens. 1; H317 Eye Irrit. 2; H319	15-25
Numero CAS: 162881-26-7 Numero CE: 423-340-5	-	Fenil-bis(2,4,6-trimetilbenzoi)- fosfin ossido	Skin Sens. 1; H317 Aquatic Chronic 4; H413	<0.9

Tabella 3, scheda tecnica elementi pericolosi presenti nella resina e che necessitano di particolare attenzione nell'utilizzo

Nella scheda tecnica degli elementi sono inoltre dichiarati gli effetti di tale materiale sull'ambiente, alcune proprietà, le condizioni di conservazione, gli effetti dannosi per l'uomo e le eventuali norme di sicurezza da rispettare. Non si trovano particolari rischi riguardo inquinamento, scoppio di incendi o esplosioni, ma si potrebbero avere problemi in caso di contatto con occhi e pelle. In particolare, i monomeri di metacrilato provocano grave irritazione oculare, mentre questi, dimetacrilato di uretano, e fenil-bis (2,4,6-trimetilbenzoi) -fosfin ossido possono provocare reazioni allergiche cutanee.

Le proprietà del materiale una volta stampato invece non sono accuratamente descritte dal produttore, così come spesso avviene nell'AM in generale, e saranno oggetto delle prove discusse nei prossimi paragrafi.

3 Cenni sull'analisi modale

Con il termine analisi modale si fa riferimento allo studio dei sistemi dinamici e alla determinazione delle caratteristiche proprie dei parametri dinamici del sistema. In particolare si ricercano le frequenze naturali, il fattore di smorzamento a esse associato e i modi di vibrare a ciascuna frequenza propria. Il primo step di questo studio è l'applicazione di un input noto, in un particolare punto della struttura che si sta studiando, chiamato "driving point".

3.1 Scelta del driving point

Il driving point rappresenta il punto di applicazione dell'eccitazione. La scelta di questo punto è molto importante, in quanto si deve prediligere un punto in grado di eccitare tutte le frequenze. La sua ricerca avviene tramite "impact hammer" (martello d'impatto) e accelerometro che vengono spostati insieme al fine di identificare le frequenze risonanti delle diverse parti. I risultati vengono confrontati tra loro, scegliendo il punto che garantisce maggior eccitazione. Nella guida rilasciata da Siemens è riportato un grafico che mostra la differenza di risultati tra un punto che garantisce una buona eccitazione (verde) e uno dei punti da evitare come scelta (rosso).

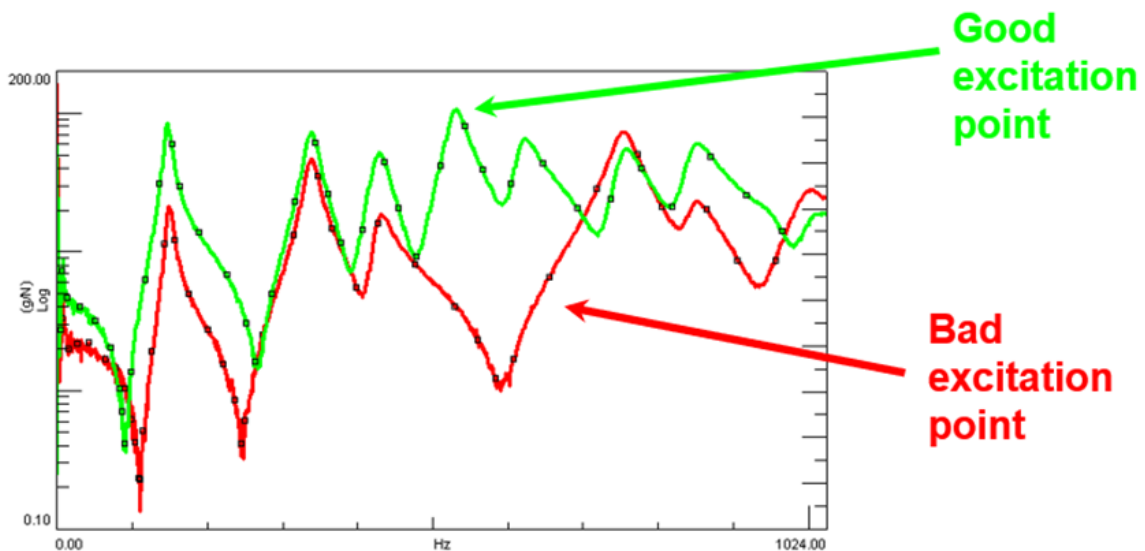


Figura 9, confronto tra diverse scelte di "driving point"

3.2 Applicazione di un input noto

L'applicazione della forza di ingresso può avvenire per mezzo di uno "shaker" (agitatore) o "impact hammer" (martello). Nel primo caso si ha la necessità di un attento posizionamento (e quindi maggior tempo) ma si ha la possibilità di controllare l'intensità della forza e di usare più agitatori contemporaneamente. Nel secondo caso invece basta colpire l'oggetto nei punti scelti; si ha quindi maggior velocità ma minor controllo sull'ingresso della forza. Non esiste un unico martello, ma si hanno varie scelte nelle quali è possibile variare la punta. Ogni punta produce una certa gamma di frequenze, in particolare una rigida, come può esserne una metallica, eccita frequenze più elevate di una morbida. È importante che la punta sia a contatto con l'oggetto per un periodo di tempo ridotto e che ecciti le frequenze di interesse. In caso di disponibilità di più accelerometri, questi possono essere incollati direttamente sui punti designati oppure si dovrà spostare il singolo accelerometro progressivamente punto per punto a ogni prova.

3.3 Risposta in frequenza (FRF)

Ciò che si ottiene da queste prove sono i grafici di risposta in frequenza, spesso abbreviata con la sigla FRF (Frequency Response Function), nei quali nelle ascisse si trovano le frequenze (Hz) e nelle ordinate le ampiezze (g/N). Una FRF, o funzione di trasferimento, è una funzione complessa caratterizzata da un'ampiezza e da una fase calcolabili con le seguenti equazioni:

$$\text{ampiezza} = \sqrt{\text{immaginario}^2 + \text{reale}^2}$$

$$\text{fase} = \tan^{-1}\left(\frac{\text{immaginario}}{\text{reale}}\right)$$

Una delle più importanti proprietà di questa funzione è l'indipendenza dei risultati ottenuti dalla forza usata in input.

3.4 Funzione di coerenza

Simultaneamente alla FRF si deve acquisire anche la funzione di coerenza per monitorare la qualità e la ripetibilità dei risultati, in modo da rieseguire, in caso di bassi valori, il test immediatamente. Questa funzione indica quanta parte del segnale di output è effettivamente dovuta all'input (nel nostro caso la martellata). Il valore di coerenza può variare da zero a uno; i risultati migliori sono quelli con coerenza il più vicino possibile a uno. In caso di risultati di coerenza molto bassi, l'impostazione delle prove deve subire una revisione, poiché i risultati sarebbero di scarsa consistenza. Le principali cause in questo caso potrebbero essere errori di strumentazione, eccitazione incoerente o insufficiente.

3.5 Curvefitting modale e forme modali

Dopo l'acquisizione dei segnali dovuti all'eccitazione del pezzo si devono analizzare i risultati ottenuti. Questo viene fatto con l'ausilio di Testlab, in particolare nella sessione Simcenter Testlab Modal Analysis e finestra "Polymax" (nome dell'algorithmo usato). È possibile fare una somma delle FRF selezionate e impostare la larghezza di banda. Dal processo di curvefitting si otterrà la curva che meglio approssima i dati raccolti, che troveremo nel grafico di stabilizzazione. Le lettere al di sotto della curva si devono prendere come guida per la scelta dei modi (che alla fine spetta esclusivamente all'operatore) poiché esse rappresentano la stabilità delle soluzioni (quelle indicate dalla lettera "s" sono le più stabili). Successivamente, dopo la selezione dei modi, si ha la possibilità di osservare i modi di vibrare, le relative frequenze, la loro geometria e la loro simulazione.

In figura 10 è riportato il diagramma di stabilizzazione di una FRF ottenuto durante le prove effettuate sulle travette di cui si parlerà in seguito.

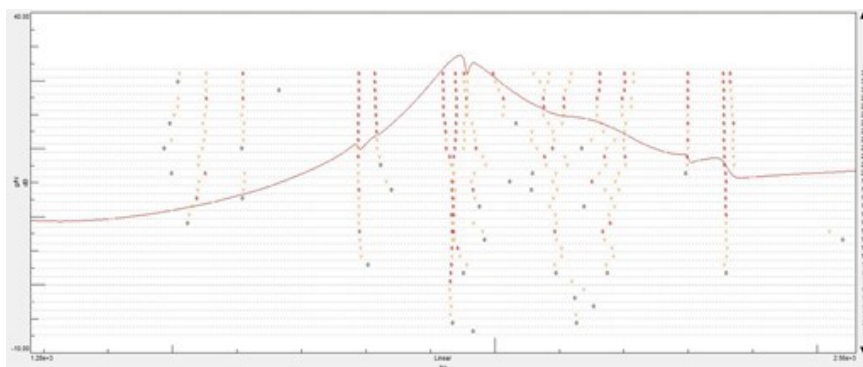


Figura 10, esempio di diagramma di stabilizzazione

4 Applicazione dell'analisi modale allo studio dell'influenza del difetto

4.1 Prove simulate applicate alle ruote

Per lo studio dell'influenza del difetto sono state eseguite prove sia simulate che sperimentali. Per quanto riguarda le simulazioni queste sono state eseguite tramite il software COMSOL Multiphysics. Come parametri per il materiale sono stati usati quelli che meglio riproducevano le caratteristiche della resina utilizzata per lo stampaggio delle ruote (visibili nella tabella 4).

E [GPa]	2.8
G [GPa]	2.2
$\rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$	1150

Tabella 4, parametri usati per simulazioni

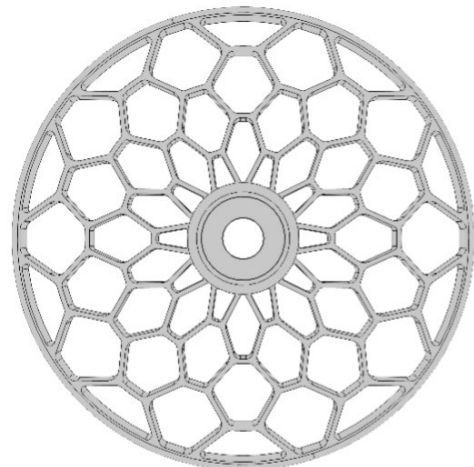


Figura 11, modello usato per simulazioni

Il modulo di Young è stato ricavato confrontando i modi simulati con più valori di rigidità e i modi ottenuti dalle prove sperimentali. In particolare sono stati fatti dei grafici in cui nelle ascisse sono rappresentate le frequenze relative ai picchi di risonanza (modi) simulati con modulo di Young che assume valori compresi tra 2.70 [GPa] e 2.90 [GPa] a intervalli di 0.01 [GPa] e nelle ordinate quelle relative ai modi sperimentali. Il modulo di Young che meglio approssimava quello della resina è 2.80 [GPa] che appunto è stato usato poi nelle simulazioni del quale viene riportato il grafico.

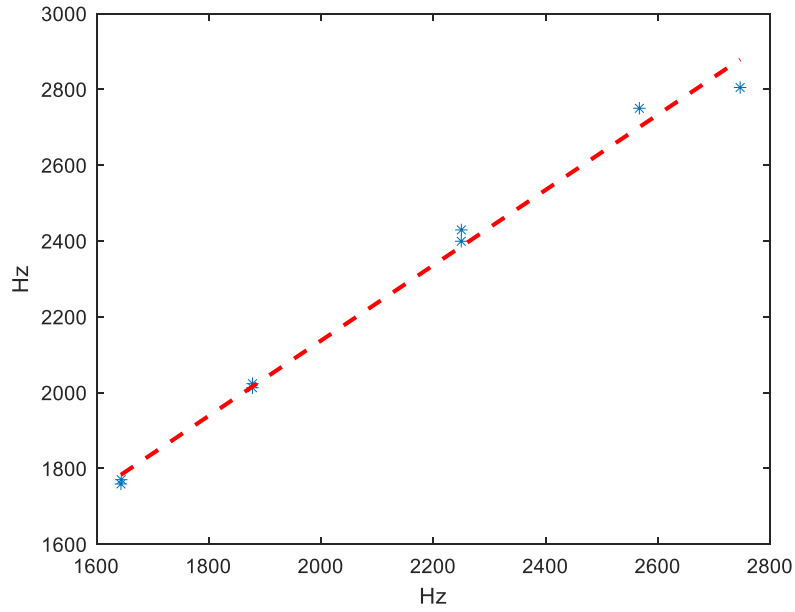


Figura 12, modi sperimentali e simulati con E pari a 2.80 GPa

Le simulazioni sono state fatte per la ruota priva di difetto, per la ruota con dieci tipi diversi di difetti (cinque in direzione radiale e cinque in direzione circonferenziale) e per ogni difetto sono state simulate tre entità di profondità ($\frac{1}{3}$ dello spessore della ruota, $\frac{2}{3}$ e passante).

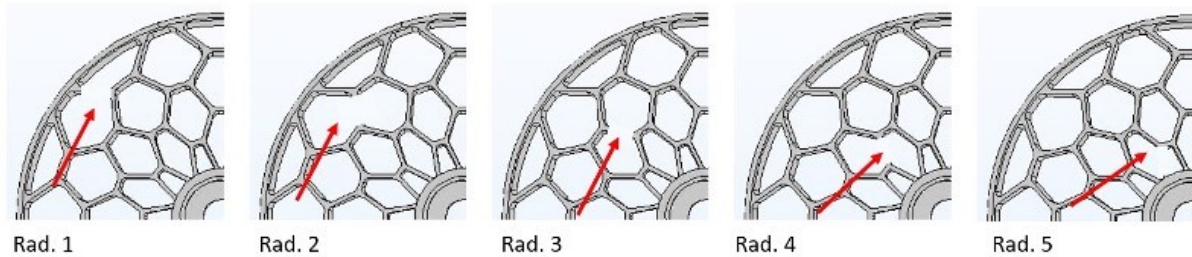


Figura 13, difetti in direzione radiale per simulazioni

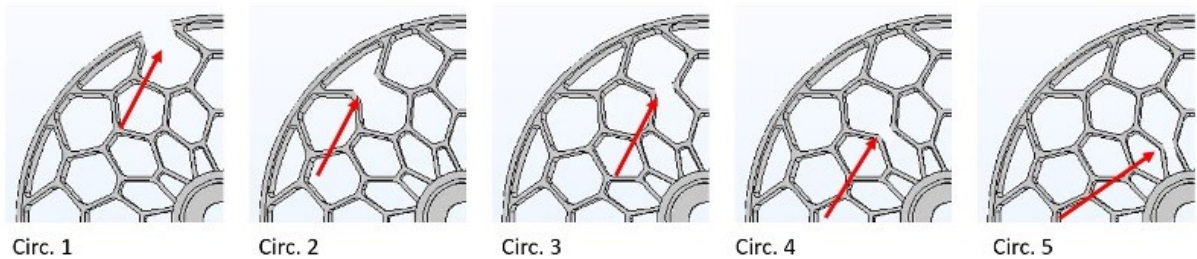


Figura 14, difetti in direzione circonferenziale per simulazioni

4.1.1 Risultati delle prove simulate

Sono riportati come esempio i primi tre modi ottenuti per la ruota senza difetto, con difetto passante di tipo circonferenziale 1 e 2 e le rispettive frequenze relative a tali modi.

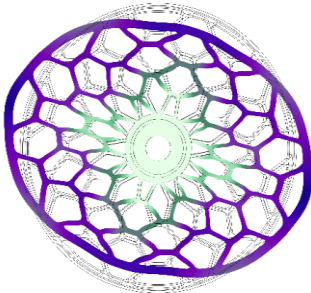
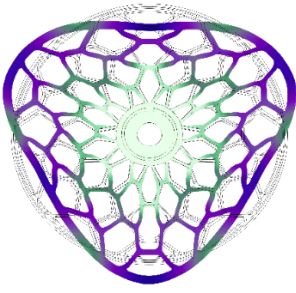
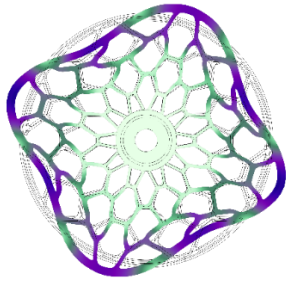
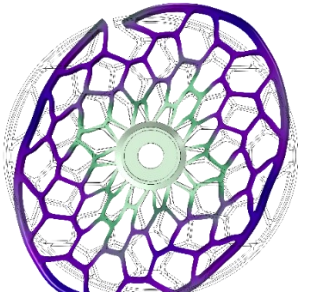
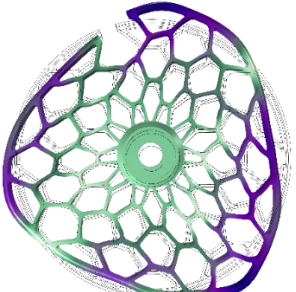
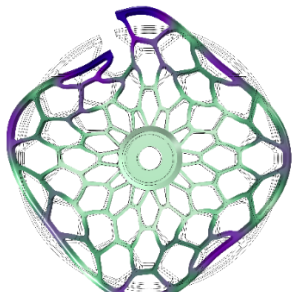
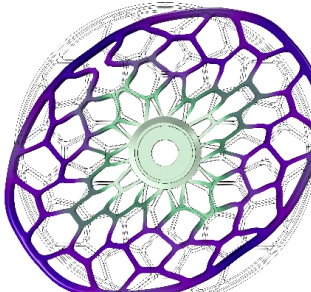
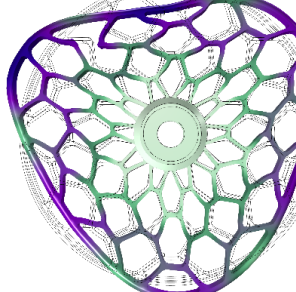
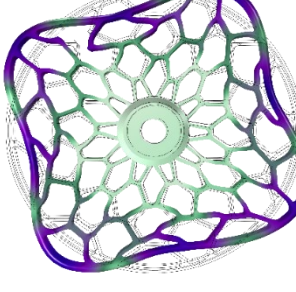
	Primo modo	Secondo modo	Terzo modo
No difetto	 <p>Autofrequenza: 1635.4 Hz</p>	 <p>Autofrequenza: 1869.6 Hz</p>	 <p>Autofrequenza: 2246.8 Hz</p>
Difetto circ. 1	 <p>Autofrequenza: 1629.4 Hz</p>	 <p>Autofrequenza: 1860.6 Hz</p>	 <p>Autofrequenza: 2158.3 Hz</p>
Difetto circ. 2	 <p>Autofrequenza: 1736.9 Hz</p>	 <p>Autofrequenza: 1959.2 Hz</p>	 <p>Autofrequenza: 2313.7 Hz</p>

Tabella 5, esempi di modi ottenuti tramite simulazioni

4 Applicazione dell'analisi modale allo studio dell'influenza del difetto

Le frequenze relative ai modi di vibrare ottenuti per la ruota con o senza difetto e per le diverse profondità sono riepilogate nelle seguenti tabelle:

DIF.	EIGENFREQUENCY															
	no dif.	circ. 1			circ. 2			circ. 3			circ. 4			circ.5		
PROF.	/	1/3	2/3	1	1/3	2/3	1	1/3	2/3	1	1/3	2/3	1	1/3	2/3	1
1286.8	1271.4	1236.1	1110.5	1356.3	1350.7	1339.8	1284.7	1282.1	1276.4	1283.1	1277.6	1268.4	1354.3	1349.5	1342.5	
1286.8	1281.8	1269.2	1210	1360.9	1361.1	1360.7	1285.1	1282.7	1277.4	1284.4	1281	1274.8	1357.3	1356.4	1354.1	
1635.4	1636.3	1635.5	1562.9	1744.3	1742.8	1736.9	1635.1	1632.9	1624.7	1631.9	1623.8	1601.5	1734.1	1715	1678.4	
1635.6	1637.9	1636.4	1629.4	1745.2	1746.1	1745.9	1635.4	1634.2	1630.9	1634.2	1632.9	1631.3	1741.7	1738.3	1731.8	
1869.6	1870.2	1869.8	1856.4	1995.1	1985.8	1959.2	1862.7	1848.5	1815.3	1865.4	1854.5	1828.3	1995.5	1988.4	1971	
1869.6	1874	1878.9	1860.6	2000.4	2001.9	2003.3	1868.4	1863.5	1852.2	1865.7	1857.9	1840.6	1996.6	1993	1987.1	
2246.7	2245.5	2237.8	1862.9	2388.5	2366.1	2313.7	2240.7	2224.3	2189.3	2242.7	2232	2212.5	2398.2	2397.3	2395.3	
2246.8	2251.5	2240.4	1892.6	2398.8	2397.8	2393.6	2241.7	2229	2204.1	2246.2	2245.2	2242.3	2398.6	2398.7	2398.5	
2246.8	2470.1	2257.4	2158.3	2626	2602.1	2551.9	2499.7	2476.3	2451.7	2497.1	2485.3	2457.8	2622.1	2599.7	2562.1	
2246.8	2505.5	2500.1	2260.8	2635.4	2635.3	2632.9	2501.6	2497.8	2489.1	2502.5	2497.5	2485.5	2634.6	2634	2607.8	
2246.8	2574.2	2544.4	2301	2682.6	2680.1	2667.6	2575.9	2573.9	2509.9	2576.4	2570.7	2494.2	2658.1	2636.1	2634.5	
2246.8	2579.5	2550.9	2420.3	2741.4	2737.6	2731.9	2645.9	2602.5	2570.2	2634.9	2584.6	2573.7	2743.4	2743.4	2743.2	
2246.8	2629.9	2576.9	2536	2792.4	2780.8	2759.3	2646.7	2645.2	2640.5	2647.2	2645.8	2643	2799.4	2799	2798.3	
2246.8	2677.9	2686.3	2696.3	2801.1	2802.1	2803	2648.8	2648.4	2648.5	2648.4	2648.3	2648.2	2799.5	2799.1	2798.5	
2246.8	2746.3	2748.6	2745.2	2916.1	2888.3	2824.6	2736.1	2724.7	2680.5	2742.3	2741.8	2740.8	2928.4	2927.6	2922.6	
2246.8	3102.2	3078.7	2882.4	3302.7	3280.7	3231.1	3102.5	3090.5	3068.7	3106.5	3103.8	3091	3310.5	3309.3	3306.6	
2246.8	3106.6	3098.2	3046.2	3306.4	3297.6	3281.4	3107.2	3106.3	3102.2	3107.3	3106.6	3104.3	3311.3	3311.2	3310.2	
2246.8	3350.3	3343.7	3239.8	3554.6	3513.1	3465.2	3327.4	3283.5	3193.9	3340.4	3317.1	3256.6	3577.7	3569	3550.5	
2246.8	3594.6	3566.5	3275.5	3833.5	3827	3816	3602.5	3596.2	3583.2	3600.8	3595.7	3566.2	3835.1	3826.1	3772.3	
2246.8	3596.9	3566.6	3280.9	3836.9	3834	3829.3	3603.3	3603.4	3603.5	3601.8	3596.5	3588.3	3837.7	3836.9	3835.2	
2246.8	3999	3818.8	3434.6	4274.4	4257.8	4101.6	4014.3	4005.1	3916.1	4017.3	4015	3999.8	4272.8	4258.6	4191.2	
2246.8	4012.5	3973.9	3582.2	4278.6	4276.2	4270	4017.1	4006.8	3986.7	4018.6	4019.2	4016.9	4276.9	4268.7	4225.3	
2246.8	4173.8	3977.3	3808.3	4560.7	4503.3	4319.3	4249.7	4198.7	3987.6	4250.1	4249.9	4208.7	4567.6	4567.5	4415.2	
2246.8	4216.5	4083	3893	4566.8	4542.6	4474.9	4249.9	4247.4	4226	4250.3	4250.1	4227.4	4567.8	4567.7	4567.4	

Tabella 6, frequenze relative ai modi nelle differenti casistiche (prima parte)

DIF.	EIGENFREQUENCY															
	no dif	rad. 1			rad. 2			rad. 3			rad.4			rad.5		
PROF.	/	1/3	2/3	1	1/3	2/3	1	1/3	2/3	1	1/3	2/3	1	1/3	2/3	1
1286.8	1357	1354.2	1350.5	1282.3	1275.8	1262.6	1279.9	1270.9	1256.6	1350.5	1342.8	1333	1277.9	1274.3	1267.9	
1286.8	1358.9	1357.4	1353.9	1285.9	1284.9	1283.2	1285.9	1284.8	1282.8	1358.9	1356.7	1353.9	1285.3	1284.9	1283.6	
1635.4	1737.1	1714.4	1636.1	1624.5	1594	1524.1	1623.5	1598.2	1550.1	1736.4	1723.1	1700.9	1627.9	1614.8	1589.6	
1635.6	1745.2	1745.4	1744.5	1637.2	1639	1640.6	1635.3	1632.7	1624	1741.1	1732.4	1711.6	1634.2	1631.9	1627.7	
1869.6	1994	1978.9	1944.9	1858.2	1838	1806.9	1856.5	1837.8	1810.9	1991.7	1981.1	1965.7	1867.3	1864.3	1859.9	
1869.6	1999.8	1999.3	1996.3	1869	1863.4	1848.5	1868	1862.3	1850.4	1997.9	1994.9	1989	1869.3	1868.8	1867.8	
2246.7	2388.8	2361	2286.2	2230.7	2203.9	2164.1	2235.1	2219.2	2198.4	2395.8	2391.3	2384.8	2246.2	2245.3	2243.9	
2246.8	2398.8	2392.9	2369.3	2244.7	2233	2202	2245.7	2242.9	2236.4	2398.6	2398.3	2397.6	2246.7	2246.8	2246.8	
2503	2609.2	2553.3	2484.2	2484	2433.1	2384.6	2493.1	2460.7	2425.9	2624.9	2597	2583.7	2495.4	2480.9	2455.7	
2503.1	2636	2635.3	2630.8	2504.6	2506.4	2507.9	2500.8	2495.5	2488.7	2631.9	2626.4	2597.8	2504.3	2505.1	2505.2	
2577.1	2684	2671.8	2637.3	2573.5	2569.6	2518.4	2573.9	2570.6	2519.2	2658.3	2651.8	2620.4	2576.4	2575.4	2574.2	
2648.2	2732.7	2718.1	2697.5	2644.7	2622.5	2566.2	2638	2602.6	2567.8	2742.6	2740.9	2737.7	2642	2636.9	2618.4	
2648.4	2792.2	2784.1	2773.9	2646.3	2643.3	2633.5	2647.6	2647.2	2646.2	2798	2796.4	2794.8	2647.8	2647.5	2647	
2673.3	2795.4	2794.3	2788.2	2658.5	2645.7	2644.7	2651.2	2649.1	2648.2	2799.7	2799.2	2798.4	2657	2654.7	2652.1	
2742.6	2929.8	2925.1	2914.9	2727.5	2704.5	2657.2	2739.1	2735.4	2731.4	2927.7	2925.2	2918.9	2742.2	2741.5	2739.2	
3107.5	3297.6	3274.7	3239.5	3093.6	3074	3045.6	3103.2	3094.4	3070.2	3309.2	3304.5	3295.3	3105.6	3102.7	3098.3	
3107.6	3313.7	3310	3292.9	3106.2	3103.3	3097.7	3106.8	3105.1	3101.7	3311	3310.3	3308.8	3107.4	3107.3	3107	
3350.4	3576.6	3560	3511.7	3339	3312.8	3269.8	3343.5	3319.4	3258.6	3580.3	3570.4	3537.1	3350.9	3349	3339.4	
3602.9	3820	3789.7	3749.4	3596.5	3584.6	3570.7	3599	3586.9	3569.7	3832.4	3822.9	3808	3602	3599.1	3591	
3603.3	3841.6	3844	3842.4	3602.4	3600.4	3596.8	3602.8	3602.1	3600.9	3837.7	3836	3831.7	3602.7	3602.1	3601.4	
4017.2	4257.8	4208.3	4048.9	4009.4	3965.3	3917.3	4016.3	4012.7	4008.7	4274.7	4265.4	4246.1	4011.1	3993.4	3933	
4017.6	4279	4273.1	4105.8	4019.3	4020.9	3943.9	4017.8	4017.4	4016.5	4280.3	4280.7	4281.2	4016.7	4015.9	4014.6	
4250.2	4544.3	4498.7	4231.9	4240.1	4206.5	4022.4	4248.4	4242.6	4198.1	4567.1	4565.6	4561.8	4250.1	4250	4249.9	
4250.5	4560.7	4526.2	4339.6	4249.4	4248.7	4184.1	4250.5	4250.5	4250.4	4567.6	4567.3	4567.2	4250.2	4250.2	4250.2	

Tabella 7, frequenze relative ai modi nelle differenti casistiche (seconda parte)

4.2 Prove sperimentali applicate alle ruote

Le prove sperimentali che si sono eseguite sulle ruote sono delle prove di “impact hammer” che verranno descritte nei prossimi paragrafi.

4.2.1 Setup delle prove

Per le prove sono stati utilizzati diversi strumenti, tra cui:

- accelerometro miniaturizzato PCB mono assiale di sensibilità $5,39 \frac{mV}{g}$;
- componente hardware di acquisizione SCADAS XS, il software di acquisizione Simcenter Testlab;
- martello di sensibilità $19,5 \frac{mV}{N}$.

Ai canali d'ingresso dello Scadas, rispettivamente “input1” e “input2” sono collegati l'uscita del martello (per la misura della forza) e l'uscita dell'accelerometro incollato alle ruote. Lo Scadas a sua volta è collegato al PC tramite cavo ethernet. Nel PC è stato aperto Testlab per l'analisi dei risultati tramite l'algoritmo Polymax (come descritto nei paragrafi precedenti). Il sistema analizza i risultati nel dominio della frequenza, grazie alla trasformata di Fourier, e ciò avviene convertendo il segnale da analogico a digitale.

I risultati ottenuti sono stati esportati ed elaborati successivamente anche in Matlab.

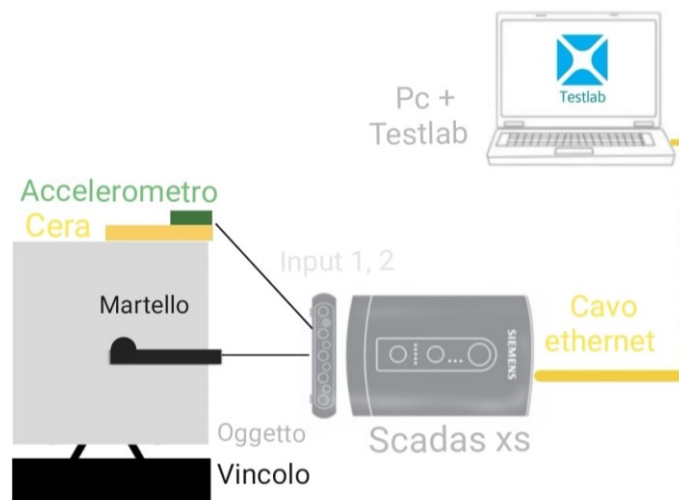


Figura 15, schema setup usato per le prove

4.2.2 Esecuzione delle prove: vincolo, geometria e condizioni

Le prove sono state eseguite appoggiando le ruote su uno strato di gomma piuma, rappresentante il nostro vincolo di tipo “free” e su di esse è stato incollato l'accelerometro mediante cera d'api. Essendo stato utilizzato un solo accelerometro, la sua posizione veniva variata punto per punto a ogni prova per tutti i punti di misura (rowing accelerometer). I punti di misura sono trenta, tutti sul battistrada, equidistanti l'uno dall'altro, e quindi inclinati tutti dello stesso angolo (12°), che, insieme a un'adeguata scelta del “driving point” e a un'adeguata eccitazione permettono di studiare le risposte in frequenza dell'intera geometria (FRF somma). La struttura è stata eccitata tramite colpi di martello conferiti nel driving point (primo punto di misura). Per ogni punto di misura, dopo aver variato la posizione dell'accelerometro e colpito il driving point con varie martellate, è stata calcolata la media solo dei cinque risultati che mostravano una coerenza più vicina possibile a uno (qualità migliore). I cavi dell'accelerometro al fine di evitare eventuali interferenze di misura sono stati fissati tramite nastro adesivo al banco di prova.

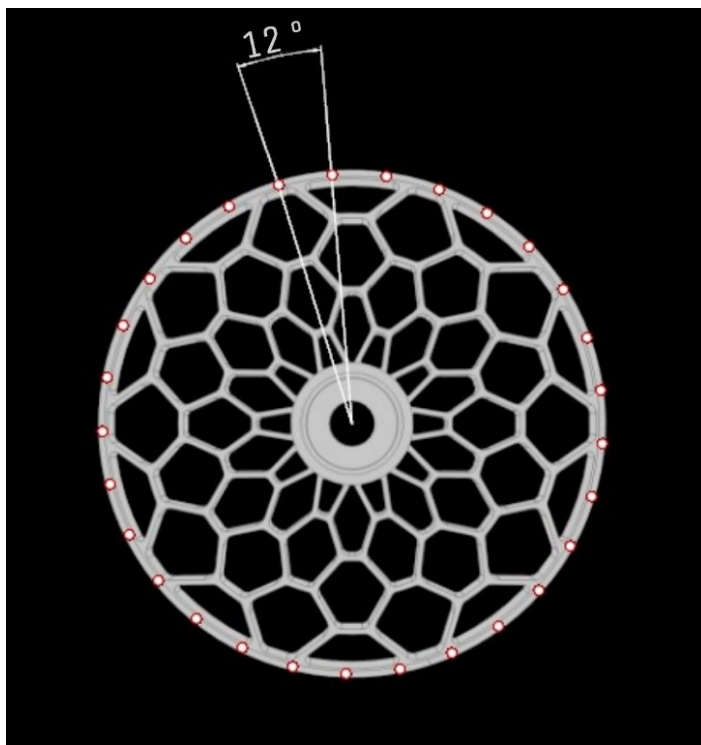


Figura 16, file CAD punti di misura ruota

Le prove sono state effettuate su una delle ruote stampate (ruota 3) in tre condizioni:

Numero condizione	Ruota/e usata/e nella prova	Difetto	Temperatura [C]	Umidità [%]
1	3 1 2	No	Ambiente	Ambiente
2	3	A metà raggio	Ambiente	Ambiente
3	3	Passante	Ambiente	Ambiente

Tabella 8, condizioni svolgimento prove (prima parte)

La prova per la condizione 1, ruota 3 priva di difetto, è stata eseguita insieme alle prove sulle altre due ruote stampate, in modo da poterne fare un confronto sugli effetti dello stampaggio, riportato successivamente (paragrafo 5.2).

4.2.3 Risultati delle prove sperimentali

In seguito sono riportate le risposte in frequenza ottenute per la ruota 3 nelle quali è possibile osservare gli effetti dovuti alla presenza o meno del difetto e della sua profondità.

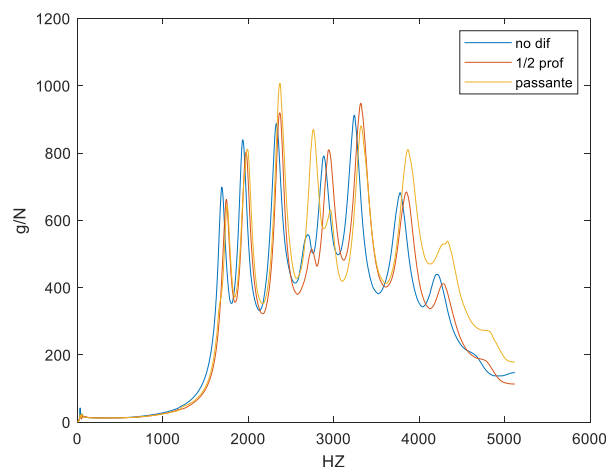


Figura 17, FRF ruota 3 in condizione 1,2 e 3

Come previsto, la presenza del difetto va a modificare la risposta in frequenza che si ottiene andando a eccitare il pezzo e l'entità di tale variazione sembra aumentare quando si passa da una profondità del

difetto limitata a difetto passante. Inoltre il difetto sembra provocare un'allineamento dei modi di vibrare del pezzo.

Lo svolgimento di queste prove e il seguente confronto con quelle svolte in precedenza (circa sette mesi prima, agosto 2020-marzo 2021) hanno mostrato ulteriori shift delle FRF di entità tutt'altro che trascurabile e non attribuibili al difetto. Nelle figure 18 e 19 si notano infatti queste variazioni per le ruote prive di difetto.

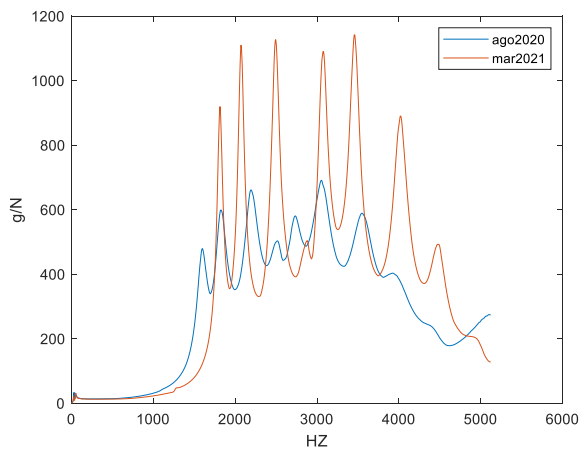


Figura 18, confronto prove su ruota 1 (agosto 2020-marzo 2021)

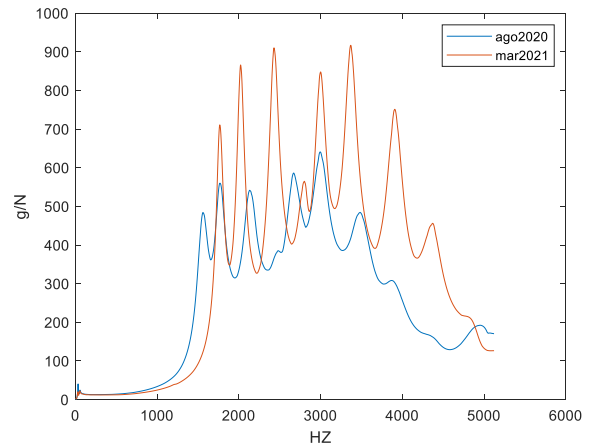


Figura 19, confronto prove su ruota 2 (agosto 2020-marzo 2021)

Queste variazioni di centinaia di Hertz possono essere il risultato di invecchiamento del materiale e dell'azione di alcuni agenti ambientali come umidità e temperatura (è da escludere invece l'azione dei raggi UV perché i pezzi sono stati conservati all'interno di un armadietto, non esposti a tale radiazione). Oltre all'analisi degli effetti dovuti al difetto, perciò si è proseguito con gli studi su questi fattori che verranno descritti nei prossimi capitoli.

5 Analisi dell'influenza di altri fattori sul comportamento dinamico del pezzo

5.1 Influenza dell'invecchiamento del materiale

L'obiettivo delle prossime prove è quello di studiare l'invecchiamento del materiale.

Questo studio è stato svolto su dei campioni, due travette, lasciate libere di invecchiare in condizioni ambientali.

Si sono eseguite prove sul pezzo appena stampato e costantemente altre prove a cadenza settimanale, in modo da poterne valutare variazioni comportamentali dovute all'invecchiamento, per un periodo di circa due mesi.

5.1.1 Esecuzione delle prove sperimentali sulle travette: setup, geometria, vincolo e intervalli temporali

Il setup usato per le prove delle travette è lo stesso usato per le prove eseguite sulle ruote ed è quindi già descritto nel paragrafo 4.2.1. Ciò che differisce dalle prove precedenti è il tipo di vincolo e alcuni punti dell'esecuzione delle prove di cui si parlerà nel paragrafo seguente. Le prove delle travette hanno esattamente stessa strumentazione e impostazione delle precedenti svolte sulle ruote, l'unica differenza è rappresentata dal sistema di fissaggio (vincolo). Le travette sono state fissate tra due piastre in ferro collegate tra loro tramite due viti e dadi, come visibile in figura 21. Il serraggio è stato eseguito senza chiave dinamometrica, ma sempre dallo stesso operatore, quindi, a meno di incertezze dovute all'azione umana, può essere ritenuto lo stesso per tutte le prove. I punti di misura sono punti sulla superficie frontale, equidistanti tra loro e divisi in tre colonne, da 15 punti ognuna, anch'esse equidistanti. Le impostazioni, il setup, il modo di input della forza (martellate nel driving point e "rowing accelerometer") e il percorso del segnale, sono gli stessi della prova precedente. Le prove sulle travette sono state fatte tutte in condizioni ambientali, in quanto l'obiettivo dello studio su questi campioni è prettamente l'analisi dell'invecchiamento del materiale.



Figura 20, file CAD punti misura travette

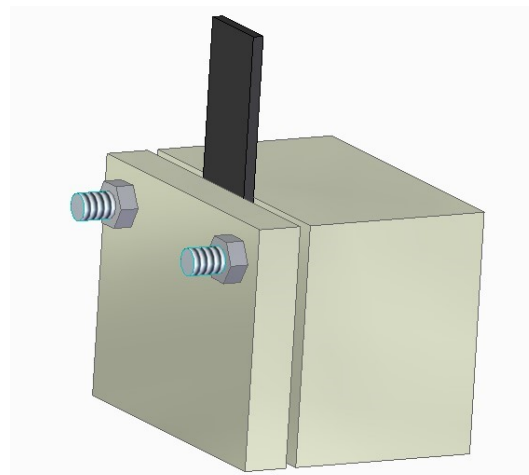


Figura 21, riproduzione su CAD setup per misura

In seguito sono riportate le date in cui sono state eseguite le prove, identiche per entrambe le travette.

Numero condizione	Data	Delta di tempo trascorso dall'ultima prova
1	13 maggio 2021	/
2	21 maggio 2021	8 giorni
3	28 maggio 2021	7 giorni
4	04 giugno 2021	7 giorni
5	11 giugno 2021	7 giorni
6	18 giugno 2021	7 giorni
7	25 giugno 2021	7 giorni
8	02 luglio 2021	7 giorni
9	09 luglio 2021	7 giorni
10	16 luglio 2021	7 giorni

Tabella 9, data delle prove per invecchiamento materiale sulle travette

5.1.2 Risultati delle prove sperimentali

Sono riportate di seguito le FRF ottenute per la travetta 1 dalle prove svolte periodicamente dallo stampaggio in poi.

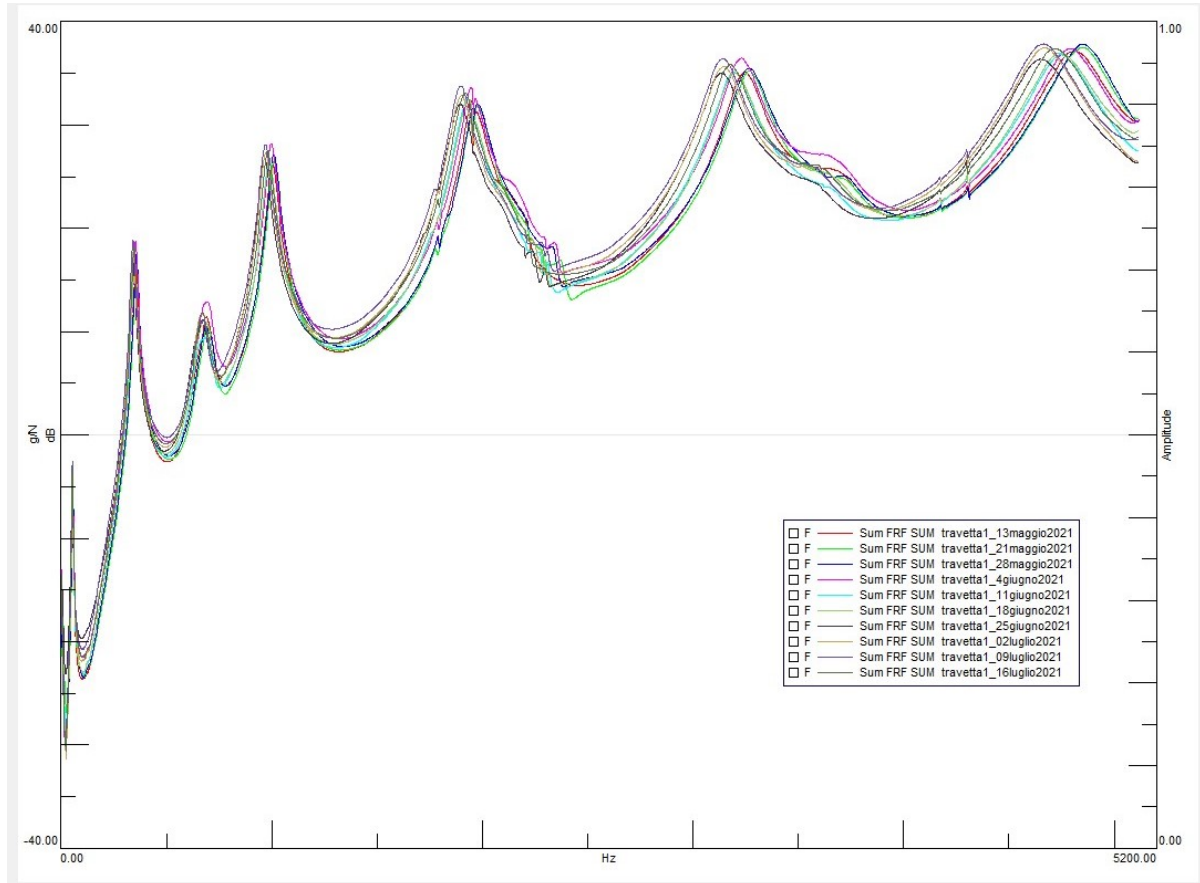


Figura 22, FRF somma travetta 1 dopo vari intervalli temporali

Come visibile dai grafici sopra riportati, dopo all'incirca due mesi (data prima prova: 13 maggio 2021 – data ultima prova: 16 luglio 2021), il comportamento di entrambe le travette e perciò le proprietà del materiale, non sembrano essersi stabilizzate. Le FRF infatti continuano ad avere piccoli “shift” di prova in prova senza tendere però a una direzione precisa. Non si è potuto ricavare informazioni sul tempo necessario per l'invecchiamento del materiale tale da permettere di raggiungere un “plateau” prestazionale. È comunque di notevole importanza mettere in luce che questi tipi di materiali hanno bisogno di tempo prima di stabilizzarsi e che questo processo non avviene progressivamente verso l'equilibrio. Non sono riportate le FRF ottenute per la travetta 2 in quanto mostrerebbero gli stessi risultati della travetta 1 che perciò confermano la modalità di stabilizzazione del materiale appena discussa.

5.2 Influenza dello stampaggio

Uno dei punti della stereolitografia, e in genere dell'AM, è proprio l'elevata precisione. In generale una bassa variazione dimensionale tra stessi pezzi prodotti, è ottenibile con processi automatizzati, che sono limitati nella personalizzazione. Al contrario processi manuali, ormai obsoleti per la maggior parte delle richieste attuali, permettono grande personalizzazione ma non garantiscono la ripetibilità del pezzo. Troveremo cioè variazioni sia in positivo (molto vicine alle dimensioni progettuali) ma anche in negativo (misure reali che si discostano di molto da quelle nominali). L'AM permette di risolvere questo problema, garantendo elevata precisione e allo stesso tempo elevata personalizzazione. Come si può vedere nel nostro caso, per la produzione di ruote e travette personalizzate è stata sufficiente la creazione di un file CAD e l'avvio della stampa, senza avere dirette conseguenze sull'accuratezza del prodotto, anzi, ottenendo risultati migliori di molte altre tecnologie. Sono state confrontate le misure nominali del file CAD e le misure reali dei pezzi stampati e, come si potrà vedere, si è avuta una conferma sul potenziale della produzione additiva.

Le analisi sono state fatte sulle tre ruote, stampate a partire dallo stesso file CAD e con le stesse condizioni e gli stessi parametri, perciò, eventuali variazioni sono da attribuite solamente allo stampaggio. Sono stati confrontati i valori misurati:

- lungo l'asse z (perpendicolare al raggio delle ruote);
- dello spessore del battistrada;
- delle circonferenze interne ed esterne.

Nel primo caso si sono ottenuti i seguenti risultati:

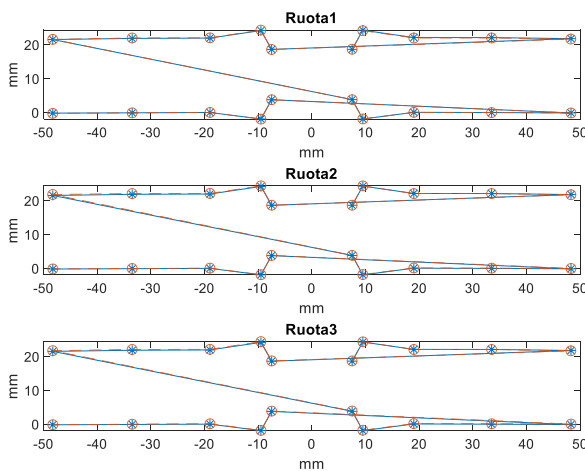


Figura 23, confronto punti del raggio delle ruote stampate (a)

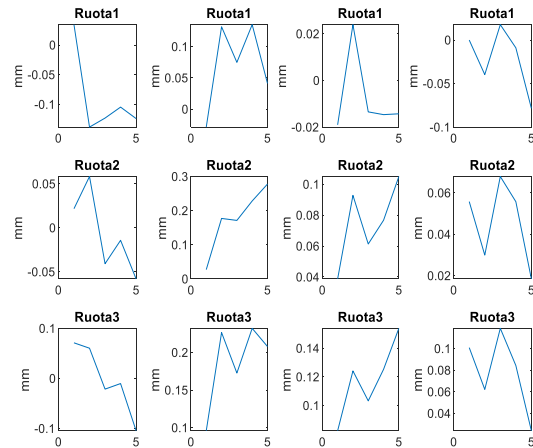


Figura 24, confronto punti del raggio delle ruote stampate (b)

Nei grafici di figura 24 sono riportate in ascissa i cinque punti di misura presi lungo un raggio delle tre ruote.

Per quanto riguarda le variazioni dello spessore sono state considerate venti coppie di punti di misura tutte sul battistrada ed equidistanti tra loro, come si può osservare dalla figura 25.

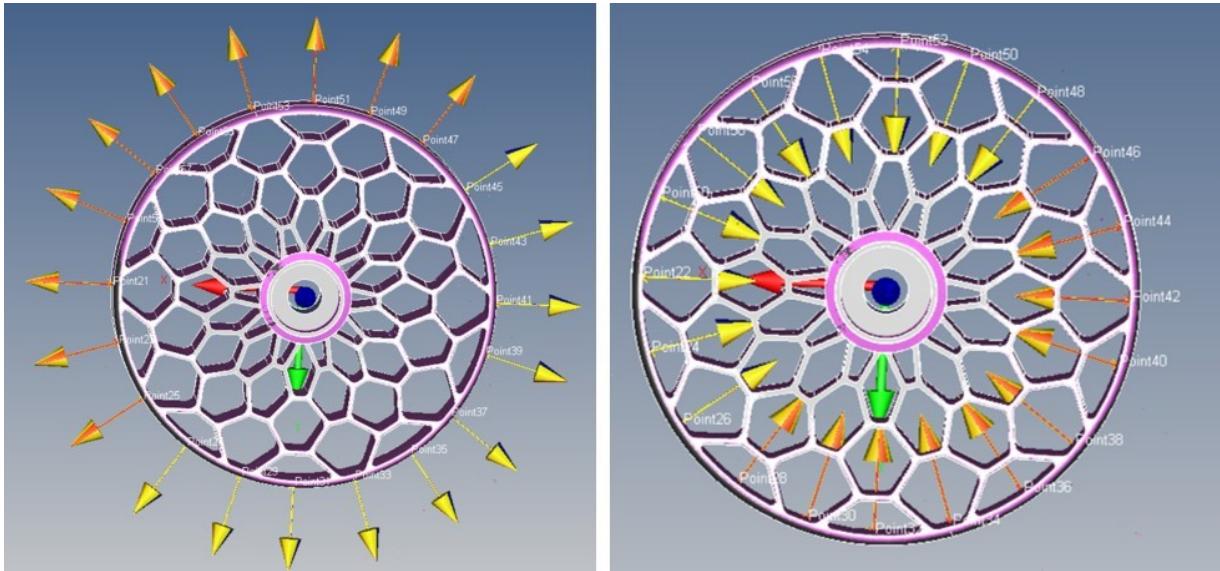


Figura 25, punti di misura per spessore delle ruote

Da queste si sono ottenute le variazioni dello spessore per le tre ruote visibili nel grafico di figura 26.

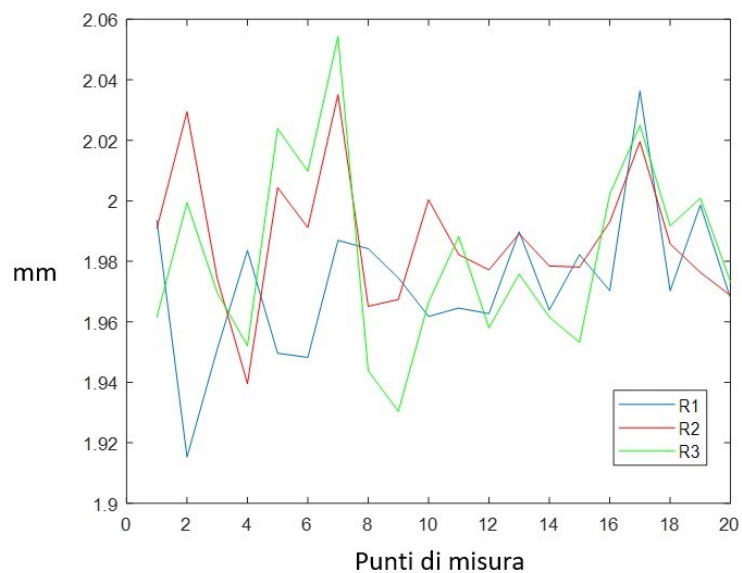


Figura 26, confronto spessore ruote

Si è calcolato poi lo spessore medio per ogni ruota e la relativa deviazione standard:

	Spessore medio [mm]	Deviazione standard
Ruota 1	1.972754	0.024382
Ruota2	1.987302	0.022629
Ruota 3	1.982050	0.031258

Tabella 10, dati variazione spessore delle ruote

Nel terzo caso sono stati confrontati direttamente i valori misurati della circonferenza esterna (indicati con il colore blu) e interna (indicati con il colore rosso) di ogni ruota stampata con i valori del file CAD (indicati con il colore nero).

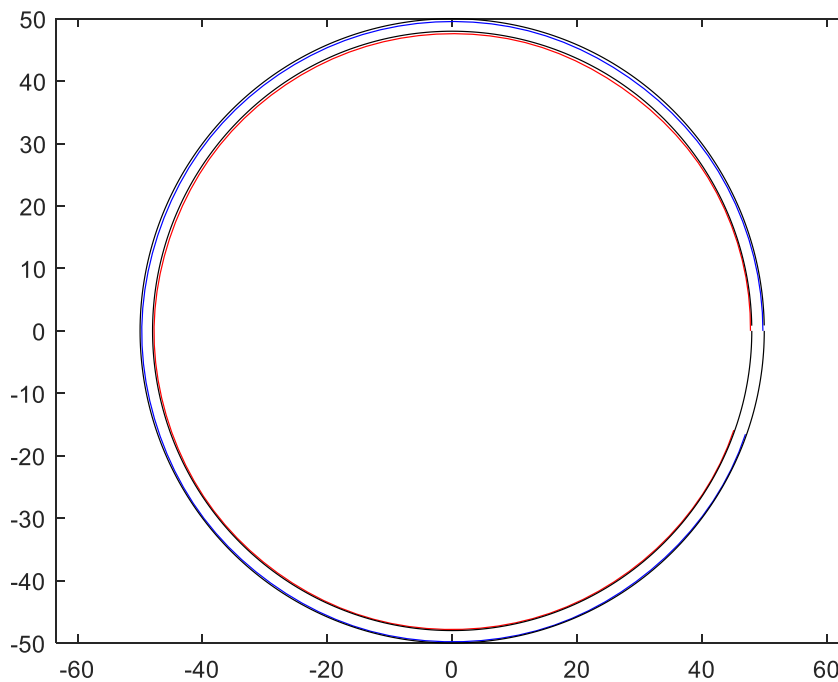


Figura 27, variazione circonferenze interne ed esterne per la ruota 1

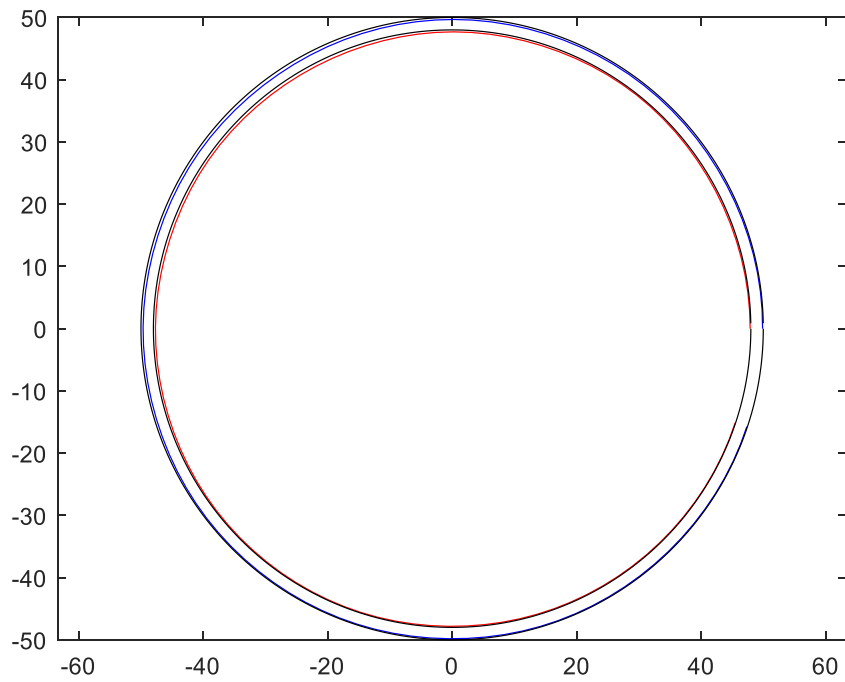


Figura 28, variazione circonferenze interne ed esterne per la ruota 2

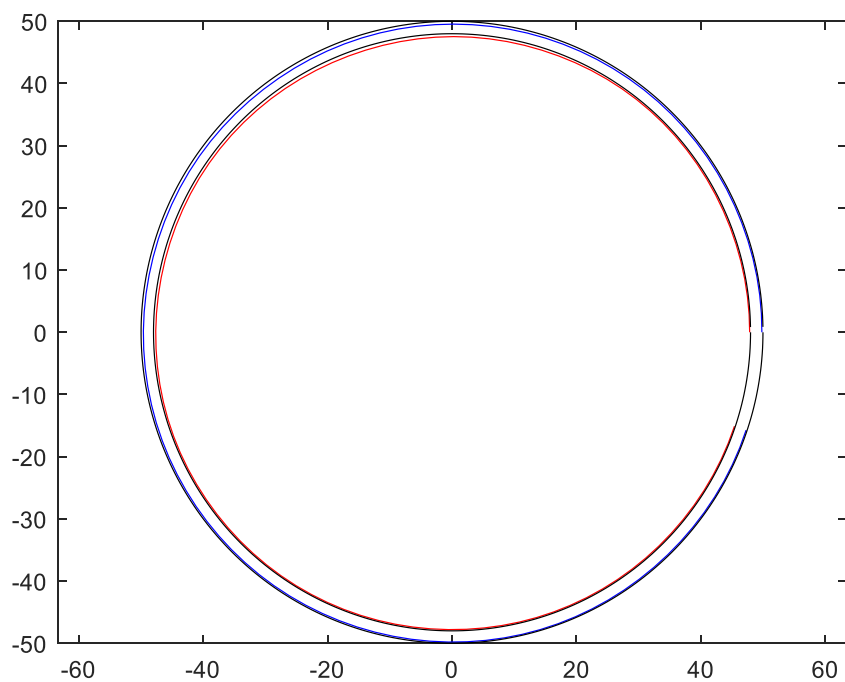


Figura 29, variazione circonferenze interne ed esterne per la ruota 3

I risultati ottenuti confermano la grande accuratezza della fabbricazione additiva. I discostamenti tra dimensioni nominali e dimensioni reali rientrano nell'incertezza della tomografia. È possibile, perciò, ritenere che il processo sia estremamente ripetibile e che eventuali variazioni dimensionali siano talmente piccole da avere effetti trascurabili sul comportamento del pezzo.

5.3 Influenza delle condizioni ambientali

Per la valutazione degli effetti che le condizioni ambientali producono sul materiale e sul suo comportamento dinamico si sono eseguite altre prove come quelle descritte al paragrafo 4.2.1 e 4.2.2, con stesse impostazioni e modalità, sulle ruote prive di difetti (ruota 1 e 2). Prima dell'esecuzione di ogni prova le ruote sono state sottoposte a cicli in camera climatica di almeno 48 h, nelle quali sono stati variati valori di umidità e temperatura, ottenendo le 9 condizioni descritte in tabella 11. Inoltre a ogni prova sono stati misurati i valori delle masse di entrambe le ruote. In seguito, saranno riportate le FRF di tutte e due le ruote per ogni condizione ambientale, l'andamento delle masse e delle frequenze relative ai primi quattro picchi di risonanza delle FRF al variare di temperatura e umidità.

Numero condizione	Ruota/e usate nella prova	Difetto	Temperatura [C]	Umidità [%]
4	1,2	No	10	50
5	1,2	No	10	70
6	1,2	No	10	90
7	1,2	No	20	50
8	1,2	No	20	70
9	1,2	No	20	90
10	1,2	No	30	50
11	1,2	No	30	70
12	1,2	No	30	90

Tabella 11, condizioni svolgimento prove (seconda parte)

5.3.1 Effetti dell'umidità sul comportamento delle ruote

5.3.1.1 Analisi degli effetti dell'umidità sulla ruota 1

Di seguito sono riportate le variazioni delle FRF che si sono ottenute per la ruota 1 per i tre valori di temperatura, mantenuta costante, al variare dell'umidità (condizioni 4-12).

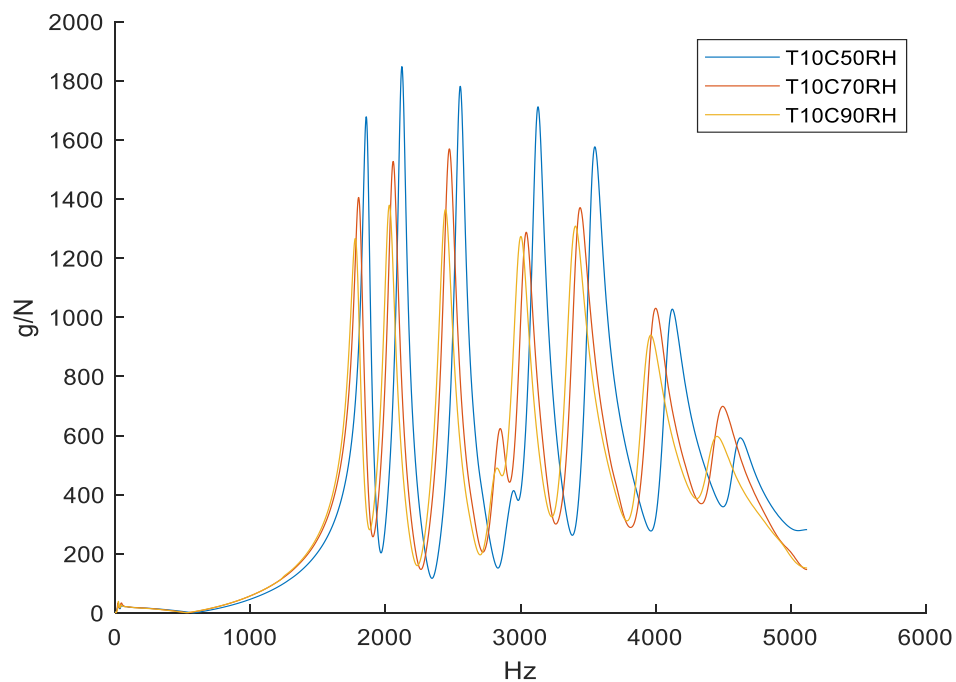


Figura 30, FRF della ruota 1 con temperatura pari a 10 C e umidità variata a 50 % (condizione 4), 70 % (condizione 5) e 90 % (condizione 6)

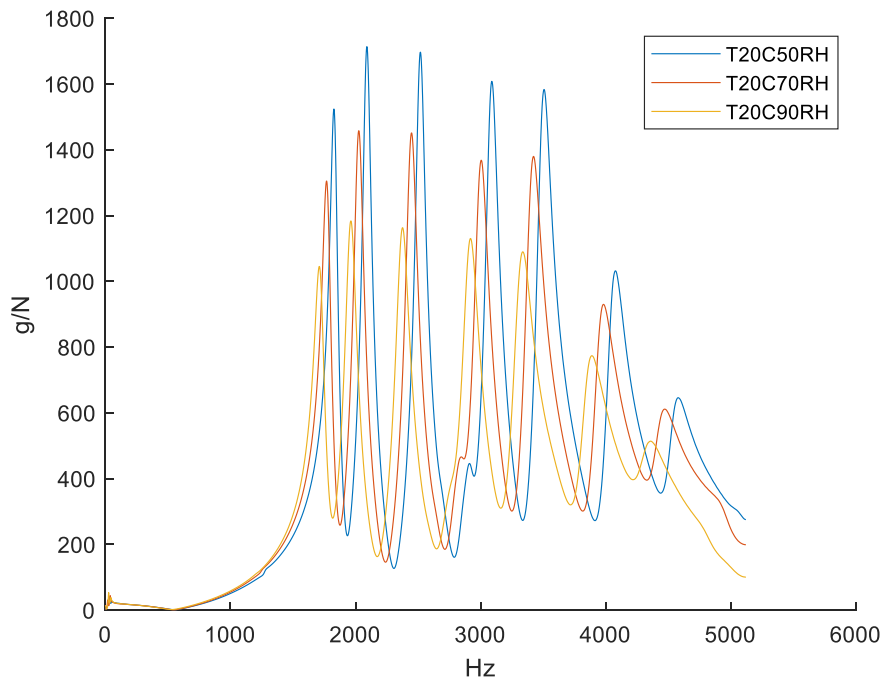


Figura 31, FRF della ruota 1 con temperatura pari a 20 C e umidità variata a 50 % (condizione 7), 70 % (condizione 8) e 90% (condizione 9)

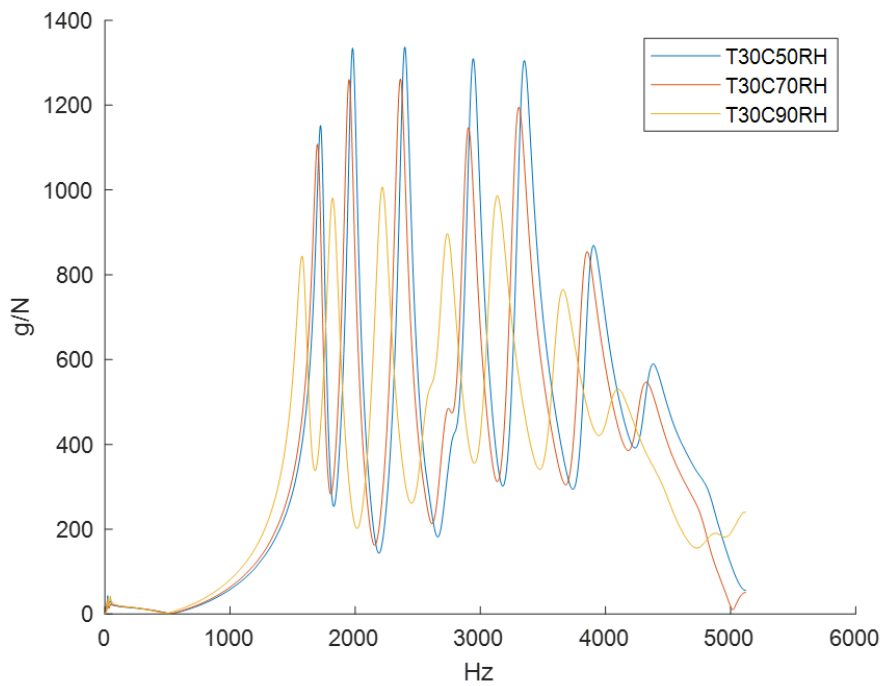


Figura 32, FRF della ruota 1 con temperatura pari a 30 C e umidità variata a 50 % (condizione 10), 70% (condizione 11) e 90% (condizione 12)

5.3.1.2 Analisi degli effetti dell'umidità sulla ruota 2

Di seguito sono riportate le variazioni delle FRF che si sono ottenute per la ruota 2 per i tre valori di temperatura, mantenuta costante, al variare dell'umidità (condizioni 4-12).

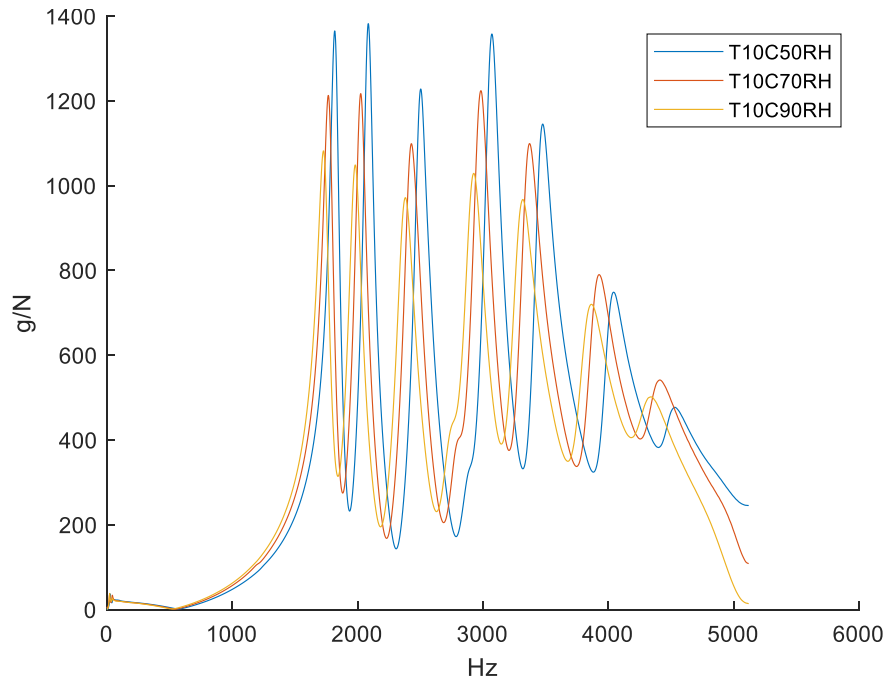


Figura 33, FRF della ruota 2 con temperatura pari a 10 C e umidità variata a 50 % (condizione 4), 70 % (condizione 5) e 90 % (condizione 6)

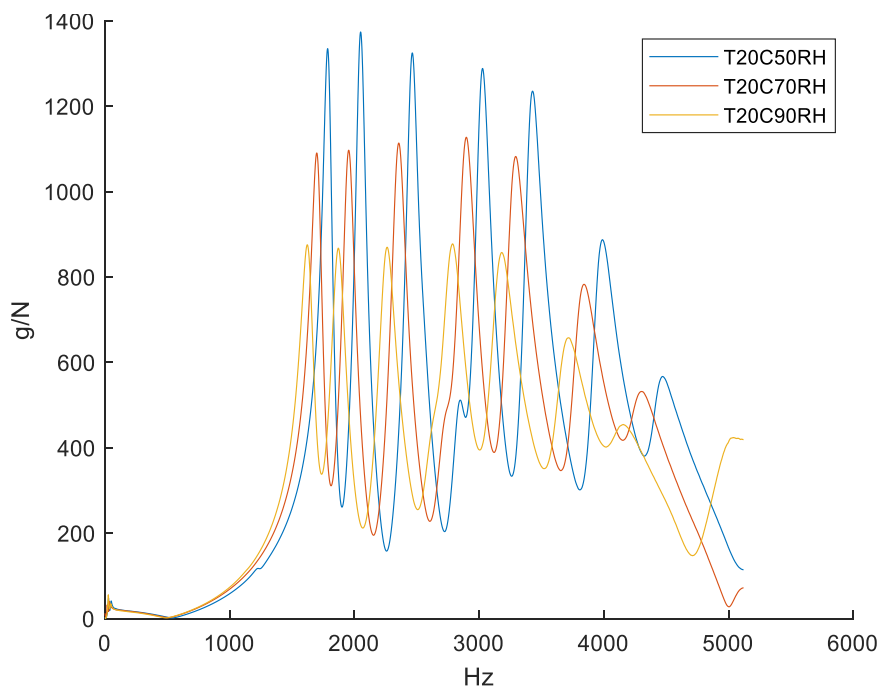


Figura 34, RF della ruota 2 con temperatura pari a 20 C e umidità variata a 50 % (condizione 7), 70 % (condizione 8) e 90% (condizione 9)

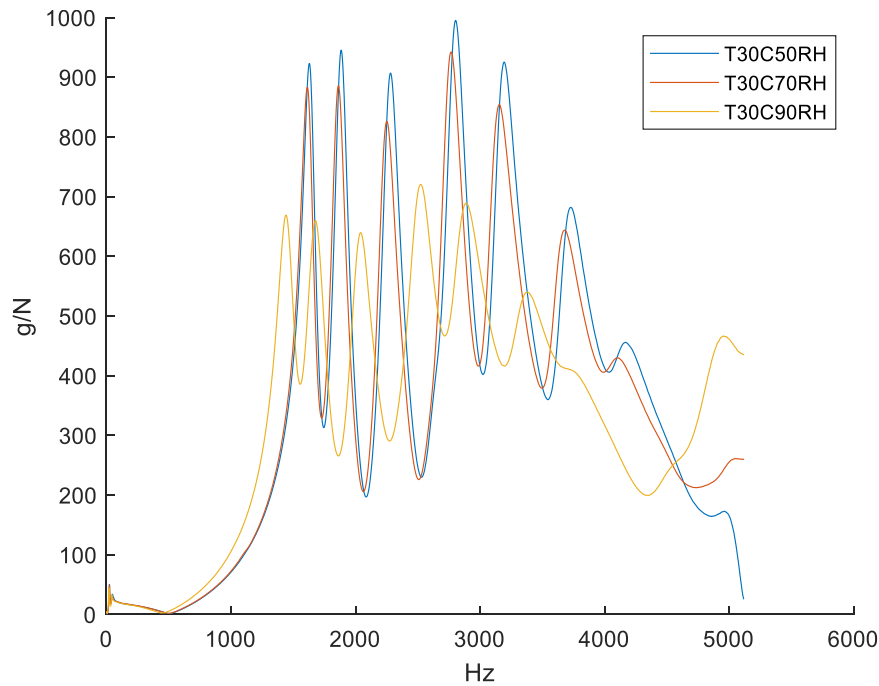


Figura 35, FRF della ruota 2 con temperatura pari a 30 C e umidità variata a 50 % (condizione 10), 70 % (condizione 11) e 90% (condizione 12)

5.3.1.3 Discussione dei risultati sugli effetti dell'umidità

A parità di temperatura l'aumento di umidità provoca, in entrambe le ruote, una riduzione delle ampiezze e delle frequenze relative ai picchi di risonanza (è possibile osservare uno spostamento delle FRF verso il basso e verso sinistra). Questo effetto ha un'importanza (entità shift) che dipende dalla temperatura. Alla temperatura di 10 C si osserva una variazione maggiore passando dal 50 % al 70 % di umidità, a 20 C si osservano all'incirca shift uguali, mentre per la temperatura di 30 C si nota una maggiore variazione passando tra 70 % e 90% di umidità, piuttosto che dal 50% al 70% come avveniva a 10 C. Queste variazioni dipendono proprio dalla risposta del materiale alle variazioni ambientali e una conferma di ciò è che i risultati ottenuti sono simili per le due ruote.

5.3.2 Effetti della temperatura sul comportamento del pezzo

5.3.2.1 Analisi degli effetti della temperatura sulla ruota 1

Di seguito sono riportate le variazioni delle FRF che si sono ottenute per la ruota 1 per i tre valori di umidità, mantenuta costante, al variare della temperatura (condizioni 4-12).

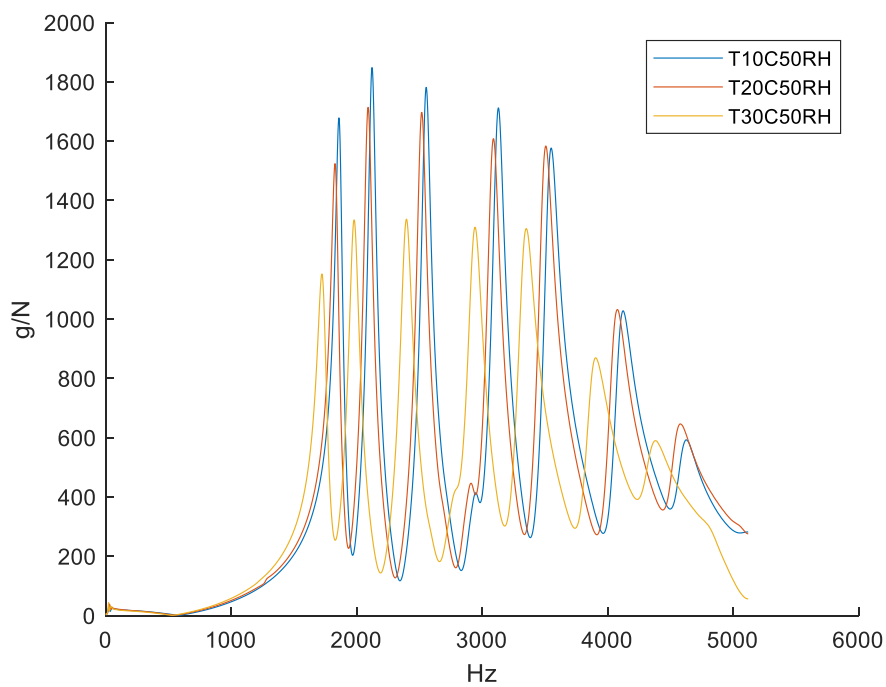


Figura 36, FRF della ruota 1 con umidità pari a 50 % e temperatura variata a 10 C (condizione 4), 20 C (condizione 7) e 30 C (condizione 10)

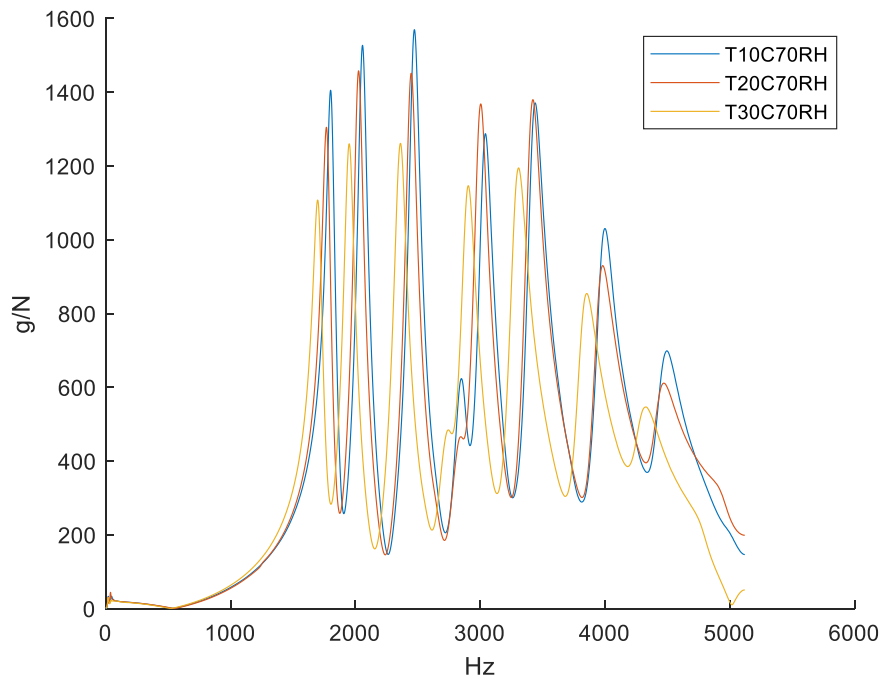


Figura 37, FRF della ruota 1 con umidità pari a 70 % e temperatura variata a 10 C (condizione 5), 20 C (condizione 8) e 30 C (condizione 11)

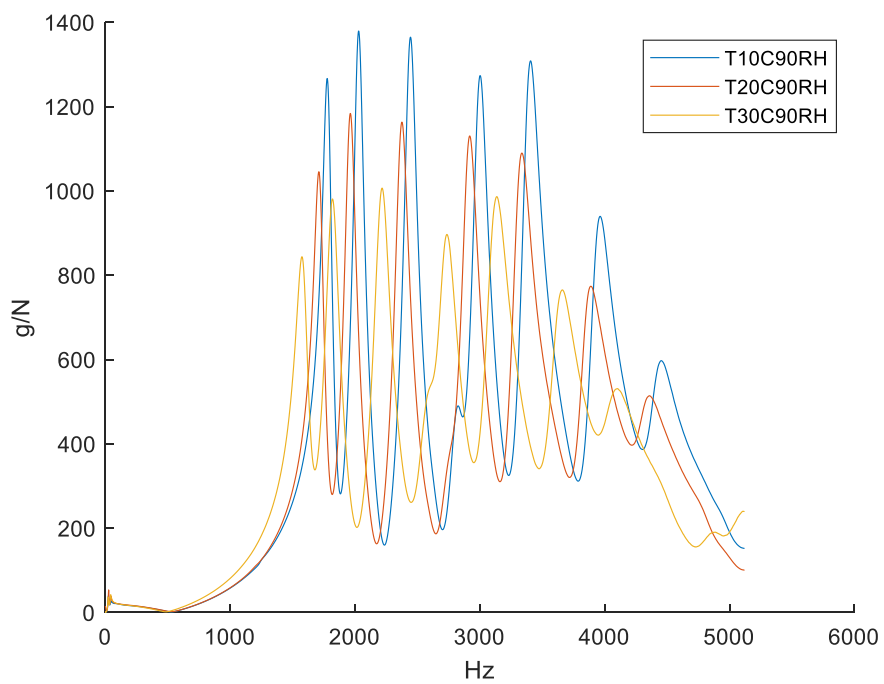


Figura 38, FRF della ruota 1 con umidità pari a 90 % e temperatura variata a 10 C (condizione 6), 20 C (condizione 9) e 30 C (condizione 12)

5.3.2.2 Analisi degli effetti della temperatura sulla ruota 2

Di seguito sono riportate le variazioni delle FRF che si sono ottenute per la ruota 2 per i tre valori di umidità, mantenuta costante, al variare della temperatura (condizioni 4-12).

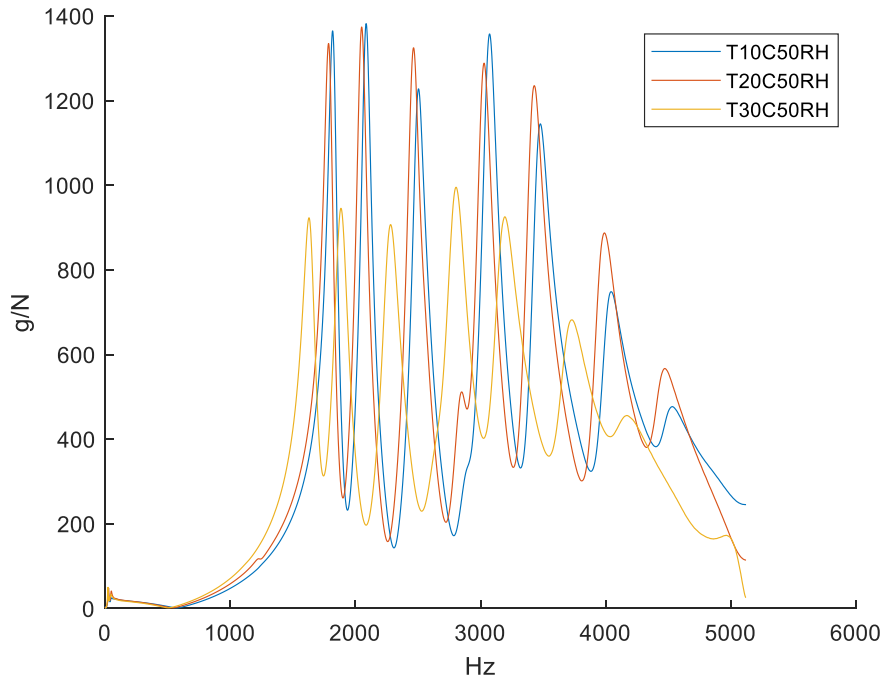


Figura 39, FRF della ruota 2 con umidità pari a 50 % e temperatura variata a 10 C (condizione 4), 20 C (condizione 7) e 30 C (condizione 10)

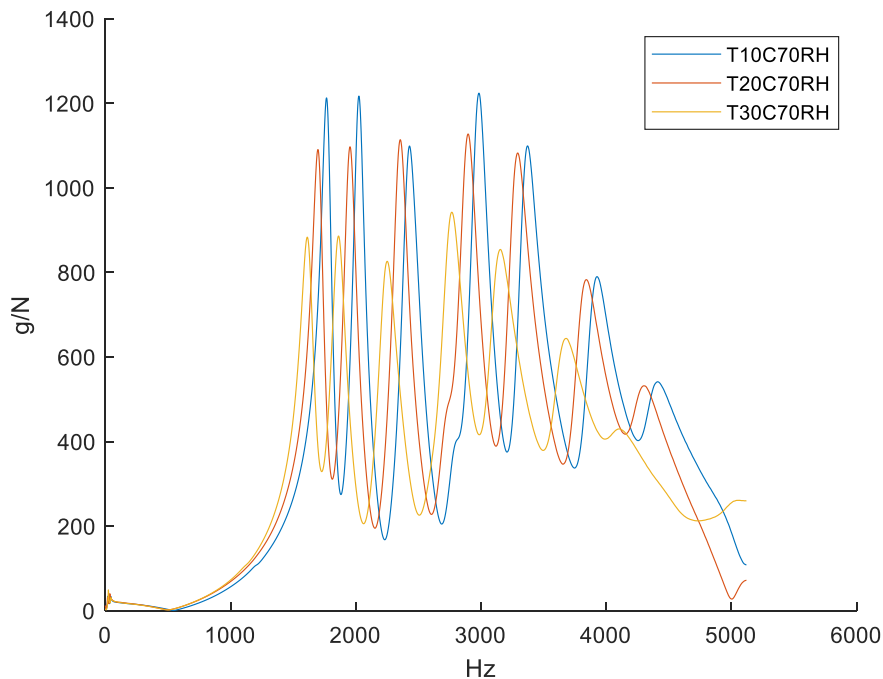


Figura 40, FRF della ruota 2 con umidità pari a 70 % e temperatura variata a 10 C (condizione 5), 20 C (condizione 8) e 30 C (condizione 11)

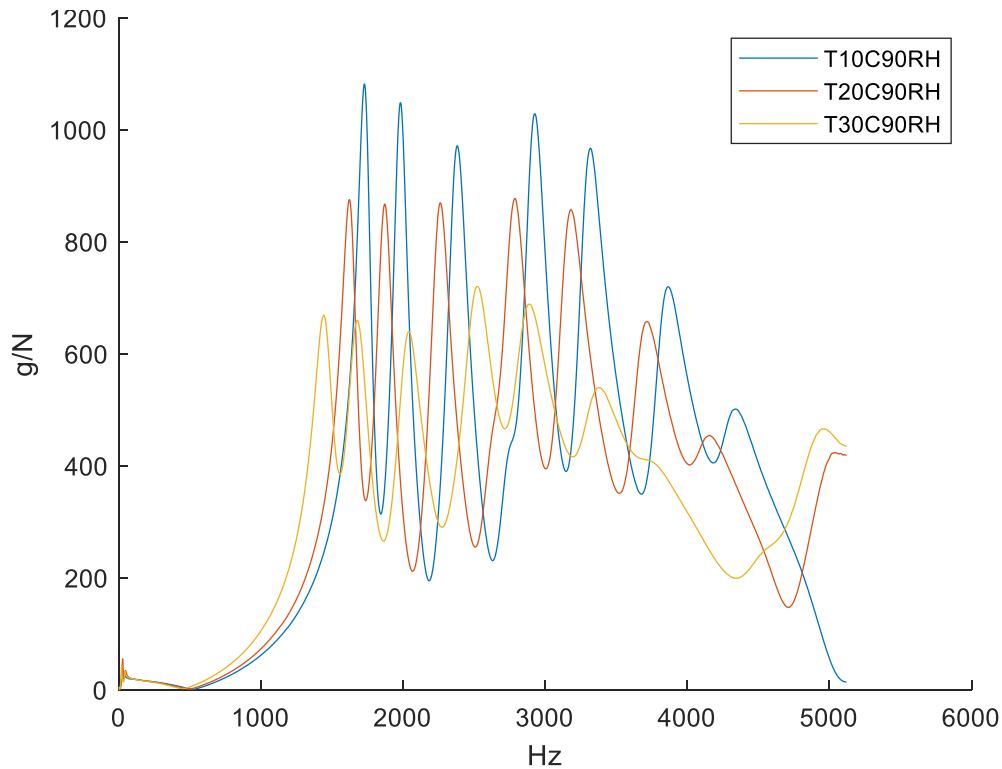


Figura 41, FRF della ruota 2 con umidità pari a 90 % e temperatura variata a 10 C (condizione 6), 20 C (condizione 9) e 30 C (condizione 12)

5.3.2.3 Discussione dei risultati sugli effetti della temperatura

I risultati ottenuti per entrambe le ruote mostrano che, a parità di umidità lo shift in frequenza provocato dalla variazione di temperatura è maggiore quando si passa da una temperatura di 20 C a 30 C rispetto al passaggio tra 10 C e 20 C. Perciò si può dedurre che più la temperatura aumenta più il comportamento del materiale tende a subire variazioni. I grafici mostrano una riduzione delle frequenze e delle ampiezze (spostamento FRF verso il basso e verso sinistra). Si può notare come lo shift sia molto importante passando da 20 C a 30 C al 50 % di umidità ma che tale rilevanza si riduca con l'aumento dell'umidità fino ad arrivare al 90 %, dove le variazioni provocate dal cambiamento di temperatura sembrano essere simili.

5.3.3 Analisi delle variazioni massive

5.3.3.1 Andamento della massa rispetto alla temperatura e all'umidità

Di seguito sono riportate le variazioni di massa per la ruota 1 dovute al cambiamento di temperatura e umidità (condizione 4-12).

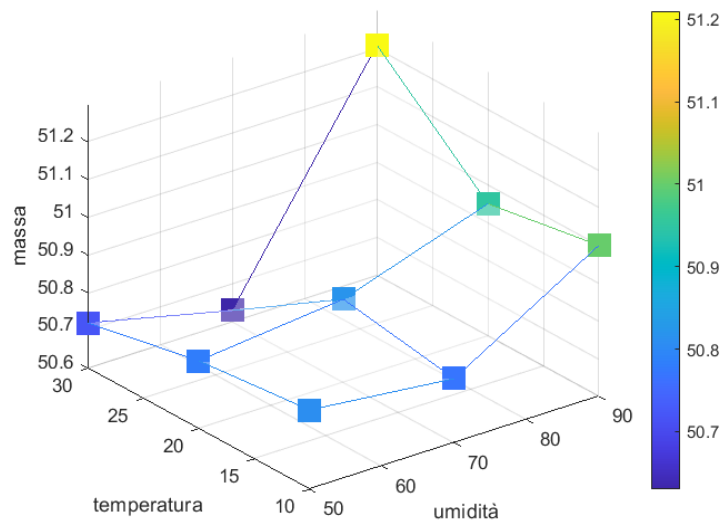


Figura 42, variazione massa ruota 1 rispetto al cambiamento di umidità e temperatura

Di seguito sono riportate le variazioni di massa per la ruota 2 dovute al cambiamento di temperatura e umidità (condizione 4-12).

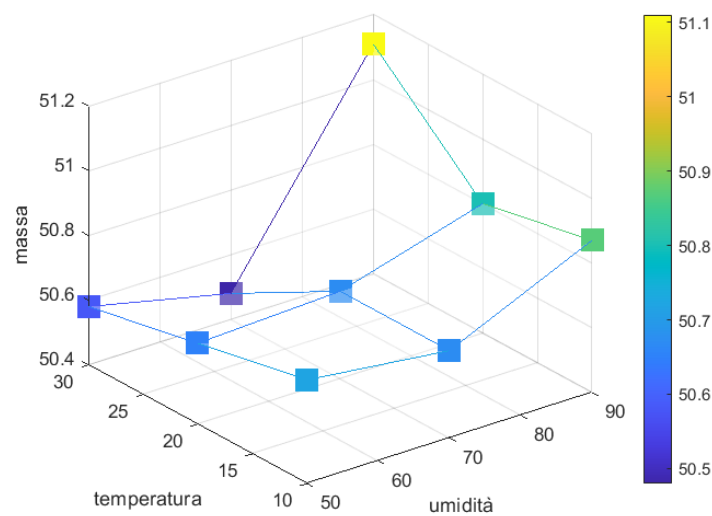


Figura 43, variazione massa ruota 2 rispetto al cambiamento di umidità e temperatura

5.3.3.2 Considerazioni sui valori di massa utilizzati nelle analisi e sugli effetti dovuti al fissaggio o meno del filo

Per entrambe le ruote e per le condizioni 7 e 8 non è stato possibile misurare il valore di massa nel momento in cui si sono eseguite le prove. Questi due valori sono stati ripresi successivamente. Sono quindi state fatte ulteriori prove nel momento in cui si sono misurati questi nuovi valori di massa. Anche in questo modo è possibile capire l'importanza del processo di stabilizzazione del materiale. Eventuali variazioni tra le FRF indicano un cambiamento dovuto all'invecchiamento del materiale e quindi anche dei valori di massa rispetto a quelli considerati. Per la condizione 7 inoltre si sono svolte ulteriori prove nelle quali il filo dell'accelerometro è stato lasciato libero, anche questo, con l'obiettivo di valutare la variazione che il suo fissaggio o meno comportava. Si sono ottenute le seguenti FRF:

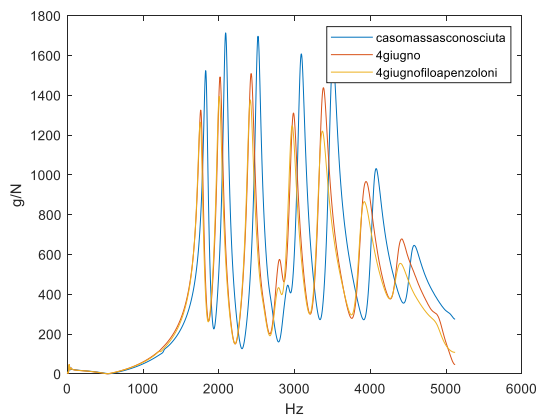


Figura 44, FRF ottenute per la ruota 1 in condizione 7

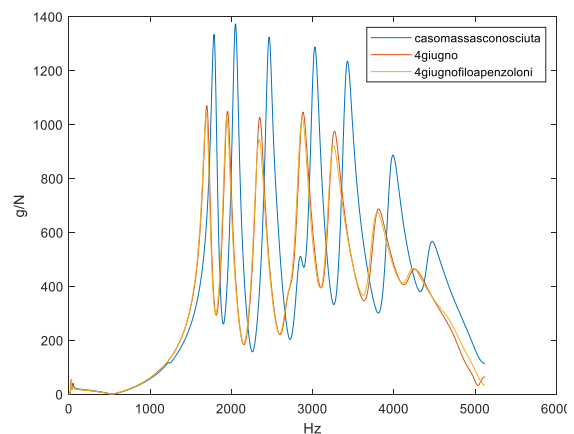


Figura 45, FRF ottenute per la ruota 2 in condizione 7

Le risposte in frequenza denominate “caso massa sconosciuta” sono quelle usate per valutare gli effetti della temperatura e dell'umidità nei paragrafi precedenti. Si può notare un discostamento con le FRF ottenute dalle prove svolte dopo all'incirca un mese, ovvero il 4 giugno 2021. Questo è dovuto, molto probabilmente, all'isteresi del materiale e quindi non è possibile ritenere i valori di massa ripresi in seguito “corretti” con massima sicurezza. Inoltre anche il filo lasciato libero di penzolare ha comportato delle variazioni delle FRF, ma con shift piccoli, tali da poter essere ritenuti trascurabili rispetto alle variazioni dovute al difetto e alle condizioni ambientali.

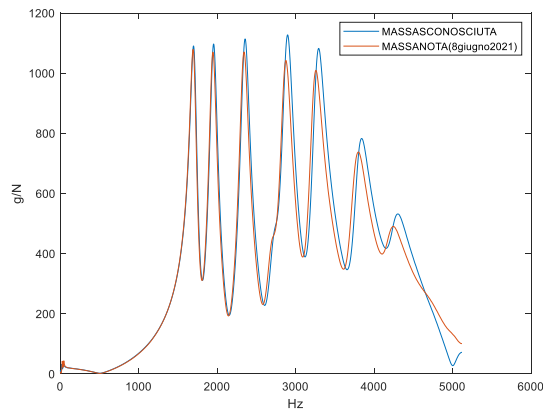


Figura 46, FRF ottenute per la ruota 1 in condizione 8

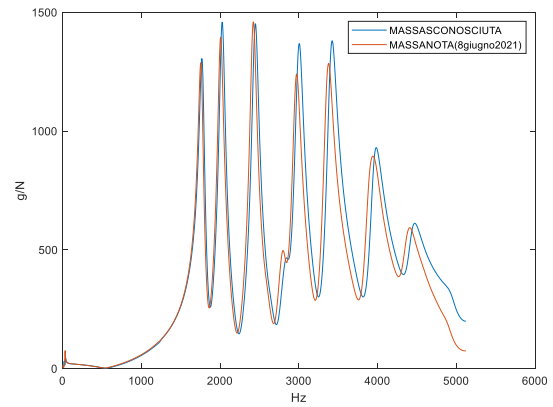


Figura 47, FRF ottenute per la ruota 2 in condizione 8

È possibile vedere gli stessi effetti anche per la condizione 8 seppure con minore importanza. La minor entità delle variazioni è dovuta all' aumento dell'umidità, e perciò, la presenza di acqua all'interno del pezzo comporta una minor "importanza" dei processi riguardanti il materiale.

5.3.3.3 Discussione dei risultati sulle variazioni massive

La massa in generale tende ad aumentare con l'aumento dell'umidità nell'ambiente circostante. La maggior parte dei punti ottenuti confermano questa ipotesi. Infatti, come si è visto, i pezzi stampati tramite AM sono caratterizzati da molte porosità e queste sono in grado di assorbire acqua. Tale assorbimento perciò sarà proporzionale al tempo e all'umidità ambientale in cui il pezzo si trova. Dai grafici sopra riportati si può osservare come l'aumento di massa sia molto maggiore passando da una percentuale di umidità dal 70 % al 90%. Il valore minimo di massa della ruota 1 è 50,63 g ed è stato ottenuto alla temperatura di 30 C e umidità al 70 % (condizione 11) mentre il valore massimo è 51,21 g ed è stato ottenuto alla temperatura di 30 C e umidità al 90 % (condizione 12). Il valore minimo di massa della ruota 2 è 50,48 g ed è stato ottenuto alla temperatura di 30 C e umidità al 70 % (condizione 11) mentre il valore massimo è 51,11 g ed è stato ottenuto alla temperatura di 30 C e umidità al 90% (condizione 12). Per entrambe le ruote perciò la variazione massima si è ottenuta passando dalla condizione 11 alla condizione 12 e la variazione per la ruota 1 è 0.58 g mentre per la ruota 2 è 0.63 g.

5.3.4 Analisi delle variazioni delle frequenze relative ai primi quattro picchi (posizione)

5.3.4.1 Andamento delle posizioni rispetto alla temperatura e all'umidità

Si è svolta un'analisi anche sulle variazioni delle frequenze relative ai primi quattro picchi di risonanza delle FRF (posizione) al variare della temperatura e umidità per entrambe le ruote.

In seguito sono riportati rispettivamente i grafici delle variazioni delle posizioni dei primi quattro picchi della ruota 1.

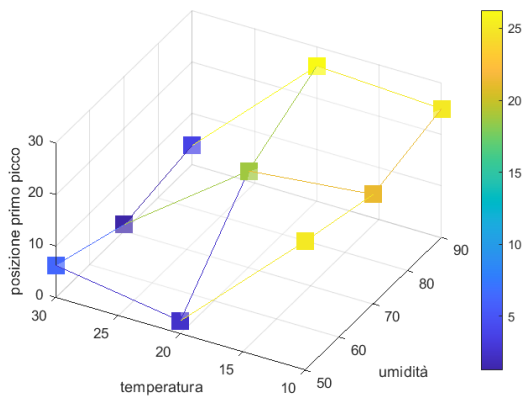


Figura 48, andamento frequenza relativa al primo picco di risonanza (posizione) della ruota 1 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità

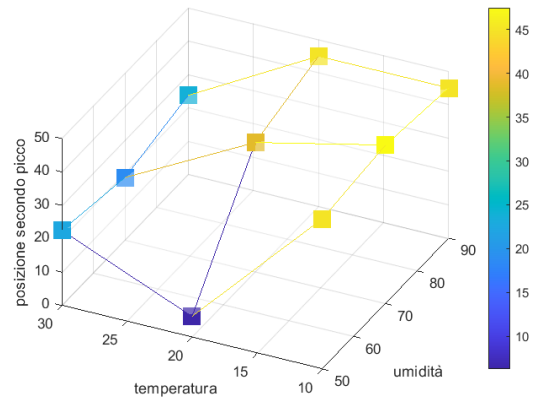


Figura 49, andamento frequenza relativa al secondo picco di risonanza (posizione) della ruota 1 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità

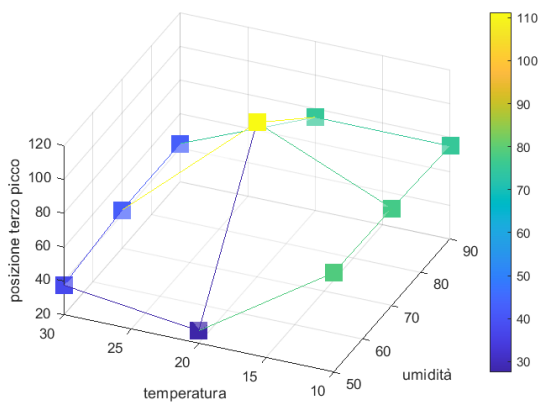


Figura 50, andamento frequenza relativa al terzo picco di risonanza (posizione) della ruota 1 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità

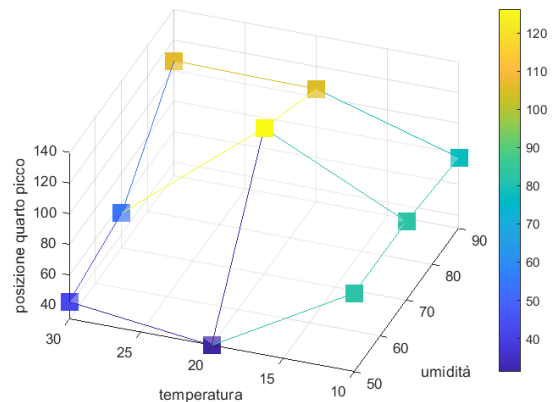


Figura 51, andamento frequenza relativa al quarto picco di risonanza (posizione) della ruota 1 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità

In seguito sono riportati rispettivamente i grafici delle variazioni delle posizioni dei primi quattro picchi della ruota 2.

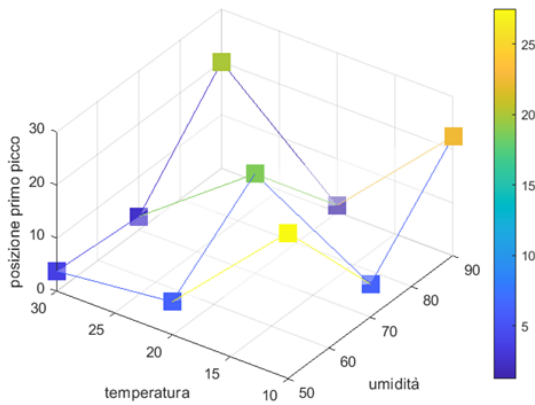


Figura 52, andamento frequenza relativa al primo picco di risonanza (posizione) della ruota 2 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità

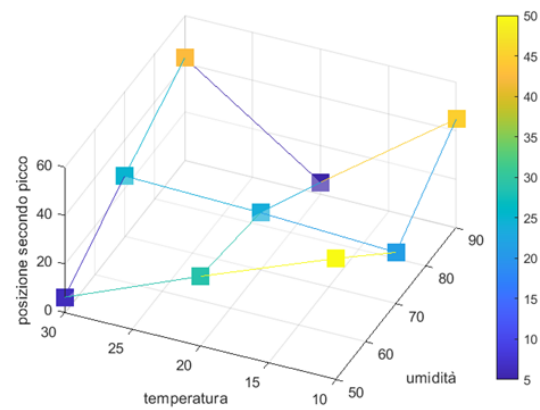


Figura 53, andamento frequenza relativa al secondo picco di risonanza (posizione) della ruota 2 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità

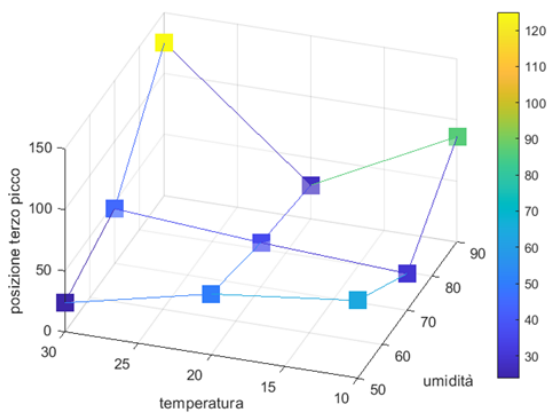


Figura 54, andamento frequenza relativa al terzo picco di risonanza (posizione) della ruota 2 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità

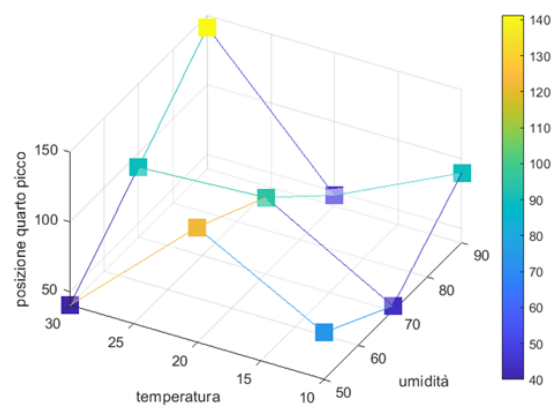


Figura 55, andamento frequenza relativa al quarto picco di risonanza (posizione) della ruota 2 rispetto alle variazioni di temperatura e umidità

5.3.4.2 Discussione dei risultati sulle variazioni delle posizioni

In generale, se pur con delle differenze da ruota a ruota, l'andamento delle frequenze relative ai primi quattro picchi pare mantenersi simile da un picco all'altro. Ciò che cambia è l'entità delle variazioni delle "posizioni" dei picchi con la variazione di umidità e temperatura. La variazione minima che si è ottenuta a parità di temperatura si ha per la posizione del primo picco della ruota 2 con temperatura di 30 C e umidità che varia dal 50 % (condizione 10) al 70 % (condizione 11) ed è 1,25 Hz. La variazione minima che si è ottenuta a parità di umidità si ha per la posizione del secondo picco della ruota 1 con umidità al 90 % e temperatura che varia da 10 C (condizione 6) a 20 C (condizione 9) ed è nulla (posizione che rimane invariata). La variazione massima che si è ottenuta a parità di temperatura si ha per la posizione del quarto picco della ruota 1 con temperatura a 20 C e umidità che varia dal 50 % (condizione 7) al 70 % (condizione 8), ed è 95 Hz. La variazione massima che si è ottenuta a parità di umidità si ha per la posizione del terzo picco della ruota 2 a umidità al 90 % e temperatura che varia da 20 C (condizione 9) a 30 C (condizione 12), ed è 97,5 Hz. In generale si può osservare che le variazioni delle frequenze relative ai vari picchi dovute al cambiamento di temperatura e umidità tendono ad aumentare man mano che si prosegue verso le alte frequenze.

6 Conclusioni e Sviluppi Futuri

Con questo elaborato si è voluto contribuire all'analisi delle caratteristiche dei pezzi derivanti dal settore additivo. Nonostante le similarità è impossibile generalizzare a tutti i vari processi che esso ingloba, perciò ci si è focalizzati su una delle tecnologie additive più utilizzata: la stereolitografia. Dalle prove ("impact test" e analisi modale) svolte sui campioni, ruote e travette prodotti con questo processo, si è potuto caratterizzare il comportamento dinamico dei pezzi e del materiale in particolari condizioni.

Per prima cosa, tramite prove sia simulate che sperimentali, si è osservato come la presenza di un difetto nella struttura della ruota provochi variazioni prestazionali del pezzo riscontrabili dalle diverse risposte in frequenze che si ottengono eccitando il pezzo e come queste dipendano dall'entità della profondità e dalla posizione del difetto.

Successivamente su due travette identiche si è analizzato il processo di invecchiamento (stabilizzazione) del materiale una volta stampato. La resina utilizzata, nel tempo previsto per l'osservazione (all'incirca due mesi) non ha ancora "completato" tale processo. Inoltre si è compreso che il percorso verso la stabilità non è direzionale.

In seguito, ulteriori test condotti su ruote non difettate hanno confermato le forti potenzialità riguardo l'accuratezza dello stampaggio. I discostamenti tra misure nominali di progetto (CAD) e reali sono trascurabili e rientrano nell'incertezza di misura. Il risultato di queste analisi ha un riscontro positivo anche nel comportamento dinamico dei vari pezzi. Le risposte in frequenze ottenute infatti, mostrano variazioni trascurabili se confrontate con quelle provocate dal difetto o dal variare di altri parametri, come le condizioni ambientali.

Dall'analisi e dal confronto dei risultati ottenuti per diverse prove in varie condizioni sulle ruote sono stati notati alcuni "shift" in frequenza non attribuibili a nessuno dei fattori precedentemente considerati. Dopo alcune ricerche, perciò, si è ipotizzato che questi fossero dovuti al cambiamento delle condizioni ambientali in cui questi pezzi sono stati conservati, in particolare umidità e temperatura (avendo escluso l'azione dei raggi UV, poiché i pezzi non sono stati esposti a tale radiazione).

Sono stati svolti test in nove particolari condizioni in cui di volta in volta venivano variati questi due parametri. Questo è stato possibile grazie a cicli di almeno 48 h in camera climatica in cui la temperatura è stata variata tra 10, 20 e 30 C mentre l'umidità relativa tra 50, 70 e 90 %.

Anche in questo caso le ipotesi sono state confermate e si è osservato come sia temperatura che umidità hanno un "forte" impatto sulle prestazioni del pezzo e sul suo comportamento dinamico.

Le variazioni provocate dal cambiamento delle condizioni ambientali si espandono anche alle variazioni di massa e delle frequenze relative ai vari picchi di risonanza (posizione dei modi di vibrare).

Sviluppi futuri prevedono la prosecuzione dell'analisi dell'invecchiamento e dei vari parametri che influenzano tale processo andando oltre il periodo di tempo considerato in questo documento. Inoltre andranno fatti ulteriori studi sui fattori già considerati, come temperatura e umidità, variandone

ulteriormente i valori e su altre possibili cause (come la luce UV) che sembrano influenzare il materiale una volta stampato, in modo tale da escluderle o caratterizzare come esse vadano ad impattare sulle caratteristiche del pezzo.

La caratterizzazione dei fattori in grado di influenzare le proprietà del materiale e di conseguenza quelle del pezzo nel post-stampa, se unito allo studio dei parametri di stampaggio, permette di sfruttare a pieno l' Additive Manufacturing attraverso un utilizzo consapevole di ciò che "esattamente" si andrà ad ottenere unendo efficacia e accuratezza del prodotto.

Bibliografia

[1] ResearchAndMarkets, Global Healthcare Additive Manufacturing Markets, 2021-2028 by Technology (Laser Sintering, Deposition Modeling), & Application (Medical Implants, Wearable Devices).

[2] Leo Gregurić, “storia della stampa 3D”, ALL3DP.

[3] Robots and Androids, “storia della stampa 3D: uno sguardo nel passato”.

[4] Materiale del corso di Additive Manufacturing, ingegneria della produzione, Università degli studi di Bergamo.

[5] F. Gabrielli, R. Ippolito and F. Micari, "Lavorazioni speciali," in Analisi e tecnologia delle lavorazioni meccaniche, Mc Graw Hill.

[6] Yiran Yang, Lin Li, Jing Zhao, Mechanical property modeling of photosensitive liquid resin in stereolithography additive manufacturing: Bridging degree of cure with tensile strength and hardness.

[7] Prof. Eleonora Santecchia, Materiale del corso di metodologie metallografiche, ingegneria meccanica, Università Politecnica delle Marche.

[8] K. Altaf, I. A. Ashcroft, N. Saleh e R. Hague, Environmental aging of epoxy based stereolithography parts Part 1 – Moisture transport.

[9] K. Altaf, I. A. Ashcroft, N. Saleh e R. Hague, Environmental aging of epoxy based stereolithography Part 2 – Effect of absorbed moisture on mechanical properties.

[10] Peter Avitabile, Modal Testing: A Practitioner's Guide.

[11] Carola Tröger, Arthur T. Bens, Günter Bemes, Ricarda Klemmer, Johannes Lenz e Stephan Irsen, Ageing of acrylate-based resins for stereolithography: thermal and humidity ageing behaviour studies.

[12] D .J. Ewins Modal Testing: Theory, Practice and Application.

[13] Formlabs, "Formlabs", [Online]. Available: <https://formlabs.com/it/blog/guida-definitiva-stampa-3d-stereolitografia-sla/>.

[14] Formlabs, "Formlabs", [Online]. Available: <https://formlabs.com/it/blog/fdm-sla-sls-scegliere-tecnologia-stampa-3d/>.

[15] Formlabs, "Formalbas" , [Online]. Available: Functional Prototyping Materials for Engineers (formlabs.com).

[16] Siemens, "Siemens", [Online]. Available: Natural Frequency and Resonance (siemens.com).