

POLITECNICO DI MILANO
Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria
dei Materiali e delle Nanotecnologie



**Stampa, Caratterizzazione e
Post-Processing di Allineatori Dentali
Stampati con Tecnologia PolyJet™**

Relatore: Prof. Roberto Chiesa

Correlatore: Dott. Francesco Tamburrino

**Tesi di Laurea di:
Simone Clemente
Matricola : 918924**

Anno Accademico 2019-2020

*Ai miei genitori e ai miei affetti più cari,
il mio vero valore aggiunto.*

Indice

Sommario	1
Abstract	2
Ringraziamenti	4
1 Introduzione	6
2 Metodi e Dispositivi Ortodontici	10
2.1 Ortodonzia e Dispositivi	11
2.2 Dispositivi Fissi	12
2.3 Dispositivi Rimovibili	16
2.4 Allineatori Termoformati Trasparenti	19
2.5 Allineatori Trasparenti da Processi di Prototipazione Rapida	24
3 Stampa 3D di Dispositivi Ortodontici : Stato Dell'Arte	27
3.1 Additive Manufacturing nell'Ortodonzia	29
3.1.1 SteroLithography Apparatus	29
3.1.2 Binder Jetting	35
3.1.3 Material Jetting	37
3.1.4 Fused Deposition Modeling	40
3.2 Processi di Post-Produzione	42
3.2.1 Abrasione	43
3.2.2 Solvente	49
3.2.3 Altri Metodi	52
4 Analisi del Problema di Ricerca	53
4.1 La Necessità di Materiali Flessibili	54
4.2 La Necessità di una Finitura Trasparente	59

5	Caratterizzazione Meccanica dei Materiali	63
5.1	Materiali e Metodi	63
5.1.1	MED610 e MED625FLX	65
5.1.2	Provini	67
5.1.3	Test di Flessione	69
5.1.4	Test di Trazione	71
5.2	Risultati	72
5.3	Discussione dei Risultati e Conclusioni	78
6	Finitura Superficiale Degli Allineatori	84
6.1	Materiali e Metodi	84
6.1.1	Geometrie e Stampa	85
6.1.2	Processo di Finitura	89
6.1.3	Apparato per Finitura a Tamburo	94
6.2	Risultati	97
6.2.1	Finitura in Abrasivo	101
6.2.2	Finitura in Solvente	103
6.3	Discussione dei Risultati e Conclusioni	110
7	Conclusioni e Sviluppi Futuri	115
	Bibliografia	120
	Appendici	124
A	Tavole Tecniche Dell’Apparato di Finitura in Tamburo	124
B	Circuito Apparato Finitura	130
C	Codice Arduino Uno R3	131
D	Diario di Laboratorio Test Preliminari	132
E	Datasheets di Riferimento	134

Sommario

Il presente lavoro indaga l'utilizzabilità delle resine fotopolimerizzanti proprietarie Stratasys MED610 e MED625FLX per la produzione con tecniche di manifattura additiva di allineatori dentali trasparenti, proponendo tale processo come alternativa a quello tradizionale di termoformatura. I provini sono stati prodotti utilizzando una stampante Stratasys Objet 500, macchinario largamente impiegato nel campo ortodontico per la produzione di stampi per la termoformatura di allineatori dentali. In primo luogo sono state valutate le caratteristiche meccaniche dei materiali puri e di loro compositi, questi ultimi creati utilizzando la funzione rivestimento disponibile nel software della stampante stessa. I test mettono in luce come la resina MED610 risulti troppo fragile per la produzione di allineatori dentali, mentre la MED625FLX non possiede sufficiente resistenza meccanica per essere utilizzata. Contrariamente ai materiali puri, i compositi creati abbinando i due materiali con la funzione di rivestimento mostrano migliorate caratteristiche di resistenza a rottura per flessione mantenendo comunque un'adeguata resistenza meccanica, requisito fondamentale per ottenere una spinta sufficiente sulla dentatura. Successivamente alla stampa, un processo di post-processing tramite barrel finishing è stato effettuato sugli allineatori, in modo da raggiungere il requisito di trasparenza del prodotto finito, fondamentale per gli scopi estetici del trattamento ortodontico. Sono state utilizzate tre diverse cariche, la prima di Al_2O_3 abrasivo a secco, la seconda di IPA, buon solvente per le resine, e l'ultima utilizzando abrasivo e solvente in concomitanza, mostrando come, sebbene il processo a secco con abrasivo lasci dei residui superficiali di Al_2O_3 difficilmente removibili, il solo processo qui presentato non sia sufficiente al raggiungimento della trasparenza necessaria, migliorando tuttavia la qualità finale del prodotto e riducendone quasi completamente i difetti superficiali di stampa.

Abstract

The usability of the Stratasys proprietary UV-curing MED610 and MED625FLX resins for the additive manufacturing production of transparent dental aligners was investigated in this work, with the aim of purposing this process as a valid alternative to thermoforming. The specimens were printed using a Stratasys Objet 500 printer, a printer widely used in the orthodontic field. First, the mechanical characteristics of the pure materials and their composites were evaluated, the latter created using the coating function available in the printer software. Tests show that MED610 resin is too brittle for the production of dental aligners, while MED625FLX does not have sufficient mechanical strength to be used. Unlike pure materials, the composites created by crossing the two materials with the coating function showed improved characteristics of resistance to bending, while maintaining adequate mechanical strength, a fundamental requirement for obtaining sufficient thrust on the teeth. After printing, a post-processing process through barrel finishing was carried out on the aligners, in order to achieve the requirement of complete transparency of the finished product, which is fundamental for the aesthetic purposes of the orthodontic treatment. Three different medium were used, the first was Al_2O_3 dry abrasive, the second was IPA, a good solvent for resins, and the last one using abrasive and solvent concurrently, showing how, although the dry process with abrasive leaves superficial residues of Al_2O_3 that are difficult to remove, the process presented here alone is not sufficient to achieve the necessary transparency, however improving the quality of the final product and almost completely reducing printing defects.

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va ai miei genitori, Sonia e Costantino, che in questi anni di studi mi hanno sempre supportato e spinto a migliorarmi, anche se non sempre sono riuscito a capire subito quanto il loro sostegno fosse fondamentale. In conclusione di questo percorso, guardandomi alle spalle, finalmente riesco a vederlo chiaramente, e non riuscirò mai a ringraziarli abbastanza.

Un grazie anche a mia sorella Alice, con cui ho sempre avuto la possibilità di confrontarmi, e da cui non smetterò mai di prendere esempio ed imparare. Il suo essere sempre un passo avanti mi ha dato e mi darà sempre la spinta a raggiungere i miei obiettivi. Insieme ringrazio tutta la mia famiglia, ognuno di loro ha contribuito alla mia formazione e crescita personale. Grazie con tutto il cuore.

Ringrazio Marta, la mia ragazza, amica e collega, che con me ha condiviso questo percorso, vivendo da vicino ogni momento, sopportandomi nei miei difetti e sostenendomi sempre, mettendomi di fronte ai miei errori a fare sì che li potessi comprendere e così crescere, spingendomi sempre a dare di più. Per questo e per tanto altro, grazie.

In merito a questa ricerca, vorrei ringraziare il relatore Prof. Roberto Chiesa, per aver reso possibile questo lavoro, ed essere stato sempre disponibile durante tutto il suo svolgimento. Ringrazio inoltre AirNivol S.p.A. per aver contribuito in modo sostanziale, fornendo tutto il supporto alla stampa dei provini di cui necessitavo.

Un particolare ringraziamento al Dott. Francesco Tamburrino per avermi consigliato ed aiutato nell'intero corso di questa ricerca, dandomi per ogni questione un riscontro fondamentale, e senza il quale non avrei sicuramente prodotto un lavoro di cui mi ritengo personalmente soddisfatto.

Per la produzione delle parti meccaniche delle attrezzature utilizzate, un ringraziamento ulteriore a mio padre Costantino e all'azienda di famiglia C.G.F. s.a.s., che da sempre è la mia base di crescita professionale.

L'ultimo ringraziamento a tutte le persone che non sono riuscito a citare, quali gli amici di sempre, con cui ho avuto la possibilità di ridere e sfogarmi, e tutti i compagni di corso, inimitabile compagnia e fonte di confronto.

Capitolo 1

Introduzione

La presente ricerca nasce dalla necessità di innovare i processi produttivi degli allineatori dentali trasparenti. Attualmente la produzione di tali dispositivi viene effettuata tramite termoformatura a vuoto di una piastra di materiale termoplastico trasparente su uno stampo che possiede la geometria della dentatura da trattare, modificata per creare le pressioni necessarie sui denti al fine di modellare la dentatura secondo i posizionamenti voluti. Il trattamento che viene eseguito per mezzo di tali allineatori prevede più fasi, per cui vengono prodotti un numero di allineatori corrispondenti ognuno ad una delle fasi necessarie allo spostamento complessivo dei denti, partendo dalla posizione iniziale per arrivare alla forma finale della dentatura che si vuole ottenere.

Ogni allineatore appartenente al trattamento, dunque, possiede uno stampo necessario alla sua produzione, per cui il numero di stampi da produrre risulta considerevole. Gli stampi vengono attualmente prodotti tramite tecniche di fabbricazione additiva, con tecnologie diverse a discrezione del produttore, esistendo diversi processi che ben si prestano a questa applicazione. Questo fa sì che ogni azienda operi delle scelte diverse riguardo ai macchinari e ai materiali da utilizzare, nonostante l'utilizzo di resine foto-polimerizzanti sia preferito per la maggiore accuratezza dei processi basati su tali materiali.

L'impiego di resine foto-polimerizzanti, tuttavia, rende il materiale utilizzato per la produzione degli stampi non riciclabile, a causa del processo irreversibile di reticolazione che la resina subisce. Questo porta inevitabilmente alla generazione di un quantitativo ingente di prodotti di scarto, non riconvertibili e quindi difficili da smaltire. Inoltre, la necessità di produrre degli stampi rende il processo complessivo di produzione oneroso, sia in termini di tempo che in termini di costi. Risulta quindi preferibile un processo che sia diretto e non necessiti dell'utilizzo



Figura 1.1: Esempio di allineatore dentale trasparente indossato (<https://infodent.it/photogallery/airnivol>).

di attrezzature intermedie, ma bensì produca l'allineatore utilizzando unicamente il materiale necessario alla produzione dello stesso. Da questo aspetto nasce la motivazione primaria della presente ricerca, ovvero la necessità di definire un processo produttivo che elimini il passaggio di produzione degli stampi per termoformatura, ed i relativi scarti prodotti, accelerando il ciclo lavorativo che porta alla costituzione del prodotto finito.

Una valida soluzione per produrre allineatori ortodontici trasparenti con un processo diretto, che con il solo utilizzo del materiale base generi l'allineatore finale, è senza dubbio la fabbricazione additiva, che permetterebbe così la produzione senza la necessità di un processo in più fasi, riducendo l'intero ciclo lavorativo alla stampa e ad un eventuale post-processing degli allineatori.

Il presente lavoro si focalizza dunque sulla ricerca e l'identificazione della tecnologia di fabbricazione additiva maggiormente indicata per ottenere il risultato sopra esposto. Nella definizione delle linee da seguire nella selezione e nella sperimentazione di una specifica tecnologia, è stato fatto riferimento alle informazioni fornite da AirNivol S.p.A., che da anni opera nel settore dei trattamenti ortodontici con allineatori dentali trasparenti, e che ha posto le basi per la formulazione di questa ricerca.

Avendo definito dunque la motivazione che muove la ricerca di un nuovo processo produttivo, è indispensabile considerare la necessità di mantenere le caratteristiche del prodotto finito il più possibile invariate, al fine di preservare le peculiarità degli allineatori trasparenti. Questi ultimi, infatti, hanno riscosso grande successo

nel campo dei trattamenti ortodontici grazie alla loro invisibilità e comodità di utilizzo. La trasparenza dei materiali utilizzati permette di indossarli senza che vengano notati, non compromettendo così l'aspetto del paziente, motivo per cui tali dispositivi sono preferiti dai pazienti adulti (Figura 1.1). Tutto questo mantenendo un alto grado di comfort nell'utilizzo, grazie allo spessore esiguo (circa 0,7 mm) che non genera ingombro nel cavo orale.

Un'ulteriore questione riguarda la flessibilità degli allineatori dentali, che nell'utilizzo, specialmente nella rimozione e nel posizionamento, deve risultare sufficientemente alta da non portare alla rottura accidentale del dispositivo, caratteristica che i materiali termoplastici utilizzati per la termoformatura possiedono.

Dunque la problematica complessiva può essere riassunta nell'interrogativo se sia possibile stampare con tecniche di additive manufacturing allineatori dentali con un grado di trasparenza pari a quelli termoformati e che possiedano alta flessibilità, mantenendo comunque la rigidità necessaria al trattamento, in modo da ridurre tempi e costi di produzione. Per quanto riguarda la necessità di trasparenza i materiali e le tecniche disponibili sono innumerevoli, ma generalmente si tratta di materiali fragili, e che quindi non rispettano il vincolo di alta flessibilità. Inoltre, bisogna considerare la presenza delle linee di stampa, corrispondenti ai vari layer, difficilmente eliminabili già in fase di produzione, e che compromettono parzialmente la trasparenza dell'allineatore.

Come soluzione a queste problematiche, è stato scelto di stampare allineatori in multi-materiale utilizzando unicamente due resine trasparenti, di cui la prima rigida e fragile mentre la seconda elastica e molto flessibile ma senza rigidità meccanica, sfruttando la combinazione di questi materiali per ottenere un materiale composito che possedesse le caratteristiche necessarie alla costituzione di un allineatore di un grado meccanico paragonabile a quelli termoformati. Successivamente, per l'eliminazione dei difetti di stampa che compromettono la trasparenza del prodotto "as-printed", sono stati testati diversi processi di finitura, confrontati tra loro determinandone il migliore. Contemporaneamente è stata svolta un'indagine sulle proprietà meccaniche dei materiali compositi stampati, andando a caratterizzarli definendone le curve sforzo-deformazione tramite prove di trazione e flessione, fondamentali nel processo di progettazione dell'allineatore per prevedere quelle che saranno le forze applicate ai denti nel momento in cui il dispositivo viene indossato, per cui una definizione accurata delle caratteristiche meccaniche migliora la qualità del trattamento.

Inizieremo dunque nel Capitolo 2 dalla presentazione delle varie metodologie di correzione del disallineamento dei denti, partendo da dei cenni storici per giungere

alle moderne tecnologie utilizzate nei trattamenti ortodontici, percorrendo l'evoluzione di tali dispositivi dall'inizio del '700 fino ai giorni nostri. Successivamente, nel Capitolo 3, verrà descritto lo stato dell'arte della stampa 3D di dispositivi ortodontici e dei processi di finitura utilizzati per il post-processing di parti prodotte tramite additive manufacturing.

Proseguiremo poi con la presentazione dell'analisi del problema di ricerca nel Capitolo 4, in cui saranno illustrate nel dettaglio le specifiche di progetto del prodotto finale, ovvero le caratteristiche necessarie all'allineatore stampato in 3D per essere proposto come alternativa al prodotto termoformato.

Le due linee principali di ricerca del presente lavoro verranno presentate nel Capitolo 5, per quanto riguarda metodi e risultati della caratterizzazione dei materiali compositi, e nel Capitolo 6, in cui vengono trattati i risultati ottenuti testando diversi processi di finitura.

Le conclusioni, insieme con possibili sviluppi futuri di ricerca a completamento delle indagini effettuate nel presente lavoro, sono infine riassunte nel Capitolo 7.

Capitolo 2

Metodi e Dispositivi Ortodontici

Sebbene l'ortodonzia possa apparire nell'immaginario comune come una disciplina moderna, le prime testimonianze di tentativi di correzione di malocclusioni risalgono a circa 3000 anni fa [36]. Molto prima dell'arrivo della moderna ortodonzia, infatti, era ben noto che la dentatura umana non fosse immobile, ma anzi, che una pressione esercitata su un dente ne poteva modificare la posizione, senza che quest'ultimo venisse necessariamente rimosso. Già in Grecia prima, e nell'antica Roma successivamente, vennero studiate le "irregolarità" dei denti (così venivano classificate allora quelle che prendono oggi il nome di malocclusioni) e dei primi metodi per la loro correzione proposti. Fu infatti Ippocrate, nel 400 a.C. circa, il primo studioso a riportare delle osservazioni su tali irregolarità, mentre Celsio, nel I sec. a.C., effettuò i primi tentativi di un trattamento di correzione delle stesse [35].

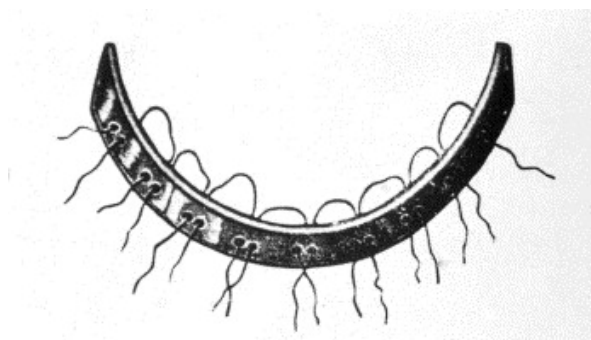


Figura 2.1: La "Bandeau de Fauchard"

Giungendo nella storia moderna, precisamente nel 1728, Pierre Fauchard, considerato il “padre dell’odontoiatria”, all’interno del manoscritto “The Surgeon Dentist: A Treatise on the Teeth”, edito in due volumi, descrisse un apparecchio da lui ideato ed utilizzato per la correzione dei difetti di allineamento delle dentature [8]. Esso si componeva di una banda metallica che veniva fissata ai denti tramite dei fili, e che tirandoli a sé ripristinava la curvatura corretta dell’arcata dentale (Figura 2.1). Probabilmente il caso di Pierre Fauchard non costituisce il primo esempio di utilizzo di tale metodo di allineamento, ma sicuramente rappresenta la prima indagine riportata su un manoscritto di tale principio, definendo la nascita di un metodo che nei secoli successivi ha portato allo sviluppo di diverse tecnologie, fino ad arrivare ai moderni apparecchi.

Iniziando dunque dalla definizione dei principi alla base del funzionamento degli apparecchi dentali, si identificheranno quelle che sono le caratteristiche necessarie al raggiungimento di un alto grado di efficacia del trattamento, e si vedrà come esse si combinino all’interno di un allineatore ed i vantaggi, sia estetici che funzionali, che l’utilizzo di tali dispositivi dona al trattamento complessivo in ogni sua fase.

2.1 Ortodonzia e Dispositivi

Come anticipato nel paragrafo precedente, il principio fondante su cui si basa la correzione delle malocclusioni [27] è l’applicazione di una pressione sul dente, che provocando una frattura progressiva dell’osso alveolare, sede in cui è situato il dente, ne permette una lenta calcificazione fino al raggiungimento dell’allineamento dell’arcata dentale. Tale meccanismo è permesso dalla stessa conformazione della struttura dentale, rappresentata in Figura 2.2, in cui il dente rigido e fragile è inserito nell’osso alveolare, a cui è collegato tramite il legamento parodontale, uno strato fibroso che accomoda gli spostamenti istantanei del dente nell’utilizzo comune. Tale strato contiene, oltre alle fibre che compongono il legamento, cellule mesenchimali indifferenziate che differenziandosi in osteoclasti e osteoblasti rendono possibile la modifica della forma dell’osso alveolare a contatto con tale strato, sede del dente che ne determina la posizione. Grazie alla presenza di osteoclasti e osteoblasti, che operano rispettivamente erodendo chimicamente e ricostruendo l’osso stesso, la sede del dente può lentamente essere riposizionata [27].

Tale effetto può essere generato in diversi modi e grazie all’utilizzo di apparecchi molto diversi tra loro. Nel caso, per esempio, della banda di Fauchard, i denti situati posteriormente all’arcata e legati all’arco metallico vengono tirati dai fili, utilizzando come appoggio gli altri denti. A loro volta i denti posti anteriormente,

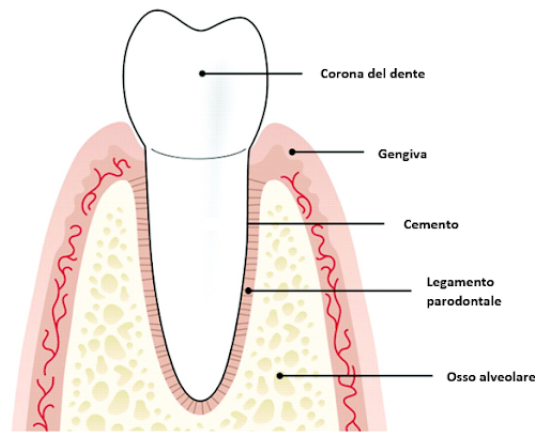


Figura 2.2: Rappresentazione della struttura parodontale

su cui la banda poggia, verranno spinti nella direzione opposta, e in questo modo lentamente la dentatura andrà ad allinearsi. Questo processo è schematizzato in Figura 2.3.

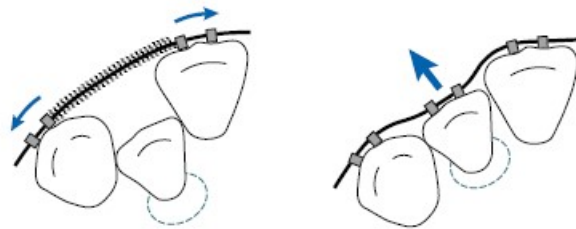


Figura 2.3: Meccanismo di funzionamento degli apparecchi fissi. Il filo connesso ai denti tramite degli afferraggi genera delle forze che tendono a ripristinare la sua forma originale, per cui l'arcata otterrà una curvatura uniforme[31].

2.2 Dispositivi Fissi

Il principio fondamentale su cui si basano gli apparecchi è dunque quello di omogeneizzare la curvatura dell'arcata creando degli sforzi sui denti che tendono ad eguagliarsi portandosi in equilibrio tra loro, e seguendo dunque un profilo continuo su di un arco, senza deviazioni. Tale è rimasta la teoria sulla quale vengono progettati ad oggi gli allineatori fissi, in cui un filo metallico viene fissato ai denti tramite dei supporti che vengono precedentemente incollati al dente tramite una pasta indurente, come mostrato in Figura 2.5. Questa rimane la geometria più semplice, mentre per casi particolari di errato posizionamento dei denti, in cui

per esempio siano richiesti complessi spostamenti collettivi di un alto numero di denti, si ricorre a soluzioni più complesse [27] sviluppate utilizzando come base tale semplice geometria. Esula, tuttavia, dallo scopo di questa introduzione e di questo lavoro la valutazione e l'illustrazione di geometrie più complesse, che non verranno in questa sede trattate.

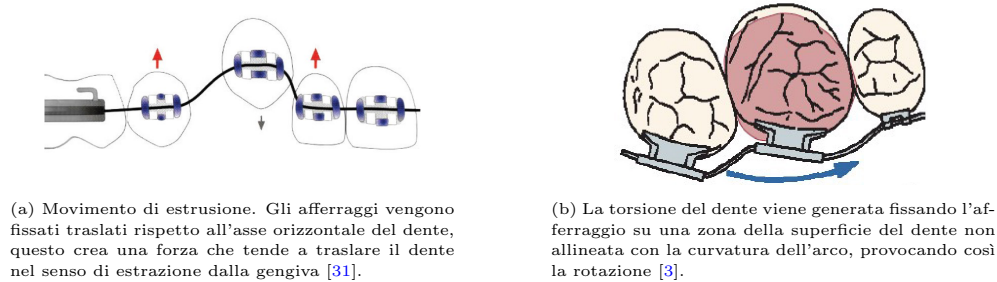


Figura 2.4: Due dei movimenti alternativi alla traslazione orizzontale del dente. Il posizionamento dell'afferraggio è fondamentale nello studio del movimento di riallineamento.

In generale, comunque, i movimenti necessari di spostamento dei denti sono sufficientemente semplici da non richiedere apparati eccessivamente complessi, per cui un arco unito al posizionamento specifico degli afferraggi sulla superficie del singolo dente genera una forza direzionalmente precisa che andrà a muovere (Figura 2.4a) o ruotare (Figura 2.4b), tramite il momento generato da una forza fuori asse, il dente fino al riallineamento.

Non vengono qui considerati i materiali utilizzati per la produzione degli afferraggi (*brackets*), solitamente prodotti in materiale ceramico o leghe metalliche, in quanto non incidono particolarmente sul comportamento meccanico dell'apparecchio ai fini dell'allineamento, e come unico vincolo meccanico vi è la resistenza che deve essere sufficiente a non provocare cedimento o deformazione plastica quando soggetti alle pressioni di servizio, e non risulta quindi necessario conoscere completamente il comportamento meccanico per ogni valore di sforzo e deformazione. Riguardo ai requisiti estetici l'obiettivo riguarda il colore del materiale, se ceramico, o del rivestimento operato, in modo che esso sia quanto più simile al dente o invisibile nel caso di materiali monocristallini (Figura 2.6).



Figura 2.5: Afferraggio per archetto metallico fissato al dente tramite una pasta adesiva,

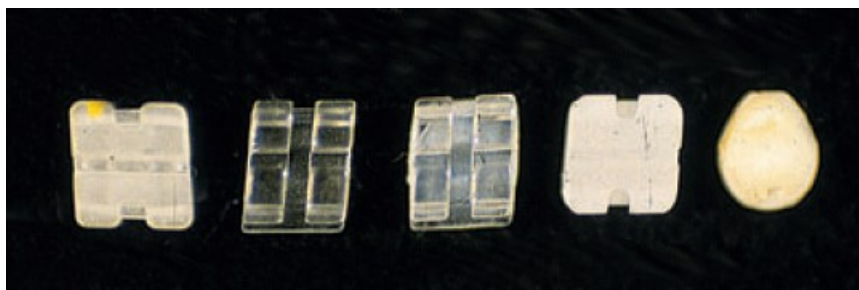


Figura 2.6: Diversi tipi di afferraggi estetici. Da sinistra: ossido di alluminio policristallino (primo, terzo e quarto), ossido di alluminio monocristallino (secondo) e zirconia (quinto). Vengono mostrati i diversi gradi di traslucenza e di colore, modalità con cui è possibile nascondere il dispositivo o omogeneizzarlo al colore del dente [3].

Il filo, contrariamente agli afferraggi, necessita di caratteristiche meccaniche ben definite tramite una curva sforzo-deformazione, in modo che sia possibile prevederne il comportamento in modo accurato valutando gli sforzi generati dalla deformazione dello stesso filo. Principalmente le leghe attualmente utilizzate sono quattro, e per semplicità vengono di seguito riportate in Tabella 2.1.

In tempi più recenti vengono utilizzati anche archi non metallici, come per esempio polimeri rinforzati con ceramiche di vario genere. Rimane comunque un campo molto vasto, e per cui sarebbe necessaria una trattazione separata per riassumere tutti i materiali utilizzati e i metodi di connessione tra filo e afferraggi.

Tale metodo però, porta con sé molte complicazioni, sebbene nell'ultimo secolo sia stato largamente utilizzato in quanto considerato d'avanguardia e negli anni sempre migliorato, fino a giungere agli ultimi decenni in cui sia i materiali che lo studio del posizionamento degli ancoraggi ha portato all'ottenimento di risultati sempre

Materiale	Composizione	Modulo Elastico [GPa]
Acciaio Inox. Austenitico	17-20 % Cr, 8-12 % Ni, 0.15 % max. C	160-180
Cr-Co-Ni (Elgiloy Blue)	40 % Co, 20 % Cr, 15 % Ni, 15.8 % Fe, 7 % Mo, 2 % Mn, 0.15 % C, 0.04 % Be	160-190
β -Ti	77.8 % Ti, 11.3 % Mo, 6.6 % Zr, 4.3 % Sn	62-69
Ni-Ti	55 % Ni, 45 % Ti	34

Tabella 2.1: Leghe principali utilizzate per la produzione di fili per apparecchi ortodontici [3].

migliori con conseguente diminuzione delle problematiche relative a tale trattamento. Queste complicazioni riguardano principalmente l'igiene dentale, difficile da mantenere dopo l'applicazione dell'apparecchio, in quanto si formano maggiori punti ciechi dove risulta difficile la pulizia della dentatura. Unitamente a questo effetto, è possibile che lo stesso materiale di cui sono composti i componenti vada a creare complicazioni sia estetiche che funzionali, a causa della sua corrosione, come mostrato in Figura 2.7, dove i prodotti di corrosione si sono depositati sulla pasta adesiva, con conseguente diffusione e discolorazione del tessuto stesso del dente.



Figura 2.7: Discolorazione provocata dalla diffusione dei prodotti di corrosione dell'apparecchio prodotto in acciaio inossidabile AISI 316L [3].

Inoltre, un ulteriore svantaggio riguarda il comfort del paziente, che tramite l'utilizzo di un apparecchio fisso si riduce notevolmente, tanto a causa dell'ingombro di tale attrezzatura, quanto per il rischio di lesioni ai tessuti del cavo orale in caso di rottura o mal posizionamento dei componenti.

Si riporta di seguito (Figura 2.8) un caso di applicazione congiunta di materiali differenti sulle diverse arcate per quanto riguarda le brackets, mentre il filo risulta essere comunque metallico. Le combinazioni di materiali tra filo e brackets, come i materiali e i rivestimenti utilizzati, costituiscono un numero piuttosto alto di possibilità diverse, in cui però ritroviamo costanza nei parametri che condizionano questa scelta: resistenza meccanica e alla corrosione, ed estetica. Questi sono infatti gli unici parametri che condizionano tale scelta, mentre per quanto riguarda la pura funzionalità i limiti di mantenimento dell'igiene sono imposti dalla stessa tecnica, in particolare dall'impossibilità di rimuovere tali dispositivi e permettere una corretta igiene dentale.



Figura 2.8: Esempio di apparecchio fisso in cui vengono utilizzati due materiali differenti per gli afferraggi nelle due arcate.

2.3 Dispositivi Rimovibili

Nella precedente sezione viene descritto come uno dei problemi principali dei dispositivi permanenti riguardi l'impossibilità di operare una corretta igiene dentale, unita al disagio creato da un'eventuale rottura dell'apparecchio, evento che può facilmente causare lesioni all'interno del cavo orale. In alcuni casi particolarmente gravi, si rende necessaria la creazione di un apparato capace di sollecitare la dentatura con un campo di sforzi che difficilmente può essere creato tramite l'utilizzo di un archetto metallico fissato ai denti, in quanto quest'ultimo, sebbene permetta di

direzionare con maggior precisione le forze, non permette una distribuzione delle stesse molto delocalizzata, a causa della stessa natura dell'impianto che genera le forze applicate al singolo dente scaricando le reazioni sui denti adiacenti. Per questo motivo sono stati sviluppati, a partire dai primi anni del XIX secolo, degli apparecchi rimovibili, costituiti principalmente da un corpo in materiale plastico, che rappresenta il supporto, in cui può essere ricavata una sede con la forma del palato o della dentatura già allineata, su cui vengono fissati degli archi metallici che vanno a creare le spinte necessarie sui denti, in modo da spostarli sulla base del principio già esposto precedentemente. Il primo dispositivo utilizzato storicamente di questa tipologia fu opera di Friedrich C. Kneisel, ed è raffigurato in Figura 2.9.

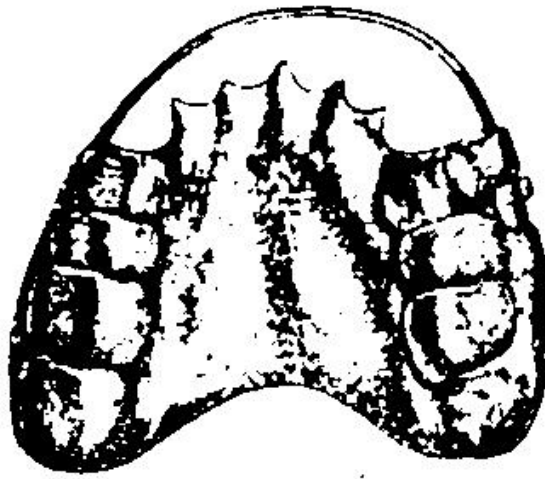


Figura 2.9: Friedrich Christoph Kneisel (1797-1847, Germania) fu probabilmente il primo ad applicare un apparecchio rimovibile [35]

Tramite l'utilizzo di un supporto in grado di sostenere le parti attive senza dovere obbligatoriamente fissare il dispositivo ai denti in modo permanente, è possibile mantenere un grado superiore di igiene dentale, in quanto è possibile rimuovere l'apparecchio nei momenti di necessità, e permettere al paziente stesso di intervenire in caso di rottura rimuovendo l'apparato. Inoltre, si apre una possibilità verso la modifica costante del trattamento, che viene operata tramite la piegatura e l'aggiustamento degli archi metallici, senza necessità di interventi invasivi per il paziente. Un esempio di tale dispositivo è mostrato in Figura 2.10.

Un altro aspetto da considerare sicuramente è il fattore estetico, per cui un apparecchio rimovibile diventa ideale, in quanto a necessità è possibile rimuoverlo, anche per qualche ora, senza perdere l'effetto del trattamento. Questo è sicuramente uno

degli aspetti fondamentali che ha portato, soprattutto i pazienti adulti, a preferire tale tecnica a discapito dell'utilizzo di un apparecchio fisso, che in qualsiasi occasione sarebbe stato visibile.

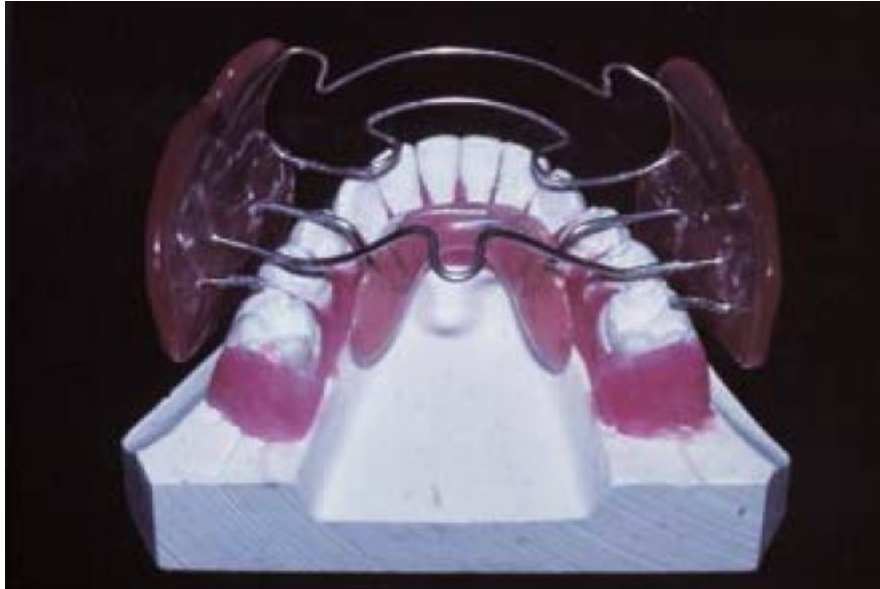


Figura 2.10: Apparecchio rimovibile in cui gli archi metallici vengono utilizzati per l'apertura dell'arcata ed il riallineamento della dentatura [27]

La libertà di poter rimuovere quando necessario l'apparecchio, se da un lato risulta essere un beneficio, dall'altro sfocia nel delegare al paziente la responsabilità di seguire il regime del trattamento, che non sempre viene rispettato, trascorrendo irresponsabilmente lunghi lassi di tempo senza indossare il dispositivo. In questo caso ovviamente l'efficacia del trattamento sarà ridotta, rendendo dunque la possibilità di rimozione uno svantaggio.

Un fattore di svantaggio ulteriore è costituito dalla difficoltà intrinseca degli apparecchi rimovibili di generare forze su due punti di ancoraggio, creando dunque campi complessi di forze. Infatti, se per gli apparecchi fissi risulta complesso delocalizzare le forze generate su denti che non siano adiacenti a quello di interesse, per i dispositivi rimovibili è complicato ottenere delle strutture in grado di creare forze su più punti sul singolo dente, obiettivo che richiederebbe l'utilizzo di un numero elevato di archi. Tale differenza si può notare comparando gli schemi in Figura 2.4b, per gli apparecchi fissi, e in Figura 2.11, per gli apparecchi rimovibili. Si intuisce facilmente come nel caso dei dispositivi fissi una forza di torsione sia facilmente generata tramite il posizionamento laterale all'asse del dente della bracket fissata allo stesso.

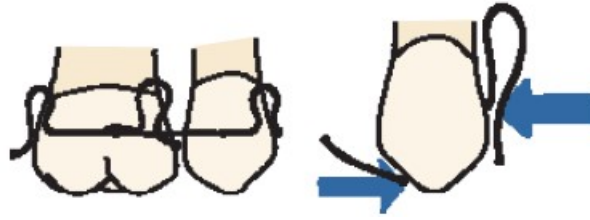


Figura 2.11: La necessità di utilizzo di più archi rende di difficile esecuzione la creazione di forze su più di un punto tramite l'utilizzo di apparecchi rimovibili [27].

Si giunge dunque alla conclusione che entrambe le tipologie di apparecchio, fisso e rimovibile, hanno vantaggi e svantaggi, e addentrandosi maggiormente nella materia e nello studio di casi specifici, si nota inevitabilmente come queste due categorie non ricoprono esattamente lo stesso ruolo, pur avendo lo stesso scopo. Casi differenti richiedono trattamenti differenti, e il percorso offerto da un apparecchio fisso è applicabile a determinati casi per cui un apparecchio rimovibile non risulta essere adatto, e viceversa. La ricerca di una soluzione unica, insieme con la crescente necessità di un miglioramento estetico di questi dispositivi, ha portato nel tempo alla produzione di apparecchi in grado di coniugare tutti questi aspetti. Nel corso degli anni '80 del XX secolo, le tecniche di termoformatura a vuoto subirono una grande spinta tecnologica, e, con questa premessa, negli stessi anni sono stati prodotti i primi apparecchi dentali termoformati, che prendono da qui in avanti il nome di allineatori, poiché inizialmente in grado solo di trattare casi semplici di disallineamento.

2.4 Allineatori Termoformati Trasparenti

L'efficacia nell'utilizzo di allineatori termoformati risiede nella possibilità di gestire in modo pressoché totale la distribuzione delle forze sul dente. Il principio fondante su cui si basa è la possibilità, essendo l'apparecchio costituito da una mascherina che avvolge integralmente la dentatura, di utilizzare l'intera arcata come appoggio relativo per ogni singolo dente. In questo modo è possibile, tramite la manipolazione dello stampo su cui viene termoformato l'allineatore o dell'allineatore stesso, regolare con buona tolleranza le forze e le direzioni di queste ultime, che il dente subirà, ottenendo così un risultato ottimale, e rendendo possibile il trattamento di casi complessi tramite la previsione con basso scarto, dell'effetto del processo di allineamento. Numerosi studi sono stati svolti in questo senso per determinare la

modalità e l'intensità nella trasmissione delle forze dall'allineatore alla dentatura, soprattutto considerando l'aspetto relativo allo spessore del dispositivo [10, 18]. La produzione di tali dispositivi inizia con la costituzione di uno stampo, solitamente tramite la ricostruzione del positivo di un'impronta dell'arcata da trattare rimodellata seguendo gli spostamenti previsti dal trattamento, su cui successivamente viene termoformato l'allineatore. Nei primi anni di sviluppo di questa tecnica, come anticipato precedentemente, la deviazione dalla dentatura originale, e quindi la generazione delle spinte, veniva eseguita tramite la deformazione dello stesso allineatore, pratica che richiedeva abilità nell'esecuzione e che risultava comunque in un processo poco preciso, oltre ad impossibilitare il trattamento di casi in cui veniva richiesto un grande e complesso spostamento. Tale passaggio veniva effettuato costantemente nel tempo, seguendo passo dopo passo lo spostamento dei denti, risultando così in un trattamento con un basso grado di accuratezza.



Figura 2.12: Allineatore prodotto termoformando una piastra di materiale polimerico su uno stampo prodotto tramite stereolitografia (<https://www.3dz.it/wp-content/uploads/2018/10/Invisalign-clear-aligners.jpg>).

Al fine di ovviare a tale problematica, nel corso del decennio successivo al 1990, Align Technology sviluppò un software in grado di computerizzare il processo di valutazione della deformazione dell'allineatore dalla dentatura di partenza fino ad arrivare all'obiettivo finale del trattamento, suddividendo il processo completo in più passaggi, e dunque con la generazione di molteplici allineatori da utilizzare in

serie. Questo nuovo metodo portava con sé il vantaggio di uno spostamento progressivo e preciso, in cui il dente è accomodato in modo continuo fino a raggiungere la sede finale [27]. Inoltre, lo stampo su cui viene termoformato l'allineatore viene stampato tramite tecniche di prototipazione rapida per stereolitografia, e considerando che le tolleranze tipiche di questa tecnologia sono dell'ordine di grandezza dei micrometri, l'accuratezza finale del prodotto di termoformatura raggiunge un livello estremamente alto. Una ricerca condotta dallo StereoLithography User Group, associazione nata allo scopo di regolamentare la tecnologia nata negli anni '80, mostra il grado di accuratezza raggiungibile da una stampante stereolitografica in una parte standard, mostrata in Figura 2.14 e che prende il nome di "User-Part" [12]. Dal grafico riportato in Figura 2.13 si nota facilmente che al più le parti si discostano dal modello teorico, creato tramite software CAD, di una quantità inferiore ai 20 μm , con un netto picco nell'intorno positivo di 0 μm . Tali tolleranze permettono dunque una qualità superiore del trattamento ortodontico, poiché conoscendo con accuratezza il prodotto finale se ne possono prevedere con ottima precisione le proprietà meccaniche.

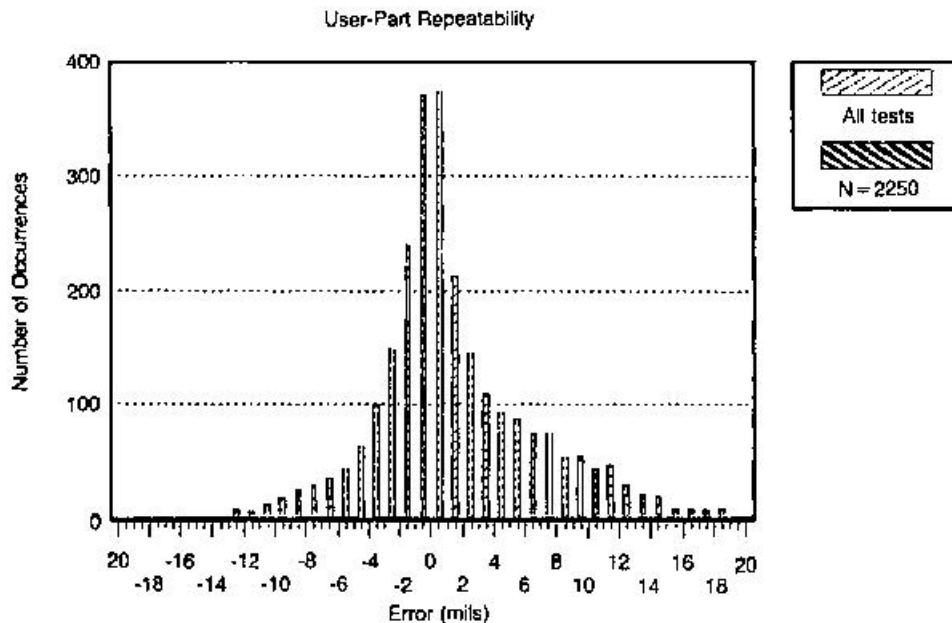


Figura 2.13: Il grafico prodotto dalle ricerche dello StereoLithography User Group mostra l'alto grado di accuratezza. Tolleranze nell'ordine dei 20 micrometri per un allineatore dentale sono ampiamente accettabili, in quanto non vanno a creare sforzi che possano comprometterne le funzionalità [12].

Un'ulteriore implementazione di tale metodo, soprattutto nel caso in cui sia necessario imporre un movimento del dente tramite una forza orientata parallelamente

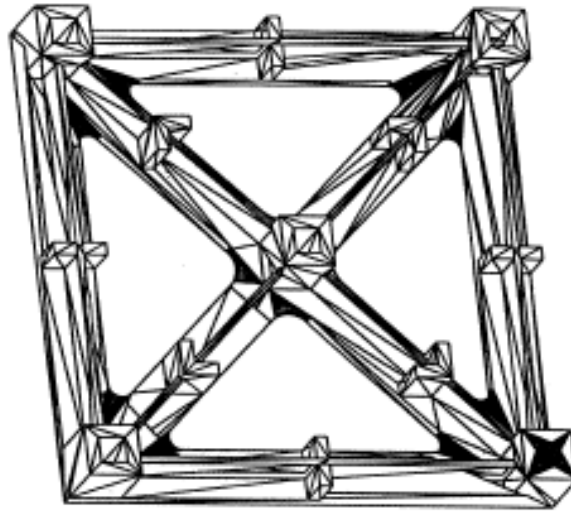


Figura 2.14: Immagine ritraente il modello della "User-Part", modello standardizzato utilizzato dallo Stereolithography User Group per la valutazione dell'accuratezza di stampa. Grazie all'alto numero di tipologie differenti di superfici è possibile valutare anche la qualità di stampa [4].

alla superficie dello stesso, risiede nell'utilizzo di appigli costituiti di pasta adesiva (Figura 2.15), che vengono depositati sul dente con una forma utile a rendere prensile per l'allineatore tale sporgenza. In questo modo è possibile simulare il comportamento di un apparecchio fisso, applicando campi di forze complessi rispetto alla semplice pressione sul dente [11].

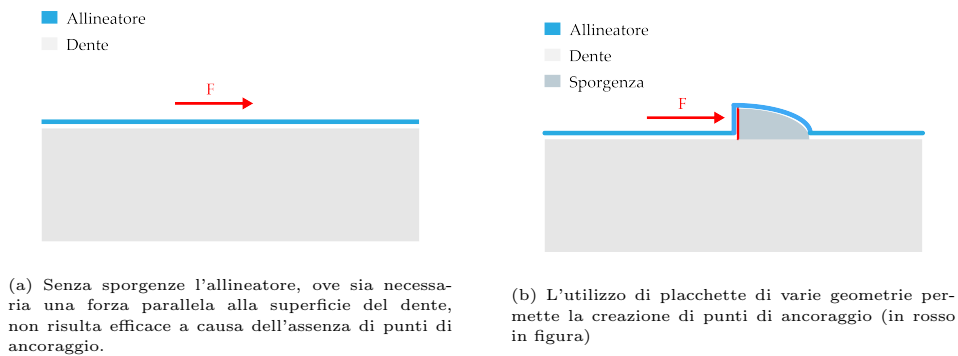


Figura 2.15: Schemi comparativi dell'utilizzo di placchette di ancoraggio per gli allineatori termoformati.

Questa tecnica è prevalentemente utilizzata in casi in cui è reso necessario uno spostamento piuttosto complesso o l'applicazione di forze elevate, come nell'esempio rappresentato in Figura 2.16 in cui un canino necessita di un trattamento di derotazione, eseguibile solo tramite l'utilizzo di sporgenze a cui vengono applicate

forze opposte per creare momento (vettori azzurri), e di diversa entità, per originare una traslazione concomitante (vettore rosso). Normalmente, tuttavia, può essere sfruttata la curvatura del dente, ricordando sempre che l'allineatore termoformato ha la possibilità di gestire il campo di forze applicato in modo pressoché completo, grazie alla natura del dispositivo stesso che avvolge completamente la dentatura.

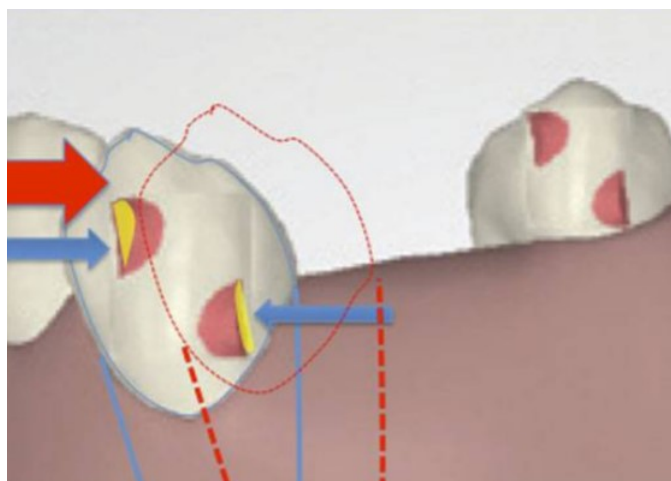


Figura 2.16: Schema di un trattamento di derotazione di un canino tramite l'utilizzo di sporgenze ellittiche. Il momento rotante è generato dalle componenti azzurre, mentre la traslazione dalla componente rossa (nulla sulla placca di destra) [11].

Ovviamente lo sforzo sulla superficie di tali sporgenze viene generato con la stessa tecnica con cui vengono messi in tensione i denti, quindi producendo uno stampo per la termoformatura che consideri la presenza di queste placchette e dello spostamento delle sedi necessario a metterle in tensione.

L'aspetto costantemente presente rimane la ricerca di un buon grado estetico, e grazie all'utilizzo, nella deposizione di tali sporgenze sopra la superficie del dente, di paste con colorazione simile a quella della dentatura, è possibile rendere il contrasto visivo nettamente inferiore a quello riscontrabile in altre tecniche, per cui un allineatore trasparente utilizzato in concomitanza con degli afferraggi aggiuntivi che possiedono la stessa colorazione del dente risulta essere la soluzione ideale.

Riassumendo, gli allineatori trasparenti non possono ancora oggi essere utilizzati per casi particolarmente complessi, ma sono in generale un ottimo compromesso tra un apparecchio fisso, dal basso comfort e poco estetico, ed un apparecchio rimovibile, con cui spesso risulta complicato generare movimenti rotativi dal punto di vista della produzione dello stesso. In questo senso, la produzione degli allineatori trasparenti per termoformatura risulta ancora oggi un processo lungo, che

comprende molti passaggi e che soprattutto produce una grande quantità di scarti non riciclabili, a causa della natura del processo di produzione degli stampi che utilizza resine fotopolimerizzanti che una volta reticolate non possono più essere riportate allo stato originale o essere impiegate in cicli secondari. Trattandosi inoltre di un trattamento che prevede l'utilizzo di più allineatori diversi, ognuno dei quali viene prodotto da uno stampo dedicato, la quantità di sfrido prodotta per paziente risulta essere davvero consistente. Quest'ultimo è ad oggi sicuramente un problema di grande interesse, in un'ottica di riduzione nella produzione di scarti di materie plastiche nel tentativo di rendere i processi industriali maggiormente ecosostenibili.

Per i motivi sopra elencati, un processo di stampa diretta degli allineatori, anziché degli stampi, sarebbe da preferire in linea di massima. Tale è la base su cui si fonda il presente lavoro.

2.5 Allineatori Trasparenti da Processi di Prototipazione Rapida

La stampa di allineatori trasparenti tramite tecniche di prototipazione rapida è stata indagata in precedenti lavori, principalmente tramite l'utilizzo di tecniche di stampa stereolitografica, preferite per l'accuratezza dei modelli prodotti. Molti tra questi processi sono protetti da brevetto [1, 30], e molti altri sono in fase di sviluppo, avanzamento rispetto ad altre tecniche dovuto principalmente alla grande disponibilità di resine trasparenti per stereolitografia, ed all'accuratezza dimensionale di tale tecnica. Inoltre, le tecniche di prototipazione rapida permettono la creazione di allineatori, ed oggetti qualsiasi più in generale, anche in presenza di sottosquadri nella geometria voluta, vantaggio molto importante nel caso di disallineamenti particolari dei denti e creazione delle sedi per le sporgenze citate in Sezione 2.4, forme talvolta difficili da ottenere tramite un processo di termoformatura o che nel caso in cui sia possibile ottenere creano una variazione eccessiva nello spessore del materiale di partenza, condizionandone le proprietà. I vantaggi della stampa 3D risiedono dunque, per quanto riguarda la geometria, nell'accuratezza [16], nel controllo dello spessore e della sua distribuzione nel pezzo, e nella possibilità di stampare con estrema precisione anche dei sottosquadri [15], questi ultimi tramite supportazione in fase di slicing.

Purtroppo il processo di prototipazione rapida porta con sé anche delle problematiche specifiche, in particolar modo la struttura stratificata generata dalla stampa

layer-by-layer è sempre presente nella parte, sulla superficie intera o parzialmente. Tale caratteristica, sebbene infici in quantità pressoché insignificante l'accuratezza dimensionale, danneggia l'aspetto estetico dell'allineatore così prodotto. Questo aspetto risulta negativo soprattutto nel paragone con gli allineatori termoformati, che mostrano trasparenza praticamente totale. Un ulteriore problema sorge osservando le caratteristiche meccaniche tipiche dei materiali trasparenti disponibili per la stampa, considerando in particolar modo le resine fotoindurenti, che risultano troppo rigide, non permettendo quindi la produzione di oggetti adatti alla vendita al paziente e ad un utilizzo quotidiano da parte di quest'ultimo. Questo aspetto potrebbe essere sorpassato tramite l'utilizzo di tecniche diverse dalla stampa stereolitografica di resine fotoindurenti, quali le tecnologie FDM (Fused Deposition Modeling), per cui materiali trasparenti e flessibili sono disponibili, a discapito però della precisione di stampa, che, come verrà discusso più avanti, eccede quelli che sono i limiti entro cui è possibile ottenere una buona qualità nel trattamento.

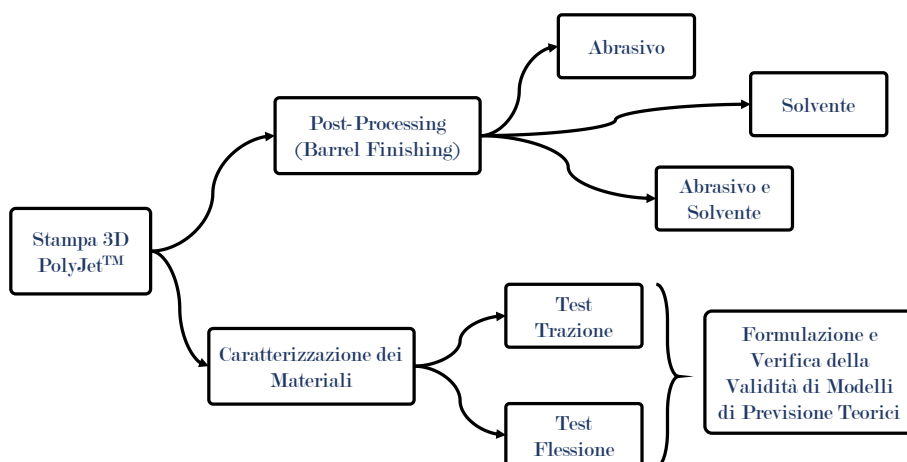


Figura 2.17: Diagramma rappresentante il programma del presente lavoro.

Da un punto di vista estetico, dunque, senza dubbio la stampa diretta con tecniche di prototipazione rapida mostra un grosso ostacolo, soprattutto considerando i benefici ottenibili con tale tecnica in termini di qualità del trattamento, economici e di sostenibilità ambientale. Il proposito del presente lavoro, infatti, è principalmente la produzione tramite tecniche di prototipazione rapida di allineatori dentali utilizzando materiali trasparenti, la loro caratterizzazione meccanica, e l'ottenimento di un buon grado di finitura superficiale, tentando l'eliminazione

della struttura stratificata eventualmente visibile sulla superficie. L'intero progetto, nelle sue fasi, è riassunto in Figura 2.17. Il lavoro si suddivide in due percorsi principali, paralleli ma che congiungono entrambi nell'obiettivo di stampare allineatori tramite tecniche di rapid prototyping che abbiamo una finitura superficiale che permetta una traslucenza quasi totale, una resistenza meccanica sufficiente per rendere il trattamento efficace e una flessibilità adeguate ad un oggetto adatto alla vendita al pubblico. In questo senso, una prima parte del lavoro è concentrata sulla caratterizzazione di nuovi materiali stampati tramite tecnologia PPJ PolyJetTM, ottenuti tramite stampa multi-materiale di due diversi materiali al fine di raggiungere caratteristiche meccaniche migliori nel prodotto finito, incrementandone la resistenza a flessione senza compromettere la stabilità meccanica.

In un secondo momento, tali materiali sono stati utilizzati per la stampa di allineatori dentali, e successivamente sottoposti ad un trattamento di finitura tramite un apparato sperimentale prodotto appositamente per questo lavoro, con l'obiettivo di aumentarne le proprietà di trasparenza. Nel prossimo capitolo saranno analizzati i progressi fatti in questo senso, indagando quello che è lo stato dell'arte della stampa tramite tecniche di fabbricazione additiva di allineatori dentali trasparenti.

Capitolo 3

Stampa 3D di Dispositivi Ortodontici : Stato Dell'Arte

Nel capitolo precedente, sono state brevemente indicate le diverse tipologie di apparecchi e allineatori, considerando i vantaggi e gli svantaggi di tre tipologie di dispositivo, prese ad esempio tra le tante, e rappresentative delle categorie principali di dispositivi. Vengono di seguito elencate :

- Apparecchi Fissi
- Apparecchi Rimovibili
- Allineatori Termoformati

Un'altra tipologia citata è quella degli allineatori stampati tramite stampa diretta. A riguardo però non esistono ancora linee guida certe, in quanto si tratta di un prodotto ancora in fase di sviluppo, o almeno i cui processi produttivi non sono ancora resi noti. Sono stati prodotti dispositivi dentali stampati con tecniche di prototipazione rapida con caratteristiche molto simili ad allineatori termoformati e che vengono utilizzati per trattamenti ortodontici, ma ad oggi risultano ancora ingombranti e vistosi esteticamente, motivo per cui non sono utilizzabili come "clear aligners", ovvero dispositivi pressoché invisibili ed utilizzabili senza che siano eccessivamente visibili. Tali prodotti rimangono comunque molto recenti [28], seguendo il ritmo delle ricerche per la produzione di nuovi materiali e di nuove tipologie di resine trasparenti adatte al compito, che solo recentemente sono state sviluppate.

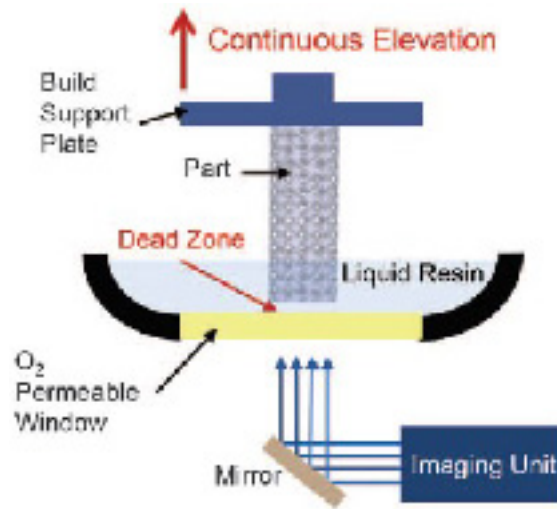


Figura 3.1: Schema del processo di stampa in continuità. Il fondamento di tale tecnologia è la creazione di una zona morta in cui la resina non polimerizza a causa dell'alta pressione parziale di ossigeno, dovuta all'alta diffusività dello strato di PDMS sul fondo della vaschetta, che si trova a diretto contatto con l'atmosfera nel lato opposto alla resina [33].

L'utilizzo di materiali trasparenti non risulta però sufficiente al raggiungimento della trasparenza richiesta per il prodotto finale, in quanto l'utilizzo di tecniche di manifattura additiva produce oggetti in cui la superficie risulta essere altamente rugosa, mostrando la struttura stratificata dei diversi layer. In questo senso alcuni lavori sono stati svolti su delle tipologie di stampa in continuità, e quindi senza la necessità di creare uno strato ad ogni passaggio [33], anche se purtroppo l'applicabilità di tali metodi per la stampa di allineatori trasparenti rimane di difficile verifica e richiederebbe una trattazione separata.

Dunque il problema principale nella stampa tramite prototipazione rapida di allineatori trasparenti è la ricerca di un materiale, e con esso una tecnologia, adatto alla produzione di "clear aligners". In questo capitolo vengono trattate le possibilità ad oggi esplorate in tale senso, iniziando da una breve serie di considerazioni sull'utilizzo di stampanti 3D in campo ortodontico, per poi indagare le caratteristiche di tali tecniche e le soluzioni possibili suddividendo i vari tentativi di correzione dei difetti svolti sulla base della tecnologia di prototipazione rapida utilizzata. Successivamente verranno fatte considerazioni a riguardo di studi precedenti svolti su diverse tecniche di post-processing, applicate su parti generiche stampate, in quanto veramente poco lavoro è stato svolto specificatamente sugli allineatori trasparenti.

3.1 Additive Manufacturing nell'Ortodonzia

In campo ortodontico sono molte le stampanti utilizzate normalmente, ma tutte possono essere ricondotte a cinque principali tecnologie:

- StereoLithography Apparatus (SLA)
- Binder Jetting (BJ)
- Material Jetting (MJ)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Fused Deposition Modeling (FDM)

Queste rappresentano insieme la totalità delle tecniche utilizzate in campo ortodontico [7], perlopiù per la produzione di guide chirurgiche, supporti di posizionamento e bite dentali, e non di allineatori trasparenti. Il materiale utilizzato dipende dalla tecnologia di stampa adottata, per cui nel caso di tecniche SLA, DLP e MJ i materiali sono resine fotoindurenti, per quanto riguarda le BJ si utilizzano delle polveri che vengono tenute insieme da un legante per poi sinterizzare la parte così costituita e nelle tecnologie FDM un filo di materiale termoplastico viene fuso, estruso e depositato creando così la parte, uno strato per volta. Nei prossimi paragrafi, considerando le diverse tecniche singolarmente, verranno indagati i tentativi di stampa di materiali trasparenti con le tecniche sopra citate, fatta eccezione per le tecniche di Selective Laser Sintering, poco utilizzate nel campo della stampa di polimeri.

3.1.1 SteroLithography Apparatus

Le tecniche di stampa 3D stereolitografiche sono state le prime ad essere implementate e di conseguenza la tecnologia a disposizione riesce a restituire risultati sorprendenti. In campo ortodontico le stampanti maggiormente utilizzate sono di produzione DWS Systems (<https://www.dwssystems.com/>) e FormLabs (<https://formlabs.com/>), e per ottenere i risultati migliori è consigliabile utilizzare le resine proprietarie. In particolare i materiali identificati come i migliori per stampare allineatori trasparenti sono DS 3000, prodotta dalla DWS, e la Dental LT Clear di FormLabs. Queste resine, oltre a possedere un alto grado di trasparenza, sono certificate per l'utilizzo nel cavo orale per un tempo limitato. In particolare la resina Dental LT Clear, mostrata in Figura 3.2, è certificata come materiale

di categoria IIa come previsto dalla Regola 5, Annesso IX, Dir.93/42/EEC, che ne permette l'utilizzo in sicurezza per un tempo inferiore a 30 giorni nel cavo orale, rendendo questo materiale perfetto per la produzione di allineatori dentali [15], condizione fondamentale poiché ogni allineatore deve essere indossato per un periodo di tempo intorno alle due settimane.



Figura 3.2: Bite occlusale stampato utilizzando Dental LT Clear. L'immagine mostra l'utilizzo più comune di tale resina. (<https://dental.formlabs.com/it/materials/#dental-lt-clear>)

Le limitazioni principali in questo caso sono i tempi di produzione necessari ad un apparato stereolitografico per la stampa e i costi dei materiali e dei macchinari, sebbene tale tecnologia rimanga la migliore in termini di qualità del prodotto finito. Tale precisione è dovuta al principio di funzionamento della stampante, che produce le parti tramite la scansione della resina con un laser di dimensioni molto ridotte (circa $10 \mu\text{m}$ di diametro) e ad alta intensità (Figura 3.3a), che permette quindi alta precisione nella formazione degli strati ed omogeneità tra essi. La scansione tramite un fascio laser con un diametro molto ridotto aumenta dunque l'accuratezza, ma compromette la velocità di stampa in quanto la polimerizzazione di un layer richiede che tutta la superficie che lo costituisce venga scannerizzata, orientando il laser tramite degli specchi basculanti, con una velocità di scansione che determina lo spessore di polimerizzazione. Tale proprietà può essere espressa tramite l'Equazione 3.1 [9], la cui legenda è espressa in Tabella 3.1.

$$C_d = D_p \ln \left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 V_s E_c} \right] \quad (3.1)$$

Parametro	Descrizione	Unità di Misura
C_d	"Curing Depth", rappresenta lo spessore dello strato di resina polimerizzata	mm
D_p	Costante sperimentale della formula, rappresenta la profondità di penetrazione per cui l'irraggiamento si riduce a $\frac{1}{e}$	mm
V_s	Velocità di scansione	mm/s
W_0	Raggio del fascio laser puntato sulla resina	mm
P_L	Potenza erogata dal laser	W
E_c	Esposizione critica, espressa in termini di energia per unità di superficie, per cui la resina inizia a polimerizzare	mJ/mm ²

Tabella 3.1: Parametri riferiti all'Equazione 3.1.

L'Equazione 3.1 è la formula portante della tecnologia stereolitografica, e viene utilizzata per la costruzione di una curva di lavoro sperimentale al fine di calibrare l'apparato e conoscere gli spessori dei layer formati in funzione della velocità di scansione in modo da ottimizzare la stampa, riducendo la dimensione del singolo layer appena sotto alla soglia del valore di C_d , garantendo così la continuità della parte stampata [9].



(a) Schematizzazione del processo di stampa tramite stereolitografia, in cui un laser riflesso su degli specchi basculanti che ne permettono l'orientamento scannerizza la resina facendola fotopolimerizzare.

(b) Schema di un macchinario DLP in cui un proiettore illumina la superficie corrispondente al layer da costruire.

Figura 3.3: Rappresentazione delle tecniche di stampa stereolitografica maggiormente utilizzate (<http://forum.kkrobotic.com/3d-printing-technology-comparison-sla-vs-dlp/comparison-sla-vs-dlp/>).

Per ridurre i tempi di stampa, una tecnica simile che permette la stampa di uno strato dell'oggetto in un singolo istante è la Digital Light Projection (DLP), che ha la possibilità di stampare la stessa tipologia di materiali stampabili tramite

SLA. Questa tecnica utilizza un proiettore, o in alcuni macchinari uno schermo, per illuminare l'area da stampare, e quindi evitare di dover scannerizzare con un laser tale area, processo che, sebbene risulti maggiormente preciso, richiede tempi maggiori. Come mostrato in Figura 3.3b, un proiettore illumina la resina dal basso e attraverso la vasca dove essa è contenuta, creando l'immagine del layer tramite un Digital Micromirroring Device (DMD) che permette di gestire singolarmente ogni pixel che compone l'immagine in termini di intensità luminosa, e quindi di penetrazione della radiazione nella resina. Questo si traduce nella possibilità di gestire in zone diverse dello stesso layer l'intensità e lo spessore, proprietà che può essere infatti utilizzata per creare dei layer che esternamente, e quindi sui bordi corrispondenti alla superficie del pezzo finale, seguano la pendenza dell'oggetto da stampare, eliminando così in parte la struttura stratificata tipica delle parti stampate con tecniche di prototipazione rapida. Questa tecnica prende il nome di "dithering", dal processo di riduzione del rumore nella teoria dei segnali. In Figura 3.4 è rappresentato il principio fondante dei metodi di dithering.

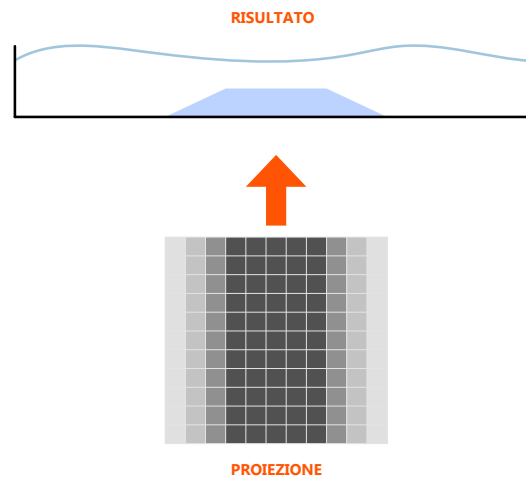
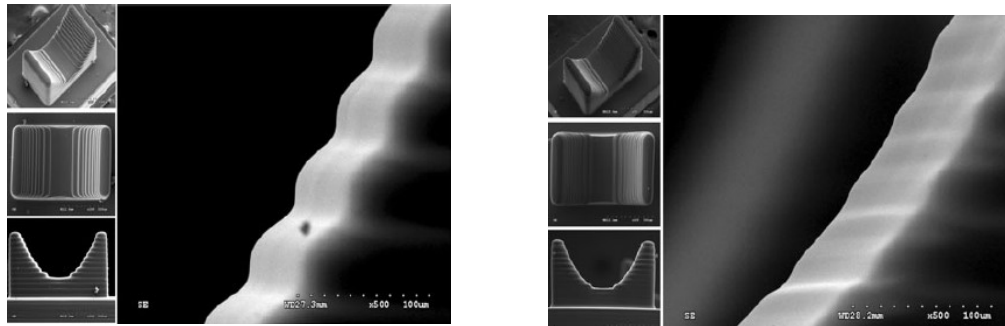


Figura 3.4: Esempio di processo di dithering. La matrice in figura rappresenta i pixel dell'immagine proiettata, in cui le zone più chiare costituiscono i pixel con intensità minore da cui zone a spessore ridotto. I pixel scuri rappresentano invece le zone a luminosità massima per cui quindi lo spessore risultante del layer è il più alto ottenibile.

Ricerche in questo senso sono state svolte ottenendo ottimi risultati [26], mostrati in Figura 3.5. Si osserva come la superficie inclinata rispetto alla direzione di stampa risulti di una qualità nettamente superiore nel caso di utilizzo di un metodo di dithering, come mostrato in Figura 3.5b, paragonato alla stampa tradizionale (Figura 3.5a). Considerando la scala di osservazione si nota come tale

metodo permetta un controllo dell'inclinazione molto preciso e a scala micrometrica. Infatti, per lo studio di tale tecnica, sono stati stampati dai ricercatori dei campioni con profilo parabolico, in modo da potere verificare l'applicabilità per diverse inclinazioni della superficie, che è stata poi confermata [26].



(a) Superficie parabolica stampata con tecnica tradizionale. Normalmente il layer è prodotto utilizzando solamente pixel con intensità massima e con intensità nulla, che indicano rispettivamente le zone di stampa e le zone vuote.

(b) Superficie stampata utilizzando un metodo di dithering, in cui i pixel sui bordi dei layer hanno intensità minore, effetto che crea una struttura inclinata alle estremità e che segue il profilo del pezzo finale.

Figura 3.5: Comparazione tra provini identici stampati con metodo tradizionale (a) e con layer prodotti tramite metodi di dithering (b).

Un altro metodo per ridurre la rugosità e i segni di stampa, meno elaborato ma di facile esecuzione, è l'utilizzo della resina residua alla fine della stampa, che viene fatta reticolare tramite irraggiamento UV senza essere rimossa, lasciando così la superficie meno rugosa per effetto della tensione superficiale che rende omogeneamente distribuita la resina liquida. Nel momento in cui l'oggetto viene prodotto tale processo può essere utilizzato indipendentemente dalla tipologia di stampante. I due approcci possibili per le stampanti DLP sono mostrati in Figura 3.6, e sono l'approccio "bottom-up", in cui il proiettore irraggia dal fondo della vasca che contiene la resina, e l'approccio "top-down" in cui la radiazione incide direttamente sulla resina esposta all'atmosfera. L'approccio bottom-up è da preferire in quanto nell'altro caso la resina è esposta all'atmosfera e la presenza di ossigeno inibisce in parte la reticolazione del materiale. Anche nell'approccio bottom-up questo fenomeno avviene ma riguarda solo uno strato micrometrico sul fondo della vasca sopra a cui è depositato uno strato antiaderente, tipicamente in Polidimetilossano (PDMS), che sfrutta la presenza di ossigeno al suo interno per ridurre l'adesione della resina al fondo stesso della vasca.

In entrambi i casi, una possibilità per rendere la superficie finale della parte meno rugosa è l'utilizzo della resina residua sulla parte stampata, che se lasciata sopra al pezzo a colare forma dei menischi (Figura 3.7 [25]) la cui forma può essere

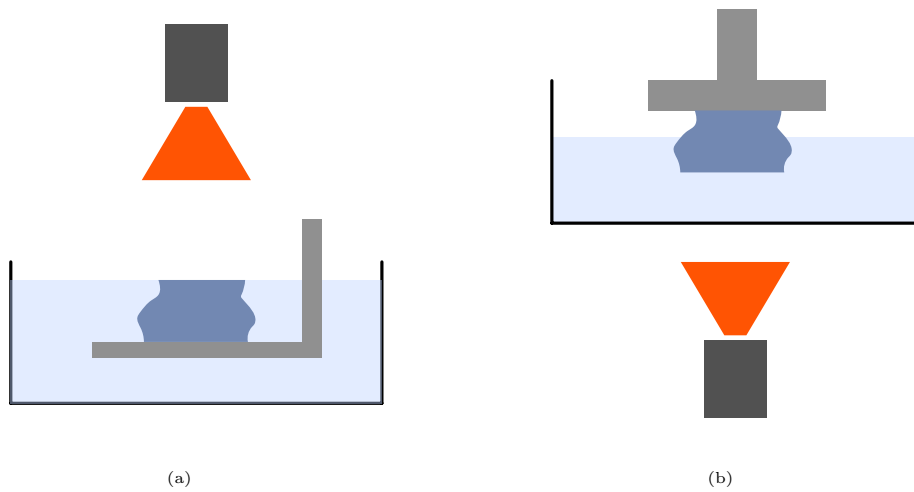


Figura 3.6: Schemi di funzionamento delle due filosofie costruttive delle stampanti DLP: top-down (a) e bottom-up (b)

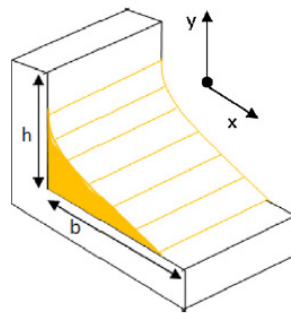


Figura 3.7: Schematizzazione di un menisco formato nel gradino tra un layer e il successivo.

prevista teoricamente, con la possibilità di calcolare la rugosità finale della parte. Successivamente viene eseguito il processo di post-curing con luce UV in modo da fare reticolare completamente il pezzo e la resina in eccesso residua. In questo modo vanno ad eliminarsi i gradini tra un layer e il successivo, donando un aspetto maggiormente lucente alla parte, che nel caso degli allineatori si traduce in una maggiore trasparenza. Purtroppo non esistono in letteratura ricerche riguardanti tale metodo applicato alla stampa di allineatori trasparenti.

I risultati di tale metodo (Figura 3.8) sono promettenti [25], anche se non permettono l'ottenimento di un grado di accuratezza paragonabile ai metodi di dithering, in quanto la resina in eccesso va ad aggiungersi alla parte stampata, aggiungendo spessore, nonostante le ricerche mostrino come, se eseguito successivamente ad una valutazione sulla dimensione dei menischi, vada a riempire solo i gradini, lasciando



Figura 3.8: Risultati dell'utilizzo della resina residua per la formazione di menischi nei gradini dei layer [25]. Il campione M1 è stato stampato con la tecnica tradizionale e mostra evidenti segni di stampa costituiti dai gradini tra i layer, mentre il provino M2 è stato sottoposto a post-curing senza la rimozione della resina residua. Il risultato nel caso del provino M2 è di una superficie perfettamente liscia.

la dimensionalità dipendente dagli spigoli dei layer, che appartengono alla superficie del modello della parte, non compromettendo eccessivamente l'accuratezza finale.

Riassumendo, l'utilizzo di una stampante DLP è vantaggioso sicuramente dal punto di vista delle tempistiche di produzione, oltre che per i costi dell'apparato di stampa che sono in un rapporto mediamente di circa 1:10 con i costi di un macchinario SLA. Per questo motivo l'ultimo metodo presentato, che sfrutta l'immersione del pezzo nella resina e il successivo colaggio, è stato testato utilizzando la tecnologia DLP, ma è utile precisare che in linea di principio potrebbe essere utilizzato anche in successione ad un processo di stampa SLA. Anche i metodi di dithering potrebbero essere utilizzati con una stampante SLA, ma per la natura della tecnica, che come accennato [precedentemente](#) regola lo spessore del layer con la velocità di scansione e non con l'intensità del laser, sarebbe estremamente difficile e necessiterebbe di una complessa trattazione.

In Tabella [3.2](#) è presentato un riassunto dei processi di stampa stereolitografica con vantaggi e svantaggi di ogni tecnica.

3.1.2 Binder Jetting

Questa tecnologia sfrutta l'utilizzo di un legante che viene depositato su un letto di polveri del materiale da stampare, spruzzato nelle zone dove deve essere stampato l'oggetto (processo in Figura [3.9](#)). Essendo una tecnica poco utilizzata, viene qui considerata per completezza e per la possibilità che offre di una stampa senza supporti, risultanti in un prodotto privo di imperfezioni derivanti dalla rimozione di questi ultimi [9]. Lo stesso metodo può essere utilizzato per stampare oggetti

Tecnica	Vantaggi	Svantaggi
SLA	Accuratezza dimensionale e qualità del prodotto finito, layer molto sottili	Processo difficilmente gestibile e modificabile, costoso
DLP	Semplicità del processo e velocità elevata, con processi di dithering immagini da proiettare (layer) facilmente generabili da STL, processo economico	Accuratezza dimensionale inferiore

Tabella 3.2: Riassunto delle tecniche di stereolitografia con vantaggi e svantaggi.

depositando una miscela di polimero e legante, tramite delle testine, sotto forma di gocce su un piano, e dunque con la necessità in questo caso di prevedere l'aggiunta di supporti per sostenere le zone ad inclinazione maggiore.

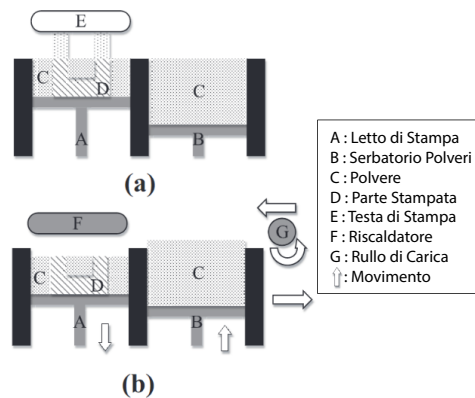


Figura 3.9: Schema di funzionamento del processo di Binder Jetting. Nella fase di stampa (a) il legante viene spruzzato nei punti di stampa, mentre in una seconda fase di consolidamento (b) il legante viene fatto indurire dando consistenza alla zona stampata [5].

In entrambi i casi la qualità della parte stampata rimane comunque molto bassa, almeno in termini di trasparenza, motivo per cui sono da preferire altre tecnologie. Nonostante la bassa accuratezza, tuttavia, una volta eliminato il legante dal materiale, esso rimane poroso, essendo prodotto da polveri che vengono fatte sinterizzare successivamente alla stampa e all'evaporazione del legante, permettendo

un eventuale processo di infiltrazione di resina che incrementa particolarmente le caratteristiche di trasparenza del materiale. La resina per l'infiltrazione in questo caso deve avere un indice di rifrazione il più possibile corrispondente al valore del materiale di cui sono composte le polveri, con l'obiettivo di ridurre al minimo la rifrazione della luce attraverso il materiale, che nel caso in cui la resina avesse valore dell'indice di rifrazione differente dal materiale base renderebbe la parte opaca a causa delle molte interfacce che si verrebbero a creare tra le particelle e la resina, come mostrato schematicamente in Figura 3.10.

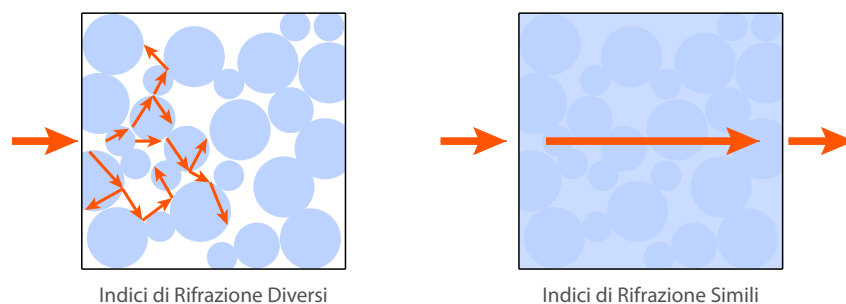


Figura 3.10: La rifrazione della luce dipende dalla differenza tra l'indice di rifrazione della resina e quello delle polveri. Se la differenza è troppo alta l'effetto sarà di opacizzazione, a causa del valore di riflettanza più alto all'interfaccia resina-particella che produrrà la dispersione della luce internamente al materiale.

Come precisato questo metodo rimane poco accurato e l'ottenimento di un buon grado di trasparenza prevede un processo relativamente complicato se comparato ai processi richiesti da parti prodotte tramite altre tecniche. Principalmente per tali motivi la ricerca, per quanto riguarda la stampa di polimeri trasparenti, si orienta ad altre tecniche.

3.1.3 Material Jetting

Questa tecnologia è basata sul funzionamento delle stampanti tradizionali ad inchiostro, in cui delle testine piezoelettriche scannerizzano la superficie del foglio, suddivisa dal software in pixel, e gettano inchiostro nei pixel dove richiesto dosandolo in base all'input ricevuto facendolo reticolare tramite una lampada UV posta dopo gli ugelli nella direzione di movimento della testa di stampa. Questo rimane il principio fondante di tale tecnica, che utilizza fotopolimeri come inchiostro, depositandoli su più strati successivi e costruendo così la parte completa. Il processo è schematizzato in Figura 3.11, in cui è possibile osservare che questo metodo

permette l'utilizzo di più materiali contemporaneamente, come le stampanti tradizionali utilizzano diversi colori primari, dando la possibilità in un unico carico, come viene mostrato più avanti, di stampare parti composte da più materiali in un unico pezzo.

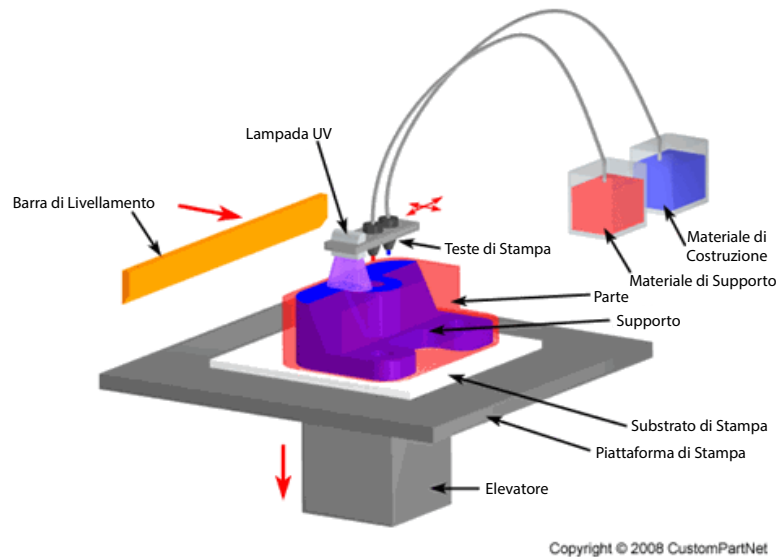


Figura 3.11: Schematizzazione del processo di Material Jetting. La tecnica utilizza più materiali contemporaneamente, di cui uno solitamente di supporto e idrosolubile per semplificarne la rimozione (<https://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>).

Il vantaggio principale della possibilità di stampare più materiali nello stesso pezzo è mostrato in Figura 3.11, in cui uno dei due materiali costituisce il supporto di stampa per l'altro. Fondamentalmente per questa tecnica non sono presenti supporti ramificati o con geometrie cave, tipici delle altre tecniche di manifattura additiva, progettati per il risparmio di materiale e per essere facilmente rimossi dalla parte stampata, ma al contrario il supporto è composto di materiale pieno e supporta dunque in modo completo la parte da stampare. Il vantaggio in questo senso è l'utilizzo di materiali idrosolubili per i supporti, che vengono così rimossi tramite un getto d'acqua o più semplicemente con un lavaggio. In questo modo si ottiene anche una superficie meno rugosa del pezzo.

Una delle problematiche di questa tecnica rimane però che le gocce di fotopolimero liquido vengono depositate velocemente e sopra una superficie già indurita, facendo sì che nel tempo che intercorre tra la deposizione della goccia e il passaggio della lampada UV, con conseguente tempo necessario alla reazione per avvenire, la goc-

cia possa espandersi creando così dei difetti di superficie, soprattutto su superfici verticali o prossime ad un'inclinazione di 90° rispetto al piatto di stampa.

Nonostante questo, la MJ, rimane una tecnica molto utilizzata in campo ortodontico per l'alto grado di accuratezza delle parti prodotte. L'importanza di tali stampanti in questo settore è talmente grande da aver spinto i produttori (come per le tecnologie SLA) a dedicare linee intere di prodotti alla stampa di modelli ortodontici e bite. Un esempio è quello di Stratasys Ltd. (<https://www.stratasys.com/>), leader mondiale dei produttori di macchinari per additive manufacturing, che nel proprio catalogo ha creato la linea di macchinari **Dental**, appartenenti alla famiglia PolyJet, stampanti MJ di Stratasys, e dedicati principalmente alla stampa di modelli ortodontici, soprattutto come stampi per la termoformatura di bite ed allineatori. Inoltre queste stampanti permettono la stampa diretta di guide chirurgiche e di posizionamento con materiali trasparenti, caratteristica necessaria per operare con una buona visibilità. Per questo motivo nel presente lavoro una stampante Stratasys ObJet 500 Dental Selection, di proprietà di AirNivol S.p.A. (<https://www.airnivol.com/>), è stata utilizzata.

Le ricerche in merito alla stampa di allineatori trasparenti tramite l'utilizzo delle stampanti [sopra citate](#) sono poche e molto recenti, e riguardano principalmente la stampa di allineatori, ma senza che sia considerata necessaria la caratteristica di trasparenza richiesta per un "clear aligner". In questo senso, è bene chiarire ancora che la possibilità di stampare allineatori dentali è stata indagata in più ricerche, sia con tecniche PolyJet [28] sia con tecnologie DLP [15], ottenendo prodotti denominati dai ricercatori "clear aligners" in quanto stampati con materiali trasparenti. Purtroppo il grado di trasparenza non risulta sufficiente, come mostrato in Figura 3.12, ai fini di originare un prodotto alla pari degli allineatori trasparenti termoformati.

I materiali utilizzati dai ricercatori per la produzione dei dispositivi trasparenti con macchinari PolyJet sono VeroClear e MED610. Il primo per testare la qualità di stampa e l'effettiva geometria del modello reale rispetto a quello virtuale, grazie alla durezza e stabilità di tale materiale, mentre il secondo per stampare dispositivi ortodontici utilizzabili come tali. MED610 infatti è certificato per l'utilizzo nel cavo orale, gli standard sono riassunti in Tabella 3.3.

Nella ricerca citata non sono stati effettuati test meccanici sull'allineatore, sebbene la trasparenza sia comunque in parte raggiunta, per cui tale lavoro è da ritenere come un primo traguardo verso la stampa diretta di allineatori completamente trasparenti e con proprietà meccaniche tali da evitare la rottura del dispositivo quando esso viene sottoposto a sollecitazioni.



(a) Allineatore trasparente stampato in MED610 subito dopo la stampa, supporti in Fullcure 705 ancora non rimossi.



(b) Allineatore stampato in MED610 dopo il post-processing che prevede la rimozione tramite getto d'acqua del supporto (Fullcure 705).

Figura 3.12: Tentativi precedenti di stampa di allineatori in MED610 utilizzando come materiale di supporto Fullcure 705. Lo spessore dell'allineatore stampato è di 0,75 mm, ed è evidente l'opacizzazione nell'immagine (b) soprattutto nelle porzioni prossime in inclinazione alla normale al piano di stampa [28].

Test	Standard
Citotossicità	EN ISO 10993-5:2009
Irritazione	EN ISO 10993-10:2013
Ipersensività di Tipo Ritardato	EN ISO 10993-10:2013
Genotossicità	EN ISO 10993-3:2014
Caratterizzazione Chimica	EN ISO 10993-18:2009
USP Plastic Class VI	USP 34 <88>

Tabella 3.3: MED610 è stata testata secondo i test riportati in tabella ottenendo la certificazione per gli standard elencati.

Nel presente lavoro verranno riprese le tecniche ed alcuni dei materiali citati, concentrandosi quindi sulla tecnologia PolyJetTM, marchio commerciale delle stampanti MJ di Stratasys Ltd., e in particolare sulla linea Dental.

3.1.4 Fused Deposition Modeling

La tecnologia FDM, a differenza delle altre tecniche esposte finora, sfrutta la fusione del materiale e lo deposita tramite un ugello a partire dal letto di stampa e successivamente sui layer depositati progressivamente fino a costruire la parte intera. Si tratta in prevalenza di macchinari poco costosi, poiché di semplice manifattura, costituiti da tre assi di movimentazione, che possono essere di vario tipo (Figura 3.13), e che permettono lo spostamento relativo tra piano ed ugello nelle tre direzioni spaziali. Grazie al controllo di un motore inserito nell'estrusore, o a monte di quest'ultimo, è possibile controllare la velocità di estrusione del materiale,

che viene calcolata in fase di preparazione del programma di stampa (tipicamente scritto in GCode) in modo da estrarre solo il materiale necessario.



(a) Stampante ad assi paralleli. La serie Delta della Wasp posiziona l'ugello grazie a tre bracci snodati collegati a delle viti, questo permette un posizionamento accurato che consente anche un certo angolo di inclinazione (<https://www.3dwasp.shop/prodotto/stampante-3d-delta-delta-wasp-2040-pro/>).



(b) Le stampanti più comuni prevedono tre assi normali tra loro, di cui generalmente due per lo spostamento dell'ugello e uno per il piatto, ma le configurazioni sono varie. In figura è rappresentata una stampante Ultimaker S5 Pro Bundle (<https://www.3ditalyshop.it/prodotto/stampanti-3d/ultimaker/ultimaker-s5-pro-bundle/>).

Figura 3.13: Differenti tipologie di stampante 3D FDM sono rappresentate in figura. Nel mercato è disponibile una vasta varietà di stampanti, differenti per materiali utilizzati, livello di accuratezza e costo.

Non si tratta di una tecnica particolarmente difficile da gestire, che infatti risulta largamente utilizzata anche a livello di hobbistica, sebbene abbia lo svantaggio di essere molto poco precisa, soprattutto se confrontata con le altre tecniche esposte in precedenza. Infatti la dimensione tipica del foro dell'ugello di estrusione è di 0.4 mm, che si traduce in un'altezza del layer consigliabile di 0.2 mm, fino ad arrivare agli ugelli più piccoli che si spingono ad una dimensione del foro di 0.1 mm. In quest'ultimo caso la stampa diventa molto difficoltosa, lenta e i materiali diventano molto complicati da gestire, e lo spessore dei layer suggeribile sarebbe di circa 0,07 mm, ovvero 70 micrometri, che risulta essere comunque quasi sette volte lo spessore di un layer stampato con tecnologia PolyJet (16 μm).

A causa del basso grado di precisione di questa tecnologia, almeno rispetto ad altre, rimane utilizzabile per la stampa di modelli e stampi ortodontici, senza però dare la possibilità di stampare degli allineatori trasparenti con buoni risultati ed accuratezza dimensionale. Infatti, per quanto riguarda questa tecnica in passato non sono state svolte ricerche rilevanti. L'unico aspetto da annotare è la disponibilità per questa tecnica di stampa di filamenti a base PETG (PolyEthylene Terephthalate Glycol-modified) e PC (PoliCarbonato), materiali utilizzati nella produzione di allineatori dentali termoformati, che tramite delle tecniche di post-produzione

possono essere resi quasi totalmente trasparenti. Questa sembra essere l'unica possibilità di utilizzo di questa tecnica per quanto riguarda la stampa diretta di allineatori dentali trasparenti, ma come già espresso, non sono state svolti lavori rilevanti in questo senso.

3.2 Processi di Post-Produzione

Con processi di post-produzione, si intendono tutti i trattamenti, rivestimenti o lavorazioni che vengono effettuati successivamente alla stampa. Tali processi sono utilizzati soprattutto per quanto riguarda i prodotti da fabbricazione additiva, specialmente le parti in materiale polimerico, per incrementare la qualità della superficie del pezzo riducendone la rugosità e quindi eliminando o attenuando la stratificazione residua. Nel caso della stampa di allineatori trasparenti tali processi possono essere utilizzati per ridurre i difetti superficiali derivati dalla stampa che ne potrebbero compromettere l'utilizzo e la dimensionalità, quali possono essere le sbavature degli strati sull'esterno. Implementando un processo secondario a valle della stampa, potrebbe essere possibile ottenere una trasparenza quasi totale dell'allineatore, rendendo attuabile quindi l'eliminazione dei problemi legati alla stampa diretta di questi prodotti che ostacolano la diffusione di tale processo produttivo.

I metodi utilizzati per la finitura spaziano in processi di ogni tipo, ma si possono raggruppare in due macrocategorie, chimici e fisici. La differenza tra queste due tipologie risiede principalmente nella presenza o meno di una reazione chimica determinante che dissolve la superficie del pezzo, o alcuni dei composti che la costituiscono. Un esempio di processo chimico è la finitura delle parti metalliche stampate tramite SLS (Selective Laser Sintering) in acciaio AISI 316, dove non sempre è possibile utilizzare dei processi di pallinatura o sabbatura per ridurre la rugosità o omogeneizzare la superficie a causa delle geometrie complesse che prevedono cavità non lavorabili. Il processo di finitura chimica si rende necessario perché le imperfezioni superficiali in parti sottoposte a carichi, soprattutto di fatica, possono portare alla formazione di cricche superficiali che propagando portano poi alla possibile rottura del pezzo. Nella ricerca di riferimento per questo processo [34], la soluzione chimica utilizzata è la DS-9-314 prodotta dalla Heatbath Corporation®), una soluzione di acidi e surfattanti, che dissolve il metallo in un processo di elettropulitura. I risultati sono mostrati in Figura 3.14.

Tale processo non può essere utilizzato con i polimeri, poiché tendenzialmente una reazione chimica porta alla degradazione del materiale e non alla rimozione dalla

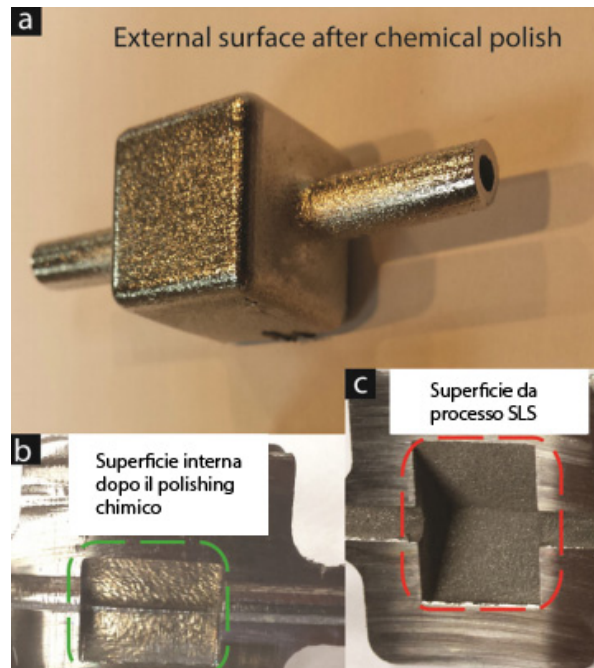


Figura 3.14: Comparazione tra la superficie successivamente alla stampa (c) e dopo il processo di pulitura chimica (b) di una parte con una cavità impossibile da processare per pallinatura o sabbiatura [34].

superficie. Ciò che rimane possibile però sono i processi fisici, che possono essere di diversa natura, dipendentemente dal tipo di materiale è necessario lavorare e da quali mezzi si hanno a disposizione. In questo paragrafo verranno indagati brevemente i diversi processi utilizzati ad ora sui materiali polimerici che risultano maggiormente efficaci.

3.2.1 Abrasione

L'abrasione tra i vari processi risulta essere probabilmente il più semplice. Consiste nell'utilizzo di un materiale con durezza superiore a quella del materiale da lavorare, libero o contenuto in un mezzo, a secco o in un liquido. L'asportazione viene operata tramite l'impatto e lo sfregamento dell'abrasivo, che può avere diverse forme, o tramite l'adesione del materiale da lavorare all'abrasivo. Trattandosi di un processo utilizzato da tempo, in letteratura sono disponibili vari modelli per la valutazione dell'abrasione [23], che non verranno tuttavia richiamati direttamente all'interno di questo lavoro, esulando dai fini di questa ricerca.

Ciò che è interessante sono i processi a disposizione per operare una pulitura per abrasione, che tramite le diverse configurazioni possono donare diversi aspetti e

gradi di finitura alla parte processata. Di seguito un elenco dei principali processi disponibili:

- Vibro-finitura
- Pallinatura e sabbiatura
- Finitura a flusso abrasivo (Abrasive Flow Machining - AFM)
- Finitura a tamburo rotante (Barrel Finishing)
- Lucidatura a spazzola e con utensili abrasivi in generale

L'utilizzo di utensili abrasivi rimane di difficile impiego per forme particolarmente complesse, anche con l'utilizzo di spazzole o spugne in grado di adattarsi alla superficie lavorandola in modo uniforme e con una pressione costante distribuita, processo che produrrebbe probabilmente una buona finitura ma che risulta difficile da automatizzare, in un'ottica di possibile scale-up di tale processo. Rimane comunque di buona utilità per la lucidatura di piccoli lotti di produzione.

Vibro-finitura

Il processo di vibro-finitura consiste nel posizionamento dei pezzi da lavorare all'interno di un tamburo vibrante, o di un tamburo con un'asta vibrante al centro, insieme all'abrasivo che vibrando continuerà ad incidere sul pezzo lavorandolo. Questo processo risulta essere molto aggressivo nei confronti delle parti, soprattutto quelle in plastica, a causa della durezza ridotta di queste ultime rispetto alle parti metalliche tipicamente processate con questa tecnica. Il vantaggio in questo senso risiede nella velocità del processo che essendo particolarmente aggressivo può necessitare di tempi davvero brevi, caratteristica che per contro rende facile eccedere con i tempi di processo portando le dimensioni del pezzo fuori da quelle richieste. Ricerche sono state effettuate [29] riguardo a tale processo applicato su parti stampate con tecnologie di manifattura additiva, che dimostrano l'efficacia della vibro-finitura, mettendo comunque in luce la problematica dell'eccessiva aggressività del metodo, come mostrato in Figura 3.15.

Risulta evidente che questo processo deteriora maggiormente gli spigoli dei pezzi, mentre lavora omogeneamente sulle superfici piate. Questo tipo di comportamento in linea di massima potrebbe essere dannoso per la finitura degli allineatori trasparenti, che possiedono una geometria molto complessa, sebbene, essendo questo un problema generico dei processi di finitura per abrasivo, le tecniche di

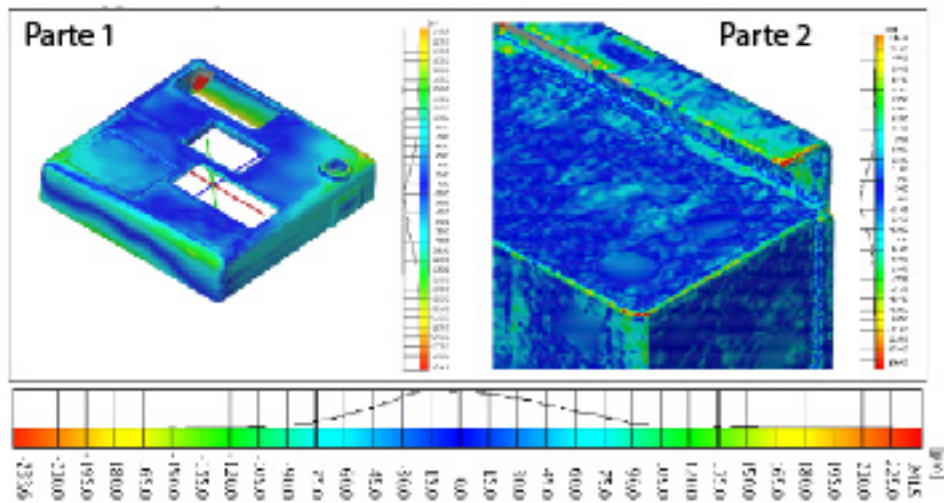


Figura 3.15: Risultati della misurazione dell'accuratezza della parte lavorata tramite vibro-finitura. La parte generalmente mantiene un'ottima accuratezza anche successivamente alla lavorazione, con eccezione di alcuni punti specifici che vengono danneggiati eccessivamente, probabilmente a causa del flusso di abrasivo creatosi. [29].

vibro-finitura rimangono probabilmente il processo con il risultato maggiormente omogeneo.

Pallinatura e Sabbatura

Un'altra possibilità è rappresentata dai processi di pallinatura e sabbatura. Tra questi la distinzione viene fatta sulla base dell'abrasivo utilizzato. Nella caso della sabbatura vengono principalmente utilizzate grane frantumate, processo, quello di frantumazione, che le rende spigolose e che quindi permette un'abrasione maggiore, a discapito però dell'estetica della parte finale. La presenza di spigoli vivi nelle particelle di abrasivo genera dei microintagli sulla superficie rendendola opaca. Al contrario, nella pallinatura vengono utilizzate delle microsferiche di vetro (composizione indicata in Tabella 3.4) che, non possedendo spigoli vivi, hanno un effetto complessivo sulla superficie molto più delicato, andando ad erodere poco materiale, caratteristica che permetterebbe di mantenere la stabilità dimensionale, eliminando i difetti e deformando la superficie del pezzo rendendola maggiormente liscia e planare.

La durezza delle microsferiche di vetro sodico (per la presenza di Na_2O) è di 46-48 HRC, per cui possiedono un valore molto più alto di quello della plastica, che tipicamente non è valutato per mezzo della scala Rockwell C, in quanto poco duro. Questo significa che saranno efficaci nella lisciatura della superficie della plastica

SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO
72-73%max	13,3-14,3% max	0,20-0,60% max	7,20-9,20% max
MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃
3,50-4% max	0,08-2,00% max	0,80-2,00% max	0,20-0,30% max

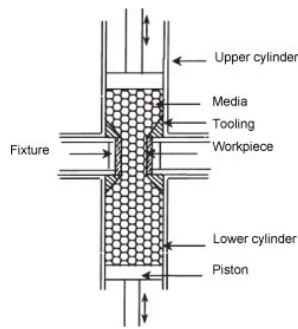
Tabella 3.4: Composizione e durezza delle microsferi di vetro tipicamente utilizzate. Come è possibile notare dalla percentuale di Na₂O si tratta di un vetro sodico (<http://www.fondsab.com/it/sabbiatrici-granigliatrici/it/prodotto/microsfere-di-vetro/>).

perché possiedono la durezza necessaria a deformarla. In questo senso le increspature derivate dal processo di stampa e corrispondenti ai layer vengono appianate e di conseguenza la superficie rimane lucidata senza la formazione di microtagli come si formerebbero in un processo di sabbiatura. Per i motivi esposti il processo di pallinatura rimane un'opportunità valida di post-processing, mentre la sabbiatura necessiterebbe di un'ulteriore passaggio per la lucidatura finale, rischiando comunque di fare perdere accuratezza rispetto al modello digitale.

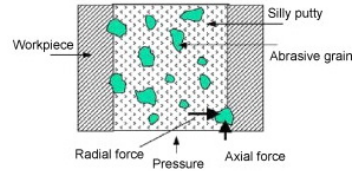
Finitura a Flusso Abrasivo

Il processo di finitura a flusso abrasivo sfrutta una miscela composta da abrasivo disperso in un mezzo fluido, che spinto contro la parte da lavorare asporta la porzione superficiale del materiale. In questo caso abbiamo un flusso stazionario di abrasivo che erode la superficie che crea disomogeneità nella lavorazione, dipendenti dalla direzione del flusso all'interno del canale.

Tale processo si basa sul posizionamento in un canale sottile della parte da lavorare, in cui successivamente viene iniettato in pressione il fluido contenente l'abrasivo [3.16b](#) che così asporta, con una velocità dipendente dalla pressione del fluido e dalla dimensione della grana, i primi strati superficiali, con maggiore velocità sulle porzioni di superficie maggiormente esposte. La peculiarità di tale tecnica è l'accentuata differenziazione tra la superficie base del pezzo e sporgenze o imperfezioni, che vengono asportate con una velocità molto più alta, ottenendo così una superficie estremamente planare. Ricerche su campioni stampati con tecnologia SLA [\[38\]](#) dimostrano che l'effetto, soprattutto per alte pressioni e dimensioni medie di grana, è di una planarizzazione pressoché totale della superficie del pezzo. Linee di flusso visibili ad occhio nudo sono state osservate come risultato del processo, che se osservate con un'analisi SEM mostrano una rugosità quasi nulla su scala micrometrica.



(a) Schema del processo di finitura per flusso di abrasivo. In questa configurazione due pistoni alternano la spinta e l'aspirazione, creando un flusso oscillante e generando una pressione controllata dalla velocità di movimento degli stantuffi.



(b) L'abrasivo contenuto nella pasta abrasiva erode la superficie del pezzo, dettaglio del pezzo mostrato nello schema di lavorazione in Figura 3.16a. La dimensione della grana determina velocità e grado di finitura dell'erosione.

Figura 3.16: La figura mostra lo schema dell'apparato per operare il processo AFM e il dettaglio della superficie della parte a contatto con l'abrasivo disperso nel fluido [13].

In Figura 3.16a è mostrato uno schema esemplificativo del processo di finitura a flusso abrasivo (Abrasive Flow Machining - AFM). La previsione del comportamento della parte sottoposta a tale processo può essere effettuata tramite l'utilizzo delle medesime formule che consentono la valutazione del fenomeno di abrasione a tre corpi [37] poiché, nel momento in cui il fluido raggiunge la riduzione della sezione in corrispondenza del pezzo, esso agisce come un solido a causa dell'alta pressione di servizio, dell'ordine delle centinaia di bar.

Finitura a Tamburo Rotante

L'ultima tecnologia di finitura di parti prodotte tramite prototipazione rapida considerata nel presente stato dell'arte delle tecniche è la finitura a tamburo rotante. Dal punto di vista dei parametri di lavorazione questa risulta essere la tecnica più versatile ma anche quella maggiormente imprevedibile. Infatti per molti aspetti potrebbe essere paragonata al processo di vibro-finitura, in quanto le soluzioni possibili sono in linea di massima le stesse. Questo perché gli abrasivi utilizzabili sono i medesimi, considerando comunque che potenzialmente tutte le tipologie di abrasivo possono essere impiegate nell'implementazione di entrambe queste tecniche, e che entrambe prevedono la possibilità aggiuntiva di utilizzare un solvente o una soluzione corrosiva, nel caso di lavorazione di metalli, in concomitanza con l'abrasivo.

La tecnica prevede l'utilizzo di un tamburo rotante, talvolta orientabile, al cui interno i pezzi vengono posizionati insieme ad un abrasivo che per effetto della rotazione crea un flusso stazionario in rotazione. L'abrasivo ricircolando nella



Figura 3.17: Esempio di processo di finitura a tamburo (Barrel Finishing), l'abrasivo ricircola all'interno della camera incidendo sul pezzo ed erodendo così la superficie. L'inclinazione del tamburo può generare tipologie diverse di flusso [2].

camera del tamburo porta con sé i pezzi erodendo la superficie per effetto dello sfregamento con essa. Uno schema è rappresentato in Figura 3.17 [2], dove in rosso viene indicato il flusso dell'abrasivo.

Si osserva facilmente che nella rotazione si crea un punto morto, in cui la velocità dell'abrasivo è quasi nulla. La dimensione di tale zona dipende fortemente dalla grandezza della grana o delle pastiglie di abrasivo utilizzate, per cui una parte molto ridotta nelle misure lavorata con una grana molto fine probabilmente lavorerebbe poco a causa della velocità bassa con cui le particelle colpiscono la sua superficie. Inoltre, una parte assialsimmetrica, idealmente cilindrica, tende a portarsi in tale punto per bilanciamento delle forze impresse dall'abrasivo, oppure a roteare seguendo la velocità con cui l'abrasivo colpisce la superficie rendendo inefficace tale processo.

In questo senso gli allineatori stampati in 3D si prestano perfettamente a tale tecnica poiché possiedono una geometria complessa che non provoca stazionarietà della parte nel flusso dell'abrasivo. Come verrà mostrato nel presente lavoro, l'unica problematica riscontrata nel processare gli allineatori tramite questa tecnica consiste nella difficoltà di lavorazione delle cavità, come ad esempio la porzione di superficie dell'allineatore a contatto con la dentatura. Questa problematica porta a delle disomogeneità nella lavorazione tra le superfici maggiormente esposte e quelle chiuse, nonostante la finitura possa comunque raggiungere un buon grado.

Tale è infatti la tecnica che viene studiata nel presente lavoro come possibile tecnologia di post-processing da operare a valle della stampa tramite tecnologia Polyjet.

3.2.2 Solvente

Un'altra possibilità per il processo di finitura risiede nell'utilizzo di solventi, processo facilmente utilizzabile con i polimeri. Il meccanismo è piuttosto semplice e consiste nella solubilizzazione da parte del solvente della superficie esposta della parte, provocandone l'abbassamento della rugosità, soprattutto su scala micrometrica, per effetto della tensione superficiale del materiale polimerico, che tende a rendere la superficie maggiormente planare, effetto reso possibile dal rigonfiamento del polimero che lo rende fluido. Tale tecnica viene utilizzata infatti per rendere maggiormente trasparenti parti stampate in 3D, tipicamente senza rimuovere la struttura a layer, ma piuttosto "levigando" le imperfezioni micrometriche. In questo caso dunque il processo non punta all'eliminazione della finitura caratteristica delle parti da prototipazione rapida ma volge maggiormente all'obiettivo di renderla omogenea ed estetica.

Finitura a Vapore di Solvente

Ricerche sono state condotte sui processi di finitura che utilizzano vapori di solventi, soprattutto su parti stampate tramite tecnologia FDM, come il DiMetilChetone (acetone) su parti stampate in Polilattato (PLA) [6], ottenendo buoni risultati. In particolare l'utilizzo di vapori ad alta temperatura accelera il processo di rigonfiamento del polimero rendendo possibile in tempi ridotti l'ottenimento di buoni risultati.

Apparati per il processo di finitura a vapore sono attualmente in commercio come dispositivi di supporto alle stampanti 3D, soprattutto per la tecnologia FDM, come nel caso di Polymaker che ha commercializzato PolysherTM (Figura 3.18), costituito da una camera in cui viene prodotto del vapore di etanolo e IPA da una miscela alcolica al 70 % che agendo sulla superficie delle parti stampate in PolySmoothTM e PolyCastTM le rende maggiormente omogenee e nel caso specifico del PolySmoothTM rende maggiormente trasparente la parte.

Il processo risulta molto efficace nell'incrementare la trasparenza della parte, ma osservandola in dettaglio (Figura 3.19), la struttura stratificata rimane ancora visibile. Il difetto residuo, sebbene non sia perfettamente visibile osservando nel



Figura 3.18: Polysher™ è la soluzione unica proposta commercialmente da Polymaker, basata sul processo di finitura a vapore (<https://eu.polymaker.com/product/polysher/>).

complesso la parte, risulta in una distorsione della luce che la attraversa, determinando un aspetto trasparente ma che non permette l'osservazione limpida dei particolari oltre la parte, come è visibile a sinistra in Figura 3.19, dove la scritta dietro alla bottiglia stampata e processata con Polysher™ risulta molto distorta, e non uniformemente deformata come potrebbe osservarsi, ad esempio, tramite una lente.

Dunque questo processo risulta molto efficace per ridurre i difetti micrometrici, ma non permette il raggiungimento di un grado di precisione sufficiente ad essere utile per la finitura di un allineatore trasparente stampato in 3D.

Finitura in Bagno di Solvente

Alternativamente a quanto detto nel paragrafo precedente, il pezzo può essere immerso nel solvente liquido, sfruttando lo stesso meccanismo di levigatura per mezzo del rigonfiamento e della solubilizzazione del polimero che per effetto della tensione superficiale del materiale stesso tenderà a rendere la superficie maggiormente smussata.

Se nel processo a vapore il fattore che determinava l'accelerazione del rigonfiamento era la temperatura alta, nel caso dei processi con solventi liquidi le possibilità sono multiple e tutte basate sull'agitazione del solvente.

La sonicazione in solvente è stata indagata specificatamente per resine stampate con tecnologia PolyJet™ [24] dimostrando che è possibile raggiungere un risultato

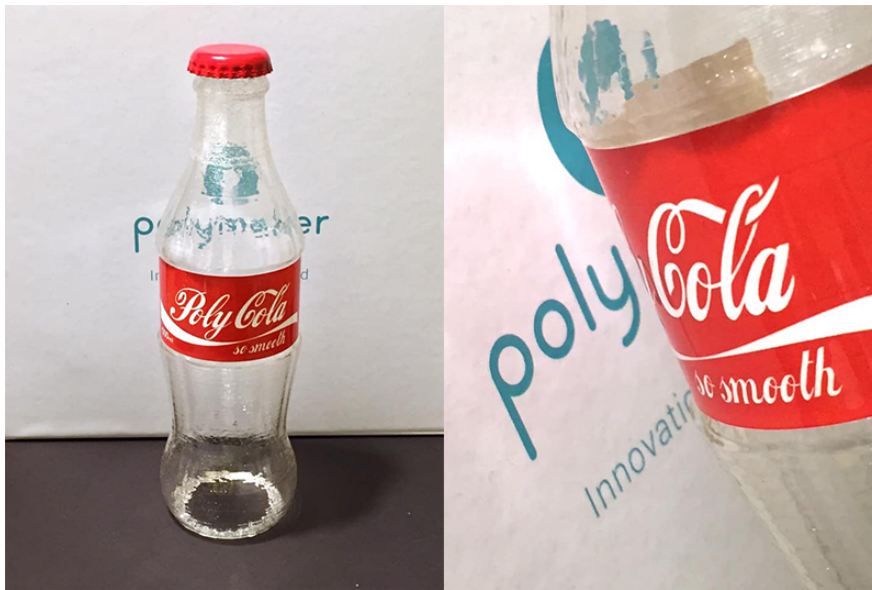


Figura 3.19: Esempio di stampa FDM in materiale PolySmooth™ successivamente processato tramite Polysher™ (<https://polymaker.com/how-to-print-transparent-models/>).

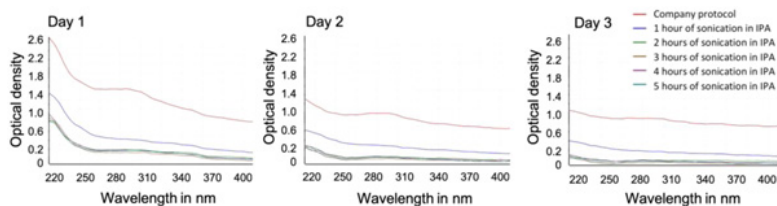


Figura 3.20: Risultati del processo di sonicazione per diversi tempi di processo e osservando lo sviluppo nell'arco di tempo di tre giorni della variazione delle proprietà ottiche di assorbanza (Optical Density in figura) [24].

molto simile a quello precedentemente esposto per la tecnologia a vapore. I risultati degli spettri di assorbimento sono mostrati in Figura 3.20. L'agitazione del solvente (o del pezzo) infatti accelera la cinetica del processo di rigonfiamento anche a temperature relativamente basse, favorendo inoltre l'omogeneizzazione della superficie non solo grazie al processo spontaneo dovuto alla tensione superficiale del polimero, ma anche grazie al flusso del solvente sulla superficie che tende a modellare le increspature.

L'agitazione in solvente liquido può essere ottenuta in vari modi. Una possibilità è quella di utilizzare un apparato per finitura a tamburo dove i pezzi e il solvente possono essere processati nella camera in rotazione. La seconda parte del presente lavoro si è concentrata particolarmente su questo aspetto, esplorando anche gli effetti di un processo combinato tra abrasivo e solvente.

3.2.3 Altri Metodi

Ovviamente il numero di metodi disponibili per effettuare una lavorazione di finitura superficiale per parti da prototipazione rapida è molto alto, e quelle trattate nelle sezioni precedenti sono solo alcune delle possibilità. Proprio per questo la scelta è stata di focalizzarsi sui metodi ritenuti maggiormente validi per l'applicazione a stampe PolyJet e realizzabili con la strumentazione a disposizione.

Per completezza in Tabella 3.5 sono indicati altri metodi largamente utilizzati, suddivisi in metodi convenzionali e non convenzionali.

Convenzionali	Non Convenzionali
Pulizia manuale/Lucidatura Manuale	Abrasione Ultrasonica
Finitura tramite lavorazione meccanica CNC	Lucidatura Elettrochimica
Tecnologie di microlavorazione	Elettrodeposizione
Verniciatura o riempimento dei difetti tramite infiltrazione di resina	Microlavorazione a Laser

Tabella 3.5: Tecnologie non citate precedentemente. Suddivise tra tecnologie convenzionali e non convenzionali [17].

Capitolo 4

Analisi del Problema di Ricerca

Il presente lavoro nasce dunque dalla necessità crescente di superare il processo di produzione di "clear aligners" tramite tecnologie di termoformatura. Come anticipato precedentemente, probabilmente alcuni processi sono già stati implementati, ma si tratta comunque di lavori recenti, risalenti perlopiù ai due anni passati, che necessitano di tempo per essere inseriti nei cicli produttivi ed essere perfezionati per la produzione in serie. Le ricerche precedentemente citate [28, 15] mostrano studi in cui la valutazione del comportamento meccanico dell'allineatore e della qualità del prodotto finale vengono indagati principalmente tramite l'utilizzo di due tecniche: SLA e PPJ. Se per quanto riguarda le tecniche SLA vi è un dibattito su quale sia la scelta migliore tra l'utilizzo di un laser (SLA) o di un proiettore (DLP) come fonte luminosa, per quanto riguarda la tecnologia PPJ la linea maggiormente performante di stampanti e materiali è fornita sicuramente da Stratasys con la linea PolyJet, che risultano essere tra le stampanti 3D maggiormente precise e versatili sul mercato. Da questo punto di vista però, è necessario effettuare una comparazione dei costi tra le varie tecniche, che spaziano dall'ordine di migliaia di euro per le stampanti DLP, all'ordine delle decine di migliaia per macchinari SLA a laser, per arrivare alle centinaia di migliaia per un macchinario PolyJet.

Risulta evidente che i costi dei macchinari PolyJet sono molto alti e proibitivi ai fini della pura ricerca, per cui tipicamente vengono utilizzati macchinari DLP o SLA. Un aspetto importante e da non sottovalutare è però che tali macchinari (PolyJet) vengono ampiamente utilizzati per la produzione di modelli ortodontici per la termoformatura e in generale nel campo ortodontistico. Tale considerazione porta inevitabilmente ad una valutazione dal punto di vista del produttore, che, nel caso in cui si dimostrasse necessaria una conversione alla stampa diretta degli allineatori, avrebbe la possibilità di utilizzare stampanti già inserite nel processo

produttivo, evitando così ulteriori investimenti per la riconversione. Tale aspetto non è da sottovalutare in un’ottica di trasporto del processo su scala industriale. Per questi motivi la scelta della tecnologia di stampa utilizzata per la produzione dei campioni su cui sono stati svolti i test è ricaduta su PolyJet™, marchio Stratasys per la linea di stampanti PPJ. Tale linea permette solo la stampa di materiali proprietari dell’azienda produttrice, aspetto questo che se da un lato rende obbligata la scelta del materiale, dall’altro comunque è a dimostrazione della qualità di tale linea di macchinari e dei prodotti generabili con essi, in quanto le resine fornite sono già testate con i macchinari che le utilizzeranno e i parametri di stampa sono gestiti direttamente dalla macchina, rendendo il compito di gestione della stampa relativamente semplice confrontato con l’alto grado di finitura ottenibile. Seguendo tale filosofia, fondamentale è stata la disponibilità da parte di AirNivòl S.p.A. per la fornitura delle parti stampate tramite tecnologia PolyJet™. Questa opportunità ha permesso di testare dei materiali e delle tecniche di altissima qualità, che sicuramente agevolano il lavoro di post-processing. Maggiori informazioni sui materiali verranno forniti nel prossimo capitolo, in quanto questa breve sezione ha l’obiettivo di delineare quelle che sono le linee logiche che hanno portato alla formulazione delle ipotesi che successivamente si sono concretizzate nei test effettuati.

4.1 La Necessità di Materiali Flessibili

Uno dei maggiori problemi dei materiali trasparenti foto-polimerizzanti, è la loro fragilità. In questo senso tale aspetto viene accentuato dalla necessità di stampare allineatori trasparenti, che ad oggi vengono termoformati con materiali termoplastici in grado di sopportare deformazioni molto elevate e quindi di non rompersi anche in situazioni di abuso del prodotto, che è necessario considerare. Come esempio viene riportato un grafico in Figura 4.1, dove viene mostrato chiaramente come i materiali stampati in 3D, DLP in questo caso specifico, possiedano minore elongazione a rottura rispetto ai termoformati.

Una possibilità di rendere un materiale più resistente alla flessione è sicuramente quella ridurre il suo spessore, in questo modo a parità di deflessione la deformazione sperimentata dalla fibra più esterna nella direzione di applicazione del carico sarà minore:

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (4.1)$$

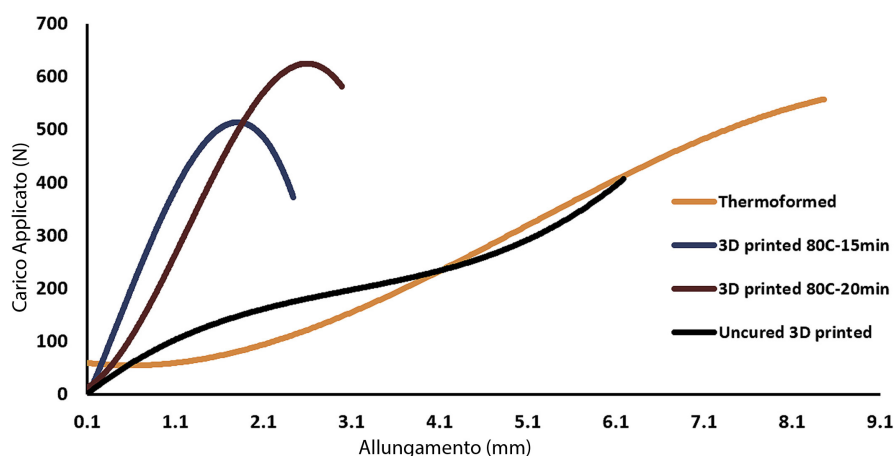


Figura 4.1: Comparazione tra materiale termoformato e stampato in 3D. La differenza in termini di deformazione prima della rottura è netta [15].

L'Equazione 4.1 fa riferimento alla norma ASTM D 790, che verrà nel prossimo capitolo esposta in dettaglio, e mostra come, al ridursi dello spessore d di una generica trave a sezione rettangolare, la deformazione della fibra esterna si riduce a parità degli altri valori geometrici, elencati in Figura 4.2.

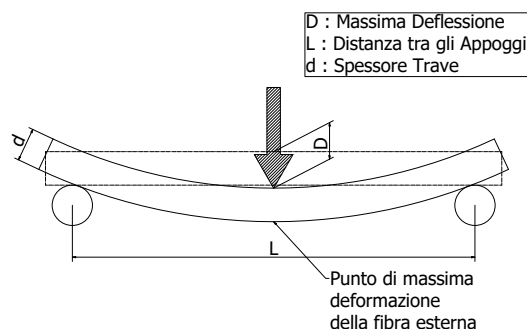


Figura 4.2: Schema di flessione. I parametri si riferiscono alla normativa ASTM D 790, e sono mostrati nella Formula 4.1.

Purtroppo questa possibilità non è da considerare valida per gli allineatori trasparenti, ma come loro la maggioranza dei prodotti in ogni settore, che devono avere una geometria ben definita. Gli allineatori termoformati hanno tipicamente uno spessore di circa 0,5 mm, in modo da non risultare eccessivamente ingombranti nel cavo orale mantenendo un buon grado estetico, in quanto sarebbero visibili anche con un alto grado di trasparenza. Dunque l'obiettivo è ottenere un materiale suffi-

cientemente flessibile, senza variarne la geometria e stampando il tutto in un'unica soluzione, raggiungendo la qualità dei materiali da termoformatura.

Un esempio di materia prima per la termoformatura è rappresentato in Figura 4.3, che mostra il materiale Zendura FLX prodotto dalla Zendura Dental, e largamente utilizzato come materiale per la produzione di allineatori. Tale materiale è il risultato di un processo di laminazione che porta due fogli molto sottili di materiale plastico a fare da contenitori per un materiale elastomerico internamente.



Figura 4.3: Raffigurazione del materiale Zendura FLX nella conformazione di vendita (<https://www.zenduradental.com/pages/whats-zendura-flx-all-about>). In generale i materiali per la termoformatura sono venduti sotto forma di dischi di vari diametri per adattarsi ai vari macchinari disponibili sul mercato.

La sua conformazione permette di rendere il materiale complessivo altamente elastico mentre l'esterno fornisce il supporto meccanico necessario alla funzione di riallineamento della dentatura, e riducendo lo spessore della porzione rigida ne viene incrementata anche la capacità di flessione. Tale accorgimento, come per i materiali stampati in 3D, si rende necessario a causa della fragilità o della bassa resistenza allo snervamento dei polimeri trasparenti rigidi. Dall'altro lato i polimeri molto elastici non hanno un valore di modulo elastico sufficiente a svolgere la funzione di allineatore, per cui non possono essere utilizzati puri. La produzione di un laminato sopperisce agli aspetti negativi di entrambe le categorie di materiale, enfatizzando le caratteristiche meccaniche positive. In questo senso, il concetto alla base di Zendura FLX è da considerarsi estremamente valido. Una schematizzazione di tale approccio è rappresentata in Figura 4.4, dove è mostrato in modo semplificato il comportamento di un laminato in cui il materiale interno è elastico e quello esterno rigido. Le deformazioni eccessive vengono assorbite dal cuore del materiale, lasciando libere di traslare rispettivamente le due porzioni esterne collegate tramite la parte centrale.

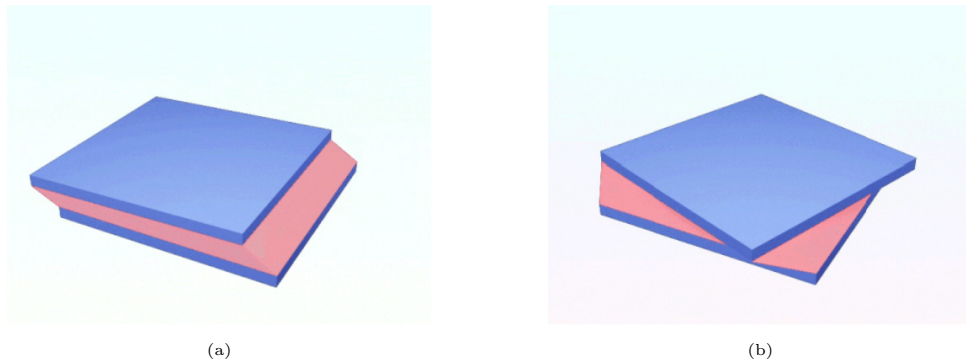


Figura 4.4: Esempi di modi deformativi di un laminato con cuore elastico e guscio esterno rigido. Nella raffigurazione moti di taglio (a) e moti di torsione con asse verticale (b) sono accomodati. Le figure fanno riferimento al materiale Zendura FLX (<https://www.zenduradental.com/pages/whats-zendura-flx-all-about>).

Riprendendo il concetto di conformazione di un materiale con alta flessibilità con un cuore elastomerico, è stato possibile, tramite la funzione rivestimento del software Stratasys ObJet Studio, effettuare la stampa diretta di un secondo materiale come rivestimento del materiale base. Tramite questa funzione specifica è infatti possibile stampare un oggetto in cui il materiale base è elastico con modulo molto basso e il materiale di rivestimento è rigido.

Tale possibilità apre anche un'ulteriore via percorribile, ovvero la stampa di un materiale elastico come rivestimento su una base di materiale rigido. In questo caso l'effetto dovuto alla riduzione di spessore precedentemente esposto sarebbe ancora atteso in quanto una porzione dello spessore sarebbe sostituito dal materiale elastico, a cui si potrebbe aggiungere l'effetto di rinforzo all'eventuale nucleazione di cricche di superficie sul materiale rigido, che portano poi alla rottura fragile per propagazione [14]. Un rivestimento di materiale elastico, che raggiunge deformazioni molto elevate prima di iniziare a nucleare delle cricche superficiali, può in linea di massima riparare il materiale sottostante da tale nucleazione, e quindi rinforzarlo indirettamente. Questa ipotesi ha portato alla formulazione di un secondo materiale, costituito sulla base di un'inversione dell'accoppiamento dei materiali rigidi ed elastici.

Si giunge dunque alla conclusione che sia necessario, utilizzando per la stampa dei provini la funzione di rivestimento delle parti del software ObJet Studio, testare dei materiali laminati stampati direttamente, nei due casi riassunti in Tabella 4.1. Nella presente ricerca tali materiali sono stati testati, raccogliendo dati sul comportamento meccanico che si dimostrano utili nella valutazione della geometria dell'allineatore ai fini dell'allineamento dentale.

Materiale Base	Materiale Rivestimento	Vantaggi
Elastico	Rigido	Spessori minori delle porzioni rigide rispetto alla geometria complessiva, deformazioni minori in flessione degli strati rigidi a parità di spostamento, deformazione della parte complessivamente più alta senza giungere a rottura
Rigido	Elastico	Spessore molto basso del corpo centrale rigido e quindi deformazioni maggiori possibili, rivestimento elastico che ripara dalla nucleazione di cricche

Tabella 4.1: Tabella riassuntiva dei fondamenti su cui si basa la stampa dei materiali laminati utilizzati nel presente lavoro.

L'ulteriore aspetto da considerare è l'estetica, che come accennato più volte precedentemente è un fattore fondamentale e di cui il prodotto finale necessita comparato con la qualità dell'allineatore ad oggi fornito dai produttori, ovvero termoformato. A tal proposito la scelta dei materiali da utilizzare si restringe semplicemente all'utilizzo di due materiali trasparenti nello stato puro. Se essi risultano trasparenti in atmosfera necessariamente possiedono entrambi un indice di rifrazione simile a quello dell'aria (1,0002926), motivo per cui la differenza tra i valori degli indici di rifrazione di tali materiali, se entrambi trasparenti in atmosfera, non sarà sufficiente a creare eccessiva riflessione della radiazione, per cui anche il prodotto finito risulterà trasparente.

Tra i materiali disponibili per la stampa con tecnologia PolyJet, si identificano due materiali trasparenti che possono essere utilizzati in questo senso per la produzione di parti trasparenti in campo dentale, il MED610 e il MED625FLX. Il primo è un materiale rigido utilizzato per la produzione di guide chirurgiche dentali, mentre il secondo è molto flessibile e con un allungamento a rottura di circa il 40%. Questi due materiali costituiscono la base perfetta per la stampa con modalità rivestimento di parti composite, secondo il principio esposto precedentemente in

questa sezione.

Il passaggio successivo è la rimozione dei difetti intrinseci della stampa, come la struttura a layer, ed errori di stampa dovuti a sottosquadri o geometrie particolari. Nel prossimo paragrafo vengono, dunque, espone le motivazioni che hanno portato alla definizione di un processo di finitura, i cui effetti sono stati indagati nella seconda parte del lavoro.

4.2 La Necessità di una Finitura Trasparente

Le richieste di mercato per gli allineatori dentali impongono che abbiano un alto grado di trasparenza. Questo è necessario in quanto l'ostacolo principale di un trattamento con apparecchi tradizionali risulta esteticamente vistoso, e non sempre i pazienti adulti sono propensi a sottoporsi a tale processo. La possibilità di utilizzare un allineatore trasparente che sia quasi del tutto invisibile, rende i pazienti maggiormente propensi all'acquisto di tale trattamento, soprattutto nell'ottica di migliorare quella che è l'estetica del sorriso, per cui invece non si è normalmente disposti ad utilizzare un apparecchio vistoso per mesi o anni. Questo infatti non risulta valido nel caso di necessità di intervento per motivazioni puramente cliniche, al fine di curare delle malocclusioni, per cui un trattamento si rende necessario indipendentemente dalle aspettative estetiche del paziente. Ad ogni modo il trattamento di questi casi, quando possibile, risulta di maggiore gradimento in quanto, tralasciando il fattore estetico, un allineatore trasparente possiede un grado di comfort maggiore, come già spiegato nel Capitolo 2.

Per ottenere un grado di trasparenza sufficiente sono infatti necessarie le caratteristiche elencate di seguito :

- Superficie estremamente planare
- Rugosità bassa, al di sotto dell'ordine dei micrometri
- Materiale trasparente
- Tecnica di produzione omogenea, evitando la produzione di vuoti nel materiale

Per quanto riguarda l'utilizzo di materiali trasparenti si tratta di un problema relativo alla tecnica selezionata per la stampa e con essa ai materiali disponibili per tale tecnica. Nello specifico nella presente ricerca vengono utilizzati materiali

stampati tramite tecnica PolyJet, per cui la scelta è ristretta a resine proprietarie prodotte da Stratasys, tra cui sono presenti diversi materiali trasparenti con proprietà meccaniche che ben si prestano agli scopi di questa ricerca, come i materiali MED610 e MED625FLX citati nella precedente Sezione 4.1. Inoltre la tecnica PolyJet produce parti decisamente omogenee e senza vuoti nel materiale, aspetto che è stato comunque confermato dalla sperimentazione svolta.

Rimangono dunque da valutare le caratteristiche di superficie di parti stampate con la tecnologia a marchio Stratasys. La planarità della superficie, intesa come rugosità macroscopica, come è possibile osservare nell'esempio in Figura 3.19, può produrre effetti di distorsione, e non di diffusione, della luce che la attraversa, lasciando tuttavia il materiale trasparente nel complesso. Questa caratteristica è presente, almeno su una porzione, della superficie di parti stampate con tecnologia PolyJet, per cui è necessario rimuoverla dopo la stampa se si vuole ottenere totale trasparenza.

Ciò che però compromette davvero la trasparenza di questi oggetti è la presenza di micro-rugosità residua sulla superficie dei pezzi, che rende opaca la finitura "as-printed". Come viene mostrato nel prossimo capitolo questa tendenza a formare graffi micrometrici superficiali risulterà un problema piuttosto ostico da sormontare.

Questi due casi sono schematizzati in Figura 6.7, in cui viene mostrato il principio alla base della distorsione e della diffusione della luce. Nel primo caso si ha semplicemente una bassa planarità che porta la luce in punti diversi a deviare con angoli differenti, mentre nel secondo i difetti hanno dimensione simile a quella della lunghezza d'onda della radiazione luminosa per cui si produce anche un fenomeno di diffrazione, che disperde la radiazione opacizzando il materiale, o rendendolo solo traslucido [19].

Questi difetti necessitano dunque di essere eliminati tramite un passaggio successivo alla stampa con un processo di lucidatura. Nelle Sezioni 3.2.1 e 3.2.2 sono stati esposti i metodi principalmente utilizzati oggi per eseguire la finitura superficiale di parti stampate in 3D, identificando nel processo di finitura a tamburo una possibilità concreta e versatile per effettuare questo passaggio. A tal fine, per questa ricerca è stato progettato ed assemblato un apparato sperimentale per effettuare dei test utilizzando questa tecnica, le cui tavole tecniche sono riportate in Appendice A, mentre il circuito elettrico è schematizzato nell'Appendice B. Una foto di tale macchinario è mostrata in Figura 4.6, ed il suo funzionamento nello specifico verrà indagato nella Sezione 6.1.3.

La scelta di tale metodo è stata guidata dalla necessità di un processo semplice,

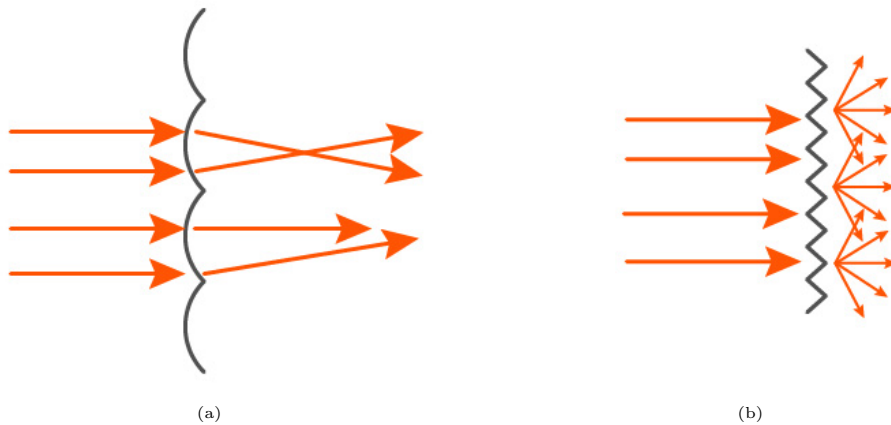


Figura 4.5: Percorsi schematizzati della luce attraverso interfacce con rugosità macroscopica (a) e microscopica (b). Nel caso (a) la luce attraversa una superficie che risulta trasparente ma distorce l'immagine rendendo l'oggetto visibile, mentre nel secondo caso (b) la luce viene diffusa rendendo la superficie opaca.

facilmente riproducibile con costi contenuti, ma che comunque risultasse maggiormente versatile rispetto ad altri. Questa architettura risulta perfettamente adattabile ad ogni necessità, anche in presenza di liquidi, per cui è stato possibile suddividere in tre parti le tipologie di test eseguiti con tale apparato, utilizzando processi a secco con solo abrasivo, processi che prevedevano solamente l'utilizzo di un solvente, e processi ibridi in cui i due effetti si sommano.

Un altro vantaggio riguarda sicuramente il grado di aggressività sul pezzo da lavorare, che se eccessivo porta inevitabilmente alla rottura o al danneggiamento di quest'ultimo. Tramite la configurazione mostrata in Figura 4.6 è possibile regolare in modo molto preciso la velocità di rotazione e quindi evitare che il processo risulti in un danneggiamento sistematico dei provini.

Concludendo, le opportunità di scelta di un processo di finitura sono pressoché infinite e sono disponibili innumerevoli tecnologie complesse ma estremamente precise ed efficaci. La scelta di utilizzare una tecnica fondamentalmente semplice con un apparato artigianale si basa sulla necessità di poter gestire completamente i parametri ed eventualmente apportare modifiche in corso d'opera al macchinario, possibilità che in fase di sperimentazione risulta utile non conoscendo a priori gli effetti che il trattamento avrebbe avuto sui materiali testati. Questo aspetto sarebbe rimasto limitato nel caso di utilizzo di macchinari prodotti in serie, considerando anche i costi nel caso di acquisto, e le tempistiche in caso di utilizzo in comodato. Tali sono le motivazioni che hanno sostenuto questa decisione.

Nei prossimi capitoli vengono presentati nel dettaglio le strumentazioni e i materiali utilizzati, insieme con i risultati ottenuti.

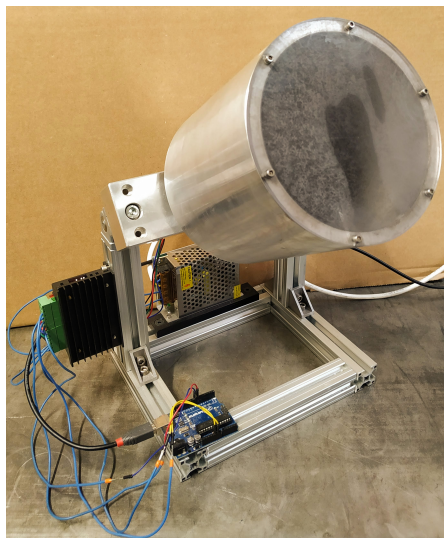


Figura 4.6: Immagine dell'apparato di finitura prodotto per la sperimentazione. Il tamburo viene messo in rotazione da un motore passo-passo, rendendo possibile la gestione delle velocità.

Capitolo 5

Caratterizzazione Meccanica dei Materiali

Come spiegato nel precedente capitolo, i materiali puri impiegati solitamente per la produzione di oggetti trasparenti, come il MED610, sono troppo fragili per essere utilizzati singolarmente, almeno nel caso in cui siano richieste dalle specifiche di prodotto il più possibile simili a quelle di un allineatore termoformato. Questi ultimi infatti raggiungono alte deformazioni a flessione senza rompersi, caratteristica che rende tale prodotto difficile da criccare accidentalmente, ed un certo grado di abuso rimane consentito. Tuttavia il MED610 è un materiale con una consistenza meccanica adeguata al riallineamento dei denti, possedendo alto modulo elastico ed essendo in grado di sopportare gli sforzi tipici implicati nel momento in cui viene indossato, e quindi la modifica di tale materiale è una possibilità che va considerata per migliorarne le caratteristiche. In questo senso i macchinari PolyJet oltre all'alta qualità di stampa offrono anche, come anticipato precedentemente, dal lato software un supporto per la stampa di parti composte da materiali diversi sotto forma di rivestimento. Tutti questi aspetti vengono chiariti maggiormente nel corso di questo capitolo.

5.1 Materiali e Metodi

Grazie all'utilizzo della modalità di rivestimento sono stati stampati allineatori in multi-materiale e in materiale puro, per un totale di quattro diverse combinazioni tra MED610 e MED625FLX, di cui le prime due sono costituite dai due materiali puri e le due successive da MED610 rivestito in MED625FLX e MED625FLX

rivestito in MED610. Le conformazioni esposte sono schematizzate in Figura 5.1. Risulta necessario precisare da subito che la funzione rivestimento opera come mostrato nello schema in Figura 5.1, ovvero formando uno strato con spessore costante su tutta la superficie del pezzo e nella direzione perpendicolare ad essa in ogni punto, proprio come accadrebbe in un processo di rivestimento omogeneo.

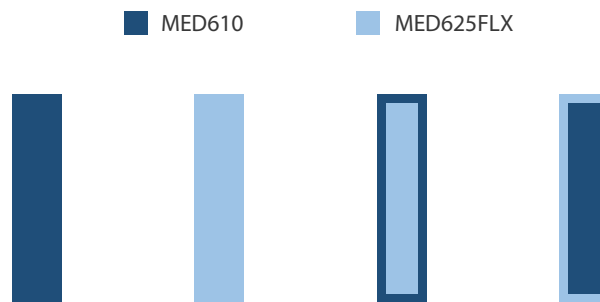


Figura 5.1: Schema riassuntivo dei materiali utilizzati nel presente lavoro. Le combinazioni sono state create tramite la funzione di rivestimento disponibile per le stampanti Objet.

La modalità di rivestimento permette la sostituzione dei primi strati superficiali di materiale del pezzo con un altro materiale, con uno spessore da 0,3 a 3 mm, valore imposto dal software di gestione della stampa, ObJet Studio, software proprietario Stratasys dedicato all'utilizzo delle stampanti della linea Objet di cui è stato utilizzato il modello Objet 500 Dental Selection. In Figura 5.2 viene mostrata l'interfaccia software, con raffigurata una delle geometrie stampate a titolo esemplificativo. Tramite il programma è possibile gestire in modo molto semplice le stampe, in quanto Stratasys non ha previsto la possibilità di impostazione dei parametri di stampa tramite software, scelta che semplifica ed accelera il processo di "slicing" utilizzando valori preimpostati e non modificabili, a differenza di altre tecnologie che richiedono l'inserimento manuale dei valori che determinano la qualità del prodotto finito.

Le uniche impostazioni che possono essere variate in ObJet Studio, oltre alla creazione di un rivestimento e quindi di una parte multi-materiale, sono il riempimento del pezzo, che può essere modificato secondo tre livelli (Standard, Heavy e Lite) contornato da un guscio che può avere spessore compreso tra 0,028 e 7,14 mm, e la finitura superficiale della porzione di superficie non a contatto con il supporto. Esiste infatti la possibilità di scegliere tra finitura "glossy", che produce una superficie estremamente lucida e liscia, e "matte", finitura opaca che lascia un certo

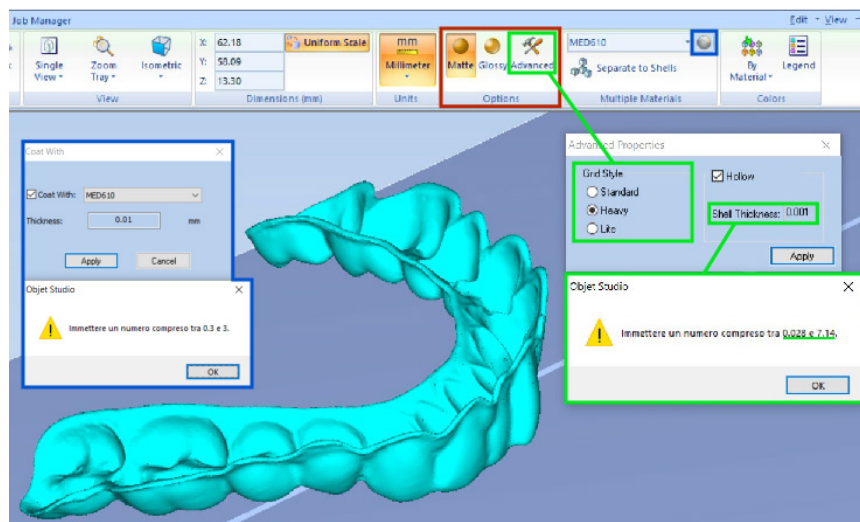


Figura 5.2: Interfaccia software di Objet Studio. In rosso sono contornate le opzioni disponibili per la stampa, esclusa la scelta del materiale. In verde sono indicate le scelte di stampa per quanto riguarda il riempimento del pezzo da stampare e le limitazioni imposte dal software, mentre in blu sono evidenziate le opzioni relative alla stampa del rivestimento.

grado di visibilità ai layer di cui è composto il pezzo. Questo concetto viene ripreso nel prossimo capitolo, in cui viene analizzata la qualità superficiale delle stampe di geometrie di allineatori.

Per quanto riguarda questa prima parte del lavoro, sono stati stampati utilizzando questa tecnica dei provini per dei test a trazione e flessione, in modo da osservare la variazione di comportamento dei materiali rispetto alle proprietà dei materiali puri. L'obiettivo principale è indagare come cambiano le proprietà del MED610, che possiede ottima resistenza meccanica ma bassa flessibilità, quando una parte di materiale viene sostituita con MED625FLX, materiale con allungamento a rottura molto alto.

5.1.1 MED610 e MED625FLX

Stratasys fornisce le caratteristiche meccaniche dei materiali nei relativi datasheets (link in Appendice E), da cui si possono valutare le proprietà meccaniche finali del composito. Sfortunatamente, per quanto riguarda i dati forniti su MED625FLX, non viene indicato il modulo elastico, motivo per cui risulta difficile fare una previsione a priori del comportamento meccanico di un composito con MED610. Quello che però è possibile fare, conoscendo tale materiale nello stato puro, è operare un'approssimazione considerando il valore di modulo elastico pari a 2 MPa, in

quanto questa resina nello stato polimerizzato risulta veramente poco rigida. Tale approssimazione potrebbe risultare casuale e senza motivazione, ma deformando il MED625FLX manualmente è facile constatare come la consistenza ricordi fortemente la gomma naturale (cis-1,4-Poliisoprene) che possiede appunto un valore di modulo elastico pari a 2 MPa. Inoltre, considerata la differenza netta di tale valore rispetto al MED610 (2000-3000 MPa), è bene ricordare che il contributo in rigidità al materiale complessivo sarà veramente basso, per cui anche se il valore effettivo fosse distante da quello ipotizzato, non sarebbe sufficiente a modificare eccessivamente le previsioni fatte. Ad ogni modo, tale approssimazione è necessaria per un confronto tra i dati attesi e quelli che saranno valutati con i test, in quanto è stato valutato che testare direttamente un materiale puro con una consistenza così bassa sarebbe risultato oltremodo difficile, soprattutto in flessione.

Property	Standard/ Procedure	MED625FLX
Tensile Strength (MPa)	D-412	3 – 5
Elongation at break (%)	D-412	45 – 55%
Compressive Set (%)	D-395	0.5 – 1.5%
Shore Hardness (Scale A)	D-2240	73 – 77
Tensile Tear Resistance (kg/cm)	D-624	8 – 12
Polymerized density (gr/cm ³)	D-792	1.16 – 1.17 g/cm ³
Bio-compatibility	EN ISO 10993-1	Approved
Support Removal Type	–	WaterJet

Figura 5.3: Dati ufficiali forniti da Stratasys sul materiale MED625FLX.

Il MED610 invece è un materiale molto rigido, con un modulo elastico che dai dati ufficiali si attesta tra 2000 e 3000 MPa, mentre per quanto riguarda la resistenza a rottura rimane nell'intervallo 50-65 MPa. Considerando i valori tipici dei materiali di cui sono composti gli allineatori termoformati infatti, notiamo che la rigidità dichiarata di MED610 è superiore a Zendura FLX, citato precedentemente, che possiede un modulo elastico pari a 1730 MPa [32]. Questo confronto rende maggiormente plausibile l'idea di incrementare la deformazione a rottura in flessione di MED610 sostituendo parte dello spessore con MED625FLX, a discapito della rigidità meccanica che comunque in linea di massima rimarrebbe alta. I valori delle proprietà meccaniche forniti dal produttore sono mostrati in Figura 5.4.

I materiali sono stati prodotti seguendo lo schema indicato precedentemente in Figura 5.1, e nei prossimi paragrafi vengono illustrate le stampe eseguite sulla base della geometria dei provini, unitamente con i parametri delle prove eseguite.

Property	Standard/ Procedure	Clear Biocompatible MED610
Tensile Strength (MPa)	D-638-03	50 – 65
Elongation at break (%)	D-638-05	10 – 25
Modulus of elasticity (MPa)	D-638-04	2,000 – 3,000
Flexural Strength (MPa)	D-790-03	75 – 110
Flexural Modulus (MPa)	D-790-04	2,200 – 3,200
HDT 0.45 MPa (°C)	D-648-06	45 – 50
HDT 1.82 MPa (°C)	D-648-07	45 – 50
Izod Notched Impact (J/M)	D-256-06	20 – 30
Water Absorption (%)	D-570-98 24HR	1.1 – 1.5
Tg (°C)	DMA E	52 – 54
Shore Hardness (D)	Scale D	83 – 86
Rockwell Hardness (scale M)	Scale M	73 – 76
Polymerized density (gr/cm ³)	ASTM D792	1.17 – 1.18
Bio-compatibility	DIN EN ISO 10993-1:2009	Approved
Support Removal Type	–	WaterJet

Figura 5.4: Dati ufficiali forniti da Stratasys sul materiale MED610.

5.1.2 Provini

Sono state stampate due geometrie diverse di provini, ognuna delle quali in tre materiali diversi. Come anticipato nel paragrafo precedente, è stato scelto di non testare il MED625FLX puro in quanto non presenta una consistenza sufficiente allo scopo. Infatti, per quanto riguarda i test di trazione, la sola pressione esercitata dagli afferraggi del macchinario utilizzato avrebbe compromesso il test, mentre per i test di flessione la resistenza meccanica bassa del materiale avrebbe prodotto deformazione a flessione solo con il peso stesso del provino.

Le geometrie scelte per i provini fanno riferimento alle normative ASTM D 790-10, per i test a flessione, e BS EN ISO 527-2-2012 per i test a trazione. Le tavole meccaniche di tali provini sono indicate nelle Figure 5.6 (Trazione) e 5.5 (Flessione).

Entrambe le geometrie sono state stampate nelle tre modalità indicate precedentemente, ovvero in MED610, in MED610 rivestito con MED625FLX e in MED625FLX rivestito con MED610. In Tabella 5.1 vengono riassunte le stampe effettuate per i provini di trazione e flessione, con le relative codifiche utilizzate nel corso del progetto.

I provini con codici da 009 a 011 sono stati stampati con la geometria illustrata in

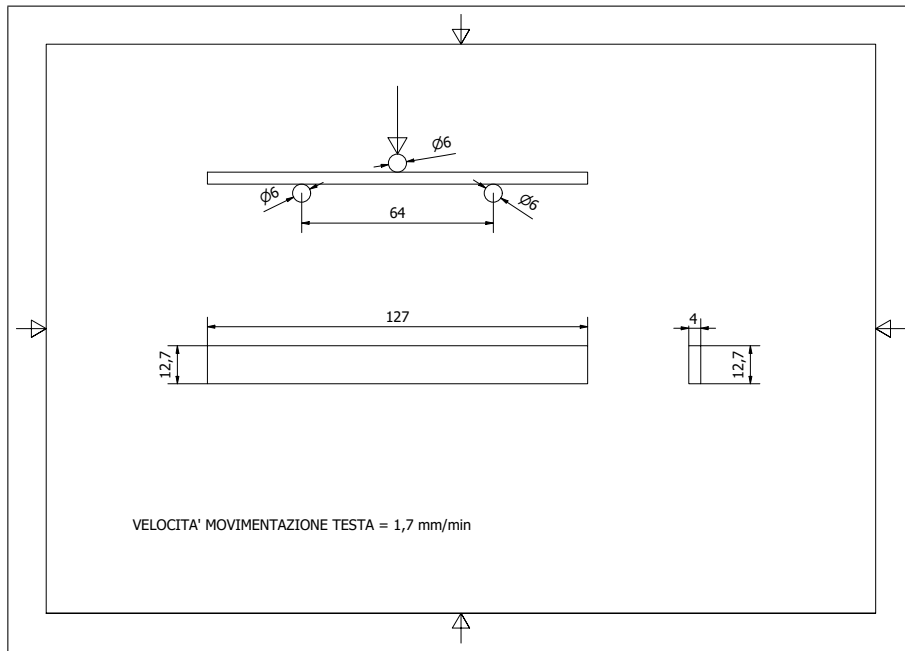


Figura 5.5: Provino per test di flessione da normativa ASTM D 790-10, geometria come da paragrafo 7.4, indicata per materiali termoplastici e termoindurenti.

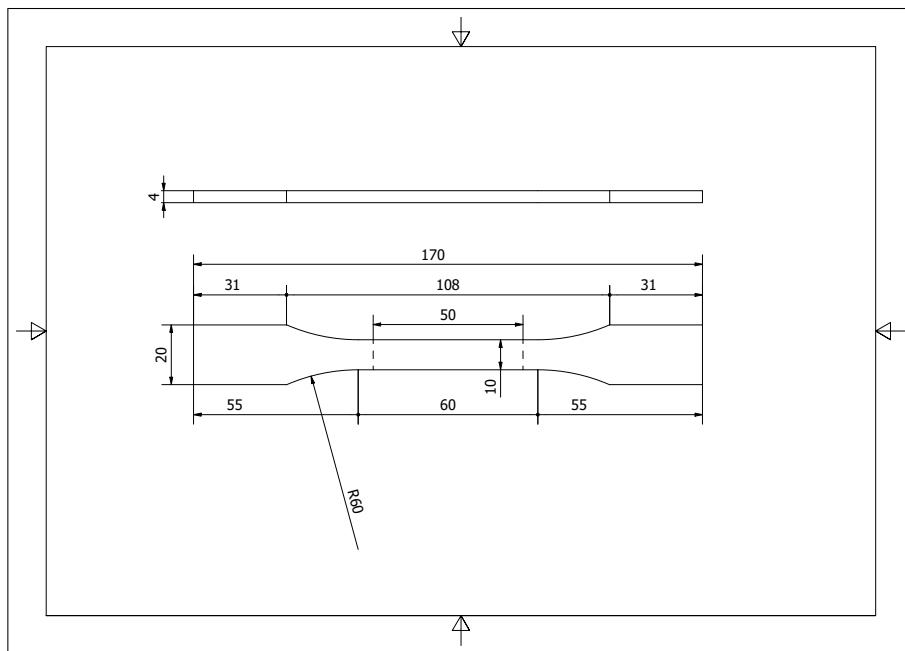


Figura 5.6: Provino per test a trazione, la geometria utilizzata è la 1A in Figura 1 della normativa BS EN ISO 527-2-2012.

Codice	Materiale Base	Rivestimento	Spessore (mm)	# Pezzi	Test
009	MED610	N/A	N/A	5	Flessione
010	MED610	MED625FLX	0,6	5	Flessione
011	MED625FLX	MED610	0,6	5	Flessione
012	MED610	N/A	N/A	5	Trazione
013	MED610	MED625FLX	0,6	5	Trazione
014	MED625FLX	MED610	0,6	5	Trazione

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva delle stampe effettuate per i provini dei test meccanici. Sono indicati i rispettivi spessori del rivestimento e i test da effettuare per ogni stampa, unitamente alla codifica utilizzata nel presente lavoro.

Figura 5.5. Nella tavola sono indicati anche i parametri di test, poiché da normativa lo spessore del provino e la distanza degli appoggi sono definiti in rapporto di 1:16 per la geometria scelta nella normativa ASTM D 790-10, per cui ad uno specifico valore di spessore corrisponde un valore esatto di distanza tra gli appoggi, per cui i due valori non possono essere svincolati. Lo spessore può essere scelto dovendo rispettare solo il vincolo di non eccedere di troppo i 3,2 mm di spessore, anche se un valore esatto non è fornito. Uno spessore di 4 mm consente un'adeguata resistenza alla flessione del materiale necessaria per rendere i carichi rilevabili correttamente dalla cella di carico, che in caso di valori bassi potrebbe non leggere bene. Inoltre, lo spessore in tal modo è lo stesso del provino di trazione, così da poter valutare le proprietà a flessione e a trazione su geometrie molto simili.

I provini da 012 a 014 rappresentano il corrispettivo di quanto sopra per i test di trazione. La decisione di utilizzare una forma con una sezione piuttosto larga è dovuta principalmente alla necessità di raggiungere dei carichi elevati nel test sollecitando maggiormente la cella di carico e ottenendo così dati definiti. In questo caso le dimensioni sono indicate in modo preciso all'interno della normativa BS EN ISO 527-2-2012, su cui, come già precisato, è stata adattata anche lo spessore della geometria per il test di flessione.

5.1.3 Test di Flessione

Il test operato è un test di flessione a tre punti, in cui i tre rulli, due di appoggio ed uno di spinta, hanno diametro pari a 6 mm e la distanza tra gli appoggi è determinata dallo spessore del provino nella direzione di carico, in questo caso 4

mm, che deve essere un sedicesimo della distanza tra i due rulli di appoggio, che risulta dunque essere uguale a 64 mm.

La velocità di movimentazione della testa è determinata tramite l'Equazione 5.1, in cui l'unico parametro non geometrico risulta essere Z , che rappresenta la velocità, in mm/min, di estensione della fibra più esterna del provino, ed ha un valore consigliato di 0,01 mm/min. Considerando tale valore, e inserite le misure di spessore (d) e distanza tra gli appoggi (L), l'equazione restituisce un valore di velocità di test di 1,7 mm/min.

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (5.1)$$

Con questi valori il test di flessione è completamente definito. Purtroppo queste formule sono state pensate per materiali omogenei, o che possono essere considerati tali, e non "laminati" come i provini. Tuttavia tale accorgimento incide maggiormente sulla distribuzione degli sforzi nella sezione rispetto al campo deformativo del pezzo.

Per quanto riguarda i risultati, sempre facendo riferimento alla normativa, la curva sforzo-deformazione viene calcolata sulla base del grafico carico-deflessione (N-mm) che il macchinario restituisce come output. Per il calcolo dello sforzo si fa riferimento all'Equazione 5.2, i cui parametri sono il carico P in N (output), lo spessore d in mm, la larghezza b in mm e la distanza tra gli appoggi L in mm. Data la formula:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (5.2)$$

sostituendo con i valori geometrici si ottiene:

$$\sigma_f = 0,4724P \quad (5.3)$$

dove il carico P è espresso in N e σ_f in MPa.

Il procedimento è identico per la valutazione della deformazione a partire dalla deflessione del provino, corrispondente allo spostamento della testa relativamente alla posizione di inizio, e la formula per la conversione della deflessione in deformazione è espressa nell'Equazione 5.4:

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (5.4)$$

in cui D è la deflessione in mm, e quindi lo spostamento della testa considerato come zero l'inizio del test al tocco tra testa e provino. Sostituendo i valori conosciuti si ottiene :

$$\varepsilon_f = 0,005859D \quad (5.5)$$

Queste le formule con cui sono stati convertiti i grafici carico-deflessione in output dal macchinario. Le curve sforzo-deformazione così ottenute mostrano il comportamento a flessione e i punti di rottura del materiale.

In conclusione il modulo elastico a flessione è stato valutato come derivata della curva sforzo-deformazione nell'intorno dell'origine.

5.1.4 Test di Trazione

Per quanto riguarda i test di trazione, l'unica geometria da definire riguarda il provino, per cui si hanno, considerando la geometria 1A della normativa BS EN ISO 527-2-2012, 50 mm di tratto utile (su 60 mm di tratto rettilineo) che vengono definiti meccanicamente durante il test con i coltelli dell'estensimetro. La velocità di movimentazione della testa da normativa è indicata a 1 mm/min per provini di tipo 1A, ma per questioni di tempistiche di laboratorio i provini sono testati utilizzando come tale parametro il valore di 5 mm/min.

In questo caso è il macchinario stesso a restituire la curva sforzo deformazione, in quanto prima del test vengono inserite nel software le dimensioni della sezione del provino, per cui il carico viene normalizzato su tale misura, mentre la deformazione è calcolata automaticamente per differenza dalla posizione iniziale dei coltelli dell'estensimetro.

L'elaborazione, a differenza dei test di flessione, riguarda la valutazione dei valori medi di modulo per ogni materiale testato, ed il confronto con le previsioni teoriche. Come anticipato nella Sezione 5.1.1, non essendo facile testare il MED625FLX, viene inizialmente considerato un valore di modulo elastico di 2 MPa, con cui è possibile valutare con buona approssimazione un valore teorico atteso, unitamente alle caratteristiche e i valori del MED610 valutati tramite il test dei cinque provini 012.

Il modello utilizzato per la valutazione teorica delle proprietà meccaniche è la regola delle miscele, un modello estremamente semplice ma che può essere in base alle necessità adeguato tramite dei parametri correttivi, considerando spessori di rivestimento diversi.

Nella prima parte del presente lavoro l'obiettivo è valutare la fattibilità della stampa, le proprietà meccaniche dei materiali compositi stampati ed eventualmente dimostrare l'effettiva applicabilità della regola delle miscele in un modello iso-deformativo di Voigt [21] ai multi-materiali stampati con tecnologia PolyJet, tutto al fine di avere gli strumenti necessari all'eventuale progettazione di trattamenti ortodontici con allineatori trasparenti.

A questo scopo si riporta in Equazione 5.6 la regola delle miscele che verrà utilizzata per tali valutazioni, specialmente per la previsione ed il confronto con i dati sperimentali del valore di modulo elastico che maggiormente interessa la progettazione di allineatori trasparenti.

$$E_{tot} = x_a E_a + x_b E_b \quad (5.6)$$

Formula molto semplice, in cui x rappresenta la frazione in sezione di un materiale, mentre E è il modulo elastico di quel materiale nello stato puro omogeneo.

Nel caso considerato in questa ricerca, per i provini di flessione la sezione totale è di 40 mm^2 , che considerando $0,6 \text{ mm}$ di rivestimento viene ripartita secondo una frazione di $0,616$ per il materiale base e $0,384$ per il rivestimento. In tal modo diventa :

$$E = 0,616 E_{Base} + 0,384 E_{Rivest}. \quad (5.7)$$

Questa l'equazione per la valutazione del modulo teorico dei compositi, che viene successivamente confrontato con quello sperimentale, verificando se effettivamente la regola delle miscele sia rispettata da tali materiali.

5.2 Risultati

Seguendo le procedure indicate nel precedente paragrafo, sono state ottenute le curve sforzo-deformazione per i test di trazione e flessione. Le curve ottenute per i test di trazione sono mostrate in Figura 5.7, in cui tutti i test sono mostrati.

Risulta immediato osservare che una delle curve, in azzurro nell'immagine, relativa ad un test su MED610 puro devia in prossimità del punto di snervamento. Tale curva rappresenta il primo test eseguito utilizzando la velocità di movimentazione della testa consigliata da normativa di 1 mm/min , grazie a cui è stata determinata la necessità di svolgere i test ad una velocità maggiore come prima accennato. Tale aspetto è di interesse per degli sviluppi futuri di ricerca e viene indagato [successivamente](#).

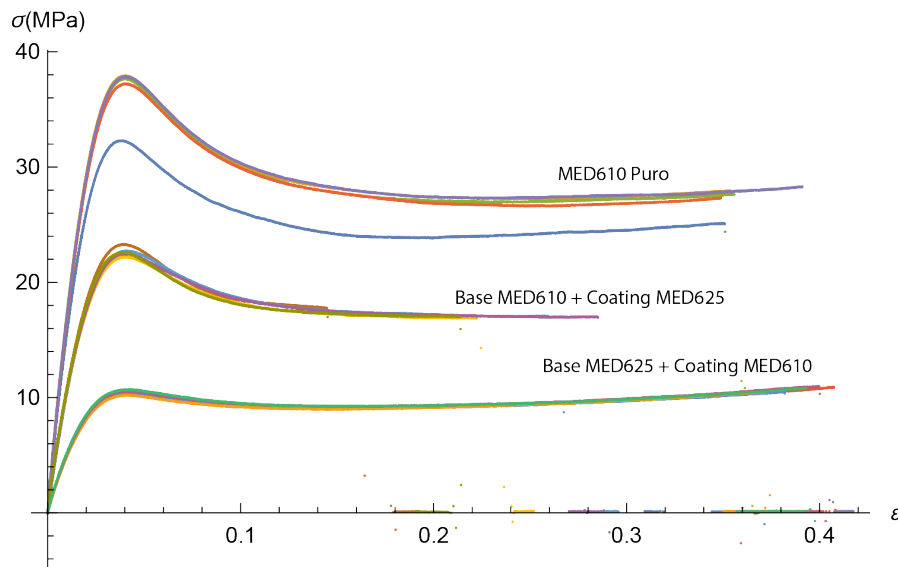


Figura 5.7: Risultati delle prove di trazione sulle tre tipologie di materiale testato.

Si osserva nel grafico un'ottima riproducibilità delle proprietà nei vari campioni, segno questo dell'alta qualità e precisione di stampa della tecnologia PolyJet. Per quanto riguarda il MED610 puro, la media degli sforzi massimi registrati a rottura è di 36,6 MPa, ben lontano dal valore di 50-65 MPa fornito da Stratasys. Questo si spiega per l'elevata sensibilità ai difetti del MED610, difetti come cricche o intagli micrometrici che anche se molto piccoli condizionano molto le sue proprietà creando zone di intensificazione locale degli sforzi. In Tabella 5.2 sono riassunti i valori valutati tramite i test di trazione.

Test	Modulo (MPa)	Sforzo Massimo (MPa)	Deformazione a Rottura (%)
1	1791	32	35,1
2	1986	38	35,4
3	1941	38	35,6
4	1897	37	34,9
5	1985	38	39,1
Media	1920	36,6	36,02

Tabella 5.2: Riassunto delle principali proprietà meccaniche misurate del MED610 puro (Provini 011).

I valori di deformazione a rottura indicano ovviamente la rottura del provino e dunque la fine del test, ma non danno informazioni sullo snervamento, che si attesta

per il MED610 puro poco al di sopra del 4 % di deformazione, in totale disaccordo con i valori di 10-25 % forniti dal produttore. Anche in questo valore ritroviamo una particolare sensibilità del MED610 ai difetti. Per il valore di modulo elastico invece, pur trovando un valore di poco sotto all'intervallo indicato nella scheda del materiale (2000-3000 MPa), la media dei test mostra un risultato molto vicino con 1920 MPa.

Per quanto riguarda il MED610 rivestito con MED625FLX, si nota una diminuzione della resistenza meccanica, dovuta principalmente alla sostituzione, rispetto al provino in materiale singolo, di una porzione di sezione con un materiale molto meno resistente. Il confronto utilizzando la regola delle miscele mostrerà se le proprietà normalizzate sulla sezione effettiva di MED610 in proporzione sul totale saranno in accordo con i dati rilevati sperimentalmente. I valori misurati nei test sono mostrati in Tabella 5.3

Test	Modulo (MPa)	Sforzo Massimo (MPa)	Deformazione a Rottura (%)
1	1251	23	14,5
2	1156	23	26,7
3	1253	22	22,4
4	1240	22	28,5
5	1271	23	21,4
Media	1234,2	22,6	22,7

Tabella 5.3: Riassunto delle principali proprietà meccaniche misurate del MED610 rivestito con uno spessore di MED625FLX di 0,6 mm sull'intera superficie (Provini 013).

In questo caso il modulo risulta più basso rispetto al materiale puro, come lo sforzo massimo sopportato, rispettivamente di 1234,2 MPa e 22,6 MPa (valori medi dei cinque provini). Entrambi i valori si spiegano semplicemente con l'introduzione di una porzione meno resistente di materiale, mentre la deformazione a snervamento (e non a rottura, che è indicata in tabella) risulta identica al MED610 puro con un valore di poco superiore al 4 %, come atteso in quanto il materiale base è il medesimo.

L'ultimo materiale testato è il MED625FLX con un rivestimento di MED610 dello spessore di 0,6 mm, codificate nella stampa con il numero 014. Rispetto all'altro materiale composito (Cod. 013), non ci sono molte variazioni, se non che nel caso precedente il rivestimento esterno è un materiale molto elastico, mentre per questo provino esternamente è presente un materiale rigido, il MED610, che come

è evidente dal confronto dei valori sperimentali con quelli pubblicati dal fornitore, è molto suscettibile anche a minimi difetti, che rimangono intrinseci nella tecnica di stampa 3D, anche se ridotti al minimo dall'accuratezza della tecnologia PolyJet.

Test	Modulo (MPa)	Sforzo Massimo (MPa)	Deformazione a Rottura (%)
1	613	11	40,8
2	604	11	38,2
3	564	11	37,2
4	606	11	40
5	619	11	39,3
Media	601,2	11	39,1

Tabella 5.4: Riassunto delle principali proprietà meccaniche misurate del MED625FLX rivestito con uno spessore di MED610 di 0,6 mm sull'intera superficie (Provini 014).

In Tabella 5.4, secondo lo stesso schema dei precedenti materiali, sono riassunti i risultati ottenuti per i provini 014. I valori medi mostrano un'ulteriore abbassamento del modulo e dello sforzo massimo, dovuti sicuramente alla riduzione della frazione in sezione di MED610, che conferisce resistenza meccanica al materiale. Infatti il materiale di rivestimento, in una sezione complessiva di 4 mm di larghezza e 12,7 mm di lunghezza, corrisponde all'area compresa tra il bordo della sezione e un'offset di 0,6 mm da quest'ultimo, andando a contribuire in minore quantità alla resistenza totale.

La deformazione a snervamento risulta invece identica anche in questo caso, per cui si determina che tale valore del 4 % rappresenti definitivamente la deformazione a rottura del MED610 nelle condizioni come stampato, senza nessun processo di pulitura e successivamente al solo processo di rimozione dei supporti.

Andando invece a presentare i risultati a flessione, mostrati nel grafico in Figura 5.8, è possibile osservare come la dispersione sia maggiore rispetto al grafico dei test a trazione, soprattutto per quanto riguarda il MED610 puro, aspetto che trova una giustificazione sempre nella sensibilità ai difetti del MED610. Come era presumibile, infatti, il materiale composito in MED610 base e MED625FLX come rivestimento, mostra una migliore riproducibilità dei risultati, aspetto che conferma una sensibilità ai microscopici difetti di stampa minore del MED625FLX rispetto al MED610.

Tramite l'utilizzo delle formule esposte nella Sezione 5.1.3, la curva sforzo-deformazione è stata estrapolata dai dati della curva carico-deflessione. I valori medi così ottenuti

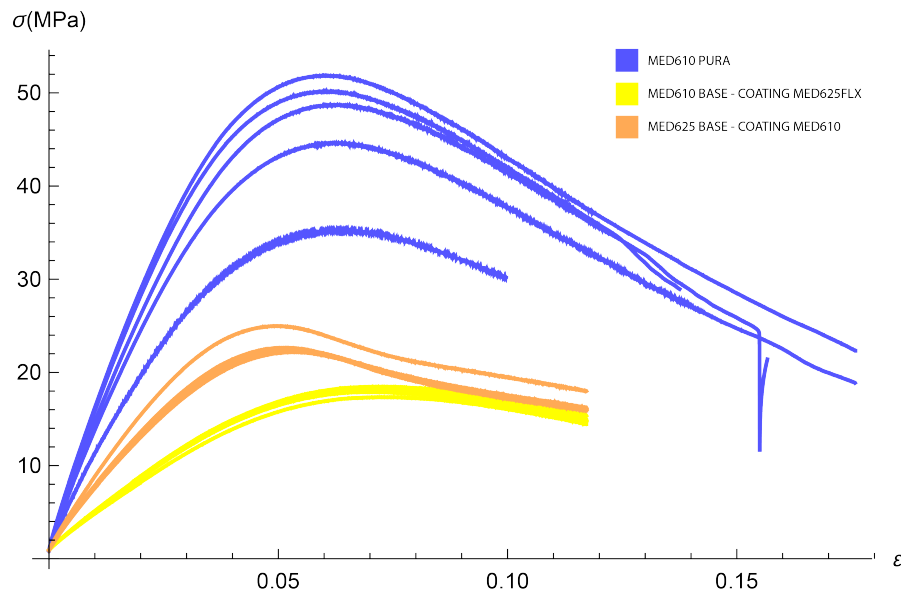


Figura 5.8: Risultati dei test a flessione effettuati sui tre materiali considerati nella ricerca.

per il MED610 puro sono riassunti in Tabella 5.5.

Test	Modulo (MPa)	Sforzo Massimo (MPa)	Deformazione a Rottura (%)
1	1023,404	35,19533	6,3311
2	1430,567	51,79682	6,0666
3	1226,93	44,5359	6,2701
4	1276,814	48,6625	6,3125
5	1447,99	50,18679	6,0442
Media	1281,141	46,075468	6,2049

Tabella 5.5: Riassunto delle principali proprietà meccaniche a flessione misurate del MED610 puro (Provini 009).

Si osserva facilmente come i valori medi di deformazione a snervamento vadano a riflettere i corrispettivi nei test di trazione. Essendo la modalità di misurazione diversa, quantità diverse sono attese, ma la vicinanza di tali valori alza sicuramente il grado di affidabilità dei dati.

Il modulo a trazione calcolato risulta di poco più alto rispetto al valore valutato nei test di flessione, e confrontando queste due quantità con i dati del produttore si osserva che l'andamento è lo stesso rispetto a queste ultime, con un valore nel datasheet di resistenza a trazione, valutato sempre tramite test da normativa ASTM

D 790, compreso tra 2200 MPa e 3200 MPa, contro il valore medio sperimentale di 1281,141 MPa. Entrambe le prove, di trazione e flessione, mettono quindi in luce una discrepanza tra i valori forniti dal produttore e quelli reali calcolati che risultano minori, rafforzando ulteriormente l'ipotesi che le proprietà fornite dal produttore siano state valutate su parti con superfici senza difetti di stampa.

La forte oscillazione dei valori calcolati di modulo elastico a flessione, ma soprattutto per quello di sforzo massimo, alla fibra più esterna, dimostrano ancora una volta la sensibilità ai difetti di questa resina rigida, tesi rafforzata ulteriormente dall'andamento identico di modulo e sforzo massimo nei diversi provini, in cui la causa dell'innalzamento o abbassamento di tali valori riguarda senza dubbio la presenza di difetti, che risultano tuttavia difficili da valutare con un'ispezione visiva.

Test	Modulo (MPa)	Sforzo Massimo (MPa)	Deformazione a Rottura (%)
1	409,8341	18,46824	7,2142
2	409,0507	18,27294	7,0382
3	405,3568	17,89597	7,0401
4	411,9951	18,26163	7,0766
5	378,1951	17,34188	7,2813
Media	402,88636	18,048132	7,13008

Tabella 5.6: Riassunto delle principali proprietà meccaniche a flessione misurate del MED610 base con un rivestimento da spessore 0,6 mm sull'intera superficie (Provini 010).

I dati mostrati in Tabella 5.6 mostrano i valori dei picchi delle curve e i moduli elastici calcolati dei provini in MED610 rivestito con MED625FLX. Risulta immediato notare come il valore di estensione a rottura sia maggiormente alto rispetto a quello di MED610 puro, caratteristica che deriva dalla presenza sulla superficie di un materiale molto elastico che permette, oltre che accomodare gli sforzi anche di ridurre la sensibilità ai difetti. Tutto questo ovviamente considerando l'effetto sulla rigidità meccanica, che come è possibile osservare è parecchio ridotta.

Ad ogni modo è bene fare presente che tale risultato, in termini di sforzo massimo e modulo elastico è approssimato in quanto le formule utilizzate considerano il materiale come omogeneo, caratteristica che esso non possiede. L'approssimazione rimane comunque valida e i valori sono da considerarsi accettabili, soprattutto considerando lo spessore del rivestimento molto basso.

Test	Modulo (MPa)	Sforzo Massimo (MPa)	Deformazione a Rottura (%)
1	777,5723	24,8873	4,9327
2	692,1497	22,57118	5,0923
3	675,5742	22,3947	5,2267
4	661,2734	22,10152	5,2994
5	682,8197	22,30137	5,2237
Media	697,87786	22,851214	5,15496

Tabella 5.7: Riassunto delle principali proprietà meccaniche a flessione misurate del MED625 base con un rivestimento di MED610 da spessore 0,6 mm sull'intera superficie (Provini 011).

L'ultimo materiale testato in flessione è il composito con MED625FLX come base e MED610 a rivestirlo, da cui è attesa sicuramente una rigidità maggiore nonostante la frazione in sezione di materiale rigido MED610 sia minore rispetto ai provini con i materiali inversi, dove la porzione di MED610 è maggiore. Tale ipotesi è dovuta alla distribuzione nella sezione del materiale più rigido che se utilizzato come rivestimento occupa la zona che contribuisce maggiormente al momento di inerzia della sezione. I dati mostrati in Tabella 5.7 confermano questa ipotesi, mostrando inoltre un abbassamento della deformazione a rottura della fibra più esterna, che ancora una volta conferma quanto ripetuto più volte riguardo alla suscettibilità ai difetti di stampa del MED610, che essendo esterno in questo caso non vengono rinforzati dalla presenza del MED625FLX che essendo molto elastico ne compensa l'intensificazione locale degli sforzi.

5.3 Discussione dei Risultati e Conclusioni

Dai risultati dei test meccanici è evidente come la stampa di multi-materiali possa andare a modificare nettamente le proprietà meccaniche di un materiale base, migliorandone le caratteristiche che lo rendono inutilizzabile o difficilmente utilizzabile. Questo è il caso dei materiali considerati, in cui la parte viene costruita utilizzando come materiale il MED610, ma che da solo risulterebbe oltremodo fragile e suscettibile a rottura. Un riassunto dei test di trazione effettuati, con un confronto con il Duran®[®], marchio registrato della Scheu Dental GmbH e materiale largamente utilizzato per la produzione di allineatori trasparenti termoformati, è mostrato in Figura 5.9. La curva sforzo-deformazione è stata reperita da ricerche effettuate su tale materiale [32].

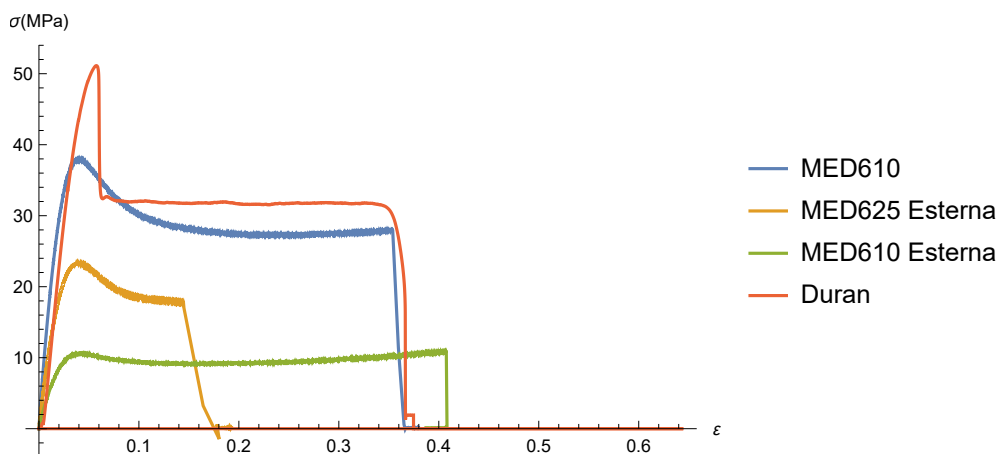


Figura 5.9: Riassunto delle prove di trazione e confronto con Duran®[32].

Il modulo elastico relativo al Duran® valutato tramite la curva in Figura 5.9 è di 1693 MPa, nello stato termoformato a cui fa riferimento la curva.

Il MED610 risulta dunque più rigido del Duran®, nonostante lo sforzo a rottura sia molto più basso. Ad ogni modo tali sforzi non vengono raggiunti nel comune utilizzo degli allineatori, motivo per cui il MED610 rimane un'ottima alternativa nella produzione di allineatori trasparenti. La problematica in questo caso rimane l'eccessiva rigidità del materiale, che porta lo porta a rottura per deflessioni davvero basse. Considerando i materiali compositi, i cui valori risultati dai test a trazione unitamente a quelli di MED61 e Duran® sono riassunti in Tabella 5.8, si nota come la resistenza meccanica sia inferiore rispetto al Duran®, come gli sforzi di snervamento.

Materiale	Modulo [MPa]	σ_y [MPa]
Duran®	1693 [32]	53.52 [32]
MED610	1920	36,6
MED610 _{CTD} MED625FLX	1234,2	22,6
MED625FLX _{CTD} MED610	601,2	11

Tabella 5.8: Valori medi risultanti dai test di trazione di quattro materiali : Duran®, MED610, MED610_{CTD} MED625FLX e MED625FLX_{CTD} MED610.

In questo scenario il Duran® si mostra come un materiale molto più resistente rispetto ai materiali testati, e questo vale anche per altri materiali al momento largamente utilizzati per la termoformatura di allineatori dentali, per cui è possibile affermare definitivamente che i materiali puri o compositi formati da MED610 e

MED625FLX possiedono sforzi a snervamento relativamente ridotti. Considerando tuttavia le forze tipiche in gioco nel processo di riallineamento, si nota che esse sono dell'ordine di grandezza di 10^{-1} N, forze che se applicate ad una superficie di 1 mm^2 , dell'ordine di grandezza di quella effettiva su cui poi tali forze scaricano all'interno dell'allineatore, producono degli sforzi che non superano certamente l'ordine di pochi MPa. Questo porta immediatamente a considerare tutti i materiali testati come possibili scelte per la produzione di allineatori trasparenti, in quanto nessuno di essi andrebbe incontro a snervamento per valori così bassi di sforzo.

Un valore molto più interessante nella valutazione del confronto con il Duran® è la deformazione di snervamento. In questo caso i materiali stampati con tecnologia PolyJet risultano avere una deformazione a rottura simile a tale materiale di riferimento, con un valore di circa il 4 % contro il 6 % circa del Duran®. In queste considerazioni va sicuramente tenuto conto che a dare resistenza meccanica ai materiali PolyJet è il MED610, per cui i valori di deformazione a snervamento sono determinati da tale materiale, che essendo suscettibile ai difetti di stampa riduce di parecchio il valore di sforzo a snervamento, che come è indicato in Figura 5.4, secondo i dati del fornitore risulta essere compreso tra 50 MPa e 55 MPa, e quindi nello stesso intervallo in cui si attestano le caratteristiche meccaniche del Duran®. La rimozione dei difetti superficiali probabilmente ridurrebbe l'intensificazione degli sforzi in tali zone, portando la resistenza meccanica ad un livello superiore, anche se questa rimane un'ipotesi da verificare in quanto il materiale con MED610 base e rivestimento in MED625FLX mostra un aumento della deformazione a snervamento, ma non dello sforzo massimo, nonostante il rivestimento elastico vada a rendere meno fragile il MED610. Questa verifica costituisce sicuramente uno spunto per ricerche future.

Un altro aspetto molto importante per i materiali compositi, oltre all'effettiva resistenza meccanica, che risulta essere comunque sufficiente ai fini del trattamento, è la previsione delle caratteristiche del materiale, in modo da poter valutare la forma da dare all'allineatore per ottenere una forza precisa in valore e direzione. A questo scopo sono stati calcolati i valori attesi teorici del modulo elastico dei due materiali compositi utilizzando per il MED610 il modulo ricavato tramite i test dei provini 012 (1920 MPa), e per il MED625FLX un valore approssimativo di 2 MPa, in quanto non è stato possibile testare in trazione tale materiale e questo valore non è fornito dal produttore. I risultati ottenuti utilizzando come modello la regola delle miscele sono mostrati in Tabella 5.9.

L'applicabilità della regola delle miscele al materiale composto da MED610 rivestito con MED625FLX è verificata, con uno scarto percentuale di 0,395 %, per cui

Materiale	Modulo Sperimentale (MPa)	Modulo Teorico (MPa)	Scarto Percentuale (%)	Regola delle Miscele
MED610 _{CTD} MED625FLX	1234,2	1229,34	0,395	Sì
MED625FLX _{CTD} MED610	601,2	772,66	-22,96	Necessari Coefficienti

Tabella 5.9: Confronto tra valori sperimentali e teorici dei moduli elastici, con relativo scarto percentuale tra i due valori. Il modulo teorico è stato valutato utilizzando la regola delle miscele.

risulta facile prevederne il comportamento meccanico, almeno per quanto riguarda lo stato di sforzo a trazione. Essendo stato utilizzato comunque un valore ipotizzato per il modulo elastico del MED625FLX, tale dato risulta comunque adeguato. È possibile comunque, tramite un calcolo a ritroso, valutare il valore del modulo elastico del MED625FLX ponendo uguale a 0 il valore di scarto tra modulo sperimentale e teorico del materiale composito ottenendo un risultato di 14,59 MPa, molto vicino per ordine di grandezza al valore di 2 MPa ipotizzato inizialmente. Viene così misurato indirettamente il modulo elastico del MED625FLX.

Utilizzando tale dato è stato calcolato il modulo teorico del composito con materiale base MED625FLX, che purtroppo mostra uno scarto molto alto, che porta così alla conclusione che il secondo materiale composito, relativo ai provini 014, non risponde alla regola delle miscele. In questo caso è possibile introdurre un fattore correttivo al valore del modulo del MED610, probabile responsabile di questa discrepanza (susceptibilità ai difetti), pari a 0,778, che se moltiplicato al valore calcolato con i test sui provini 012 porta alla riduzione dello scarto tra modulo teorico e sperimentale di 0. Test multipli con diversi spessori potrebbero portare alla definizione di una funzione che permetta di determinare il valore di tale coefficiente in funzione dello spessore dello strato di materiale rigido. Tale compito è lasciato a ricerche future.

Ulteriori osservazioni possono essere effettuate studiando i grafici riassuntivi dei test di flessione (Figura 5.10), che mostrano meglio le differenze tra i diversi materiali. È da notare che nessuno dei provini testati a flessione ha subito rottura netta durante i test, e una discriminazione in questo senso può essere effettuata osservando i provini testati verificando tra questi quali abbiano subito una netta deformazione plastica. Solo per il provino 011, infatti, la deformazione permanente è praticamente nulla, sintomo della reale resistenza a flessione di tale materiale

senza incorrere in rottura o deformazione permanente, che ai fini dell'utilizzo corrisponde alla rottura, in quanto l'allineatore non sarebbe più in grado di svolgere il suo lavoro correttamente generando delle forze in direzioni non desiderate.

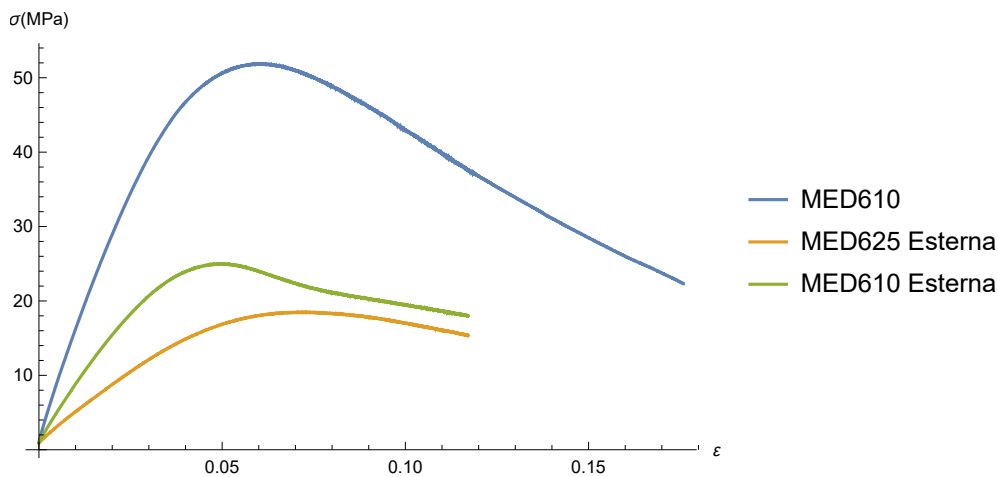


Figura 5.10: Riassunto grafico delle prove di flessione effettuate sui tre materiali. È possibile osservare come i materiali compositi mostrino un comportamento di maggiore flessibilità, riducendo il drastico calo di resistenza meccanica, e ampliando l'intervallo di deformazione elastica nel caso del MED610 rivestito di MED625FLX.

In questo senso il materiale che meglio performa risulta essere il MED610 rivestito con MED625FLX, che, come è possibile osservare dal grafico in Figura 5.10, mostra una curva sforzo-deformazione molto omogenea e che vede lo snervamento del materiale per deformazioni attestata intorno al valore del 7 %, confermando il valore trovato con i test di trazione, ma che comunque non segna l'inizio di un netto calo della curva che invece subisce solo un lieve abbassamento per deformazioni più alte ma senza una rottura netta e perfettamente distinguibile, tanto che come già precisato i provini testati non riportano nessuna deformazione residua (Figura 5.11). Al contrario, per il MED625FLX rivestito con MED610, la curva mostra un picco in corrispondenza del 5 % circa di deformazione per poi incontrare un punto di rottura.

Osservando i valori di sforzo si nota però che, nonostante il MED610 puro e il MED625FLX rivestito in MED610 mostrino rottura a basse deformazioni, i valori di sforzo tipici a cui sono sottoposti gli allineatori sono nettamente inferiori a quelli necessari per raggiungere la rottura per flessione in opera. Questo conferma l'utilizzabilità di ognuno dei materiali testati come materiale di stampa per la produzione di un allineatore dentale.

Concludendo, il materiale a base MED610 rivestito in MED625FLX è risultato essere il miglior compromesso in termini di resistenza a trazione e flessione, come

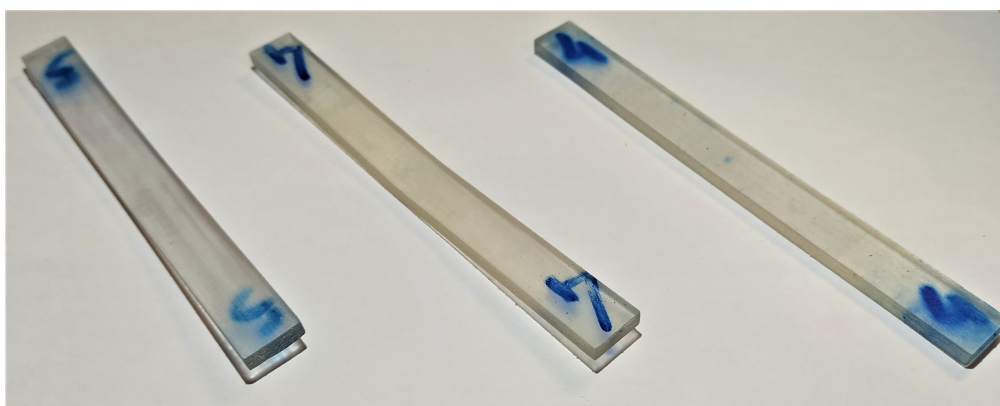


Figura 5.11: Provini 009, 011 e 010 (da sinistra) dopo il test di flessione. La deformazione residua è evidente nei provini 009 e 010. Il provino 011, in MED610 rivestito con MED625FLX mostra un recupero elastico praticamente totale. L'ombra dei provini è stata utilizzata per dare una misura qualitativa della flessione relativa.

risultato del tentativo di tenacizzazione in flessione del materiale puro MED610. Le proprietà meccaniche rispetto al MED610 risultano molto migliorate rispetto al suo stato puro, mostrando una curva sforzo deformazione molto omogenea e senza picchi netti di cedimento dal provino.

Il materiale nel corso dei test ha dimostrato comunque un buon grado di riempimento e anche nelle misurazioni operate per inserire i dati relativi alle misure della sezione ha dimostrato una tolleranza dimensionale nell'ordine di 0,05 mm, a dimostrazione dell'alto livello di accuratezza della stampa.

Il MED610 risulta comunque come un sostituto valido a materiali da termoformatura come il Duran®[®], possedendo caratteristiche meccaniche molto simili, a meno della tenacità di cui gli allineatori dentali necessitano per non subire rotture accidentali. In linea di massima tutti i materiali testati possiedono le caratteristiche necessarie per essere utilizzati in tal senso, con una particolare attenzione sul MED610 rivestito in MED625FLX che avvicina maggiormente le caratteristiche del Duran®[®] per l'aspetto riguardante la flessibilità del prodotto finito. Tale rivestimento costituisce dunque un'ottima opportunità per ovviare alle problematiche più volte citate del MED610.

Capitolo 6

Finitura Superficiale Degli Allineatori

La seconda parte di questo lavoro è stata concentrata sul miglioramento della finitura superficiale di allineatori stampati in 3D con tecnologia PolyJet, utilizzando una stampante della linea Objet. La valutazione delle diverse possibilità che offre il mercato dei processi di finitura ha portato a definire come migliore tecnica utilizzabile, specificatamente per gli scopi di questa ricerca, la finitura in tamburo rotante ("barrel finishing"). A tale scopo è stato progettato e prodotto un apparato specifico, pensato per poter contenere tre tipologie di cariche, elencate di seguito:

- Abrasivo
- Solvente
- Abrasivo e solvente

Tramite queste tre configurazioni è stato possibile indagare gli effetti di processi diversi e ibridi sui materiali utilizzati, per cui poco è disponibile in letteratura in termini di processi di post-processing. I risultati e i parametri di lavorazione sono indagati nel capitolo corrente.

6.1 Materiali e Metodi

I materiali utilizzati per questa parte della ricerca sono i medesimi indagati tramite le prove meccaniche precedentemente presentate nel corso del Capitolo 5. Ovviamente gli spessori di stampa sono differenti, e perciò è stato possibile osservare

in primis il comportamento meccanico nel maneggiamento di tali dispositivi stampati in 3D, avendo così la possibilità di operare una valutazione qualitativa della resistenza meccanica delle parti esattamente dopo la stampa per spessori tipici di produzione degli allineatori trasparenti. In aggiunta a tali materiali, nella fase iniziale del progetto, sono stati prodotti degli allineatori stampati in MED625FLX pura, con la speranza che dimostrasse una resistenza meccanica sufficiente a formare un allineatore. Purtroppo tale ipotesi si è dimostrata fallimentare, e nella fase di lavaggio per la rimozione del materiale di supporto questi allineatori sono andati incontro a rottura. Per questo motivo il MED625FLX puro è da scartare come possibile materiale per la stampa di tali dispositivi.

L'unica considerazione mancante a riguardo dei materiali utilizzati è la loro composizione chimica, che verrà indagata nella Sezione [6.1.2](#).

6.1.1 Geometrie e Stampa

Le geometrie utilizzate per la stampa, come tutti i provini testati nella presente ricerca, sono state prodotte da [Airnivol S.p.A.](#) tramite il software CAD [Dental-Cad](#) che permette di produrre modelli ortodontici ad alta accuratezza, utilizzato per creare i modelli digitali delle dentature da trattare e che produce la serie di geometrie che costituiscono il trattamento.

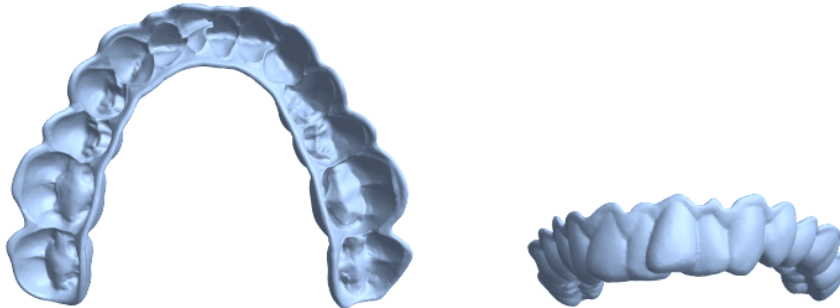


Figura 6.1: Dentatura considerata per un caso realistico. La differenza con un modello standard è la complessità della dentatura, tipicamente asimmetrica, e con sotto-squadri piuttosto difficili da trattare in finitura.

Per i test sono state considerate due dentature di base, una che rappresenta un caso realistico rappresentata da due angolazioni in [Figura 6.1](#), e una esemplificativa e rappresentante una dentatura simile a quello che potrebbe essere l'obiettivo del trattamento mostrata in [Figura 6.2](#). La differenza sostanziale tra le due dentature è la difficoltà di lavorazione, che risulta molto più elevata per un caso reale, in cui non è presente simmetria della dentatura che si traduce in una minore uniformità

del trattamento, e nel quale i sotto-squadri possono essere parecchio problematici da lavorare, soprattutto con l'abrasivo in quanto al loro interno la superficie è meno esposta alla collisione con la grana nel tamburo. Questa precisazione è dovuta, poiché dei risultati negativi su una dentatura complessa potrebbero essere accompagnati da risultati positivi su una dentatura semplice, per cui la tecnica si dimostrerebbe efficace ma da implementare in termini di uniformità di lavorazione. Tale dentatura, presa a modello per simmetria e orientamento dei denti, è mostrata in due viste in Figura 6.2. È semplice notare come le sedi dei denti nell'allineatore siano maggiormente aperte verso l'esterno e senza sotto-squadri, motivo per cui è noto a priori che l'abrasivo avrà un effetto maggiore sulla superficie interna di questa dentatura rispetto alla stessa superficie della prima dentatura vista.

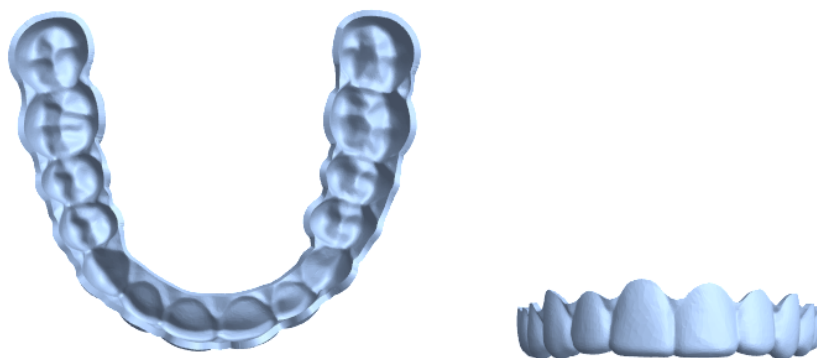


Figura 6.2: Seconda dentatura utilizzata nella stampa dei provini degli allineatori. La semplicità di tale forma consente una lavorazione maggiormente uniforme ed efficace anche nella cavità dove hanno sede i denti.

Queste due dentature sono state suddivise su due geometrie per ognuna, per un totale di quattro geometrie, con spessori diversi per i diversi materiali. Questo a causa dei parametri imposti dal software della stampante che consente la creazione di rivestimenti per uno spessore minimo di 0,3 mm, per cui non sarebbe stato possibile stampare degli allineatori in materiale composito con lo spessore tipico di un allineatore termoformato, prodotto solitamente da un disco con spessore di 0,75 mm che può ridursi localmente a causa del processo di termoformatura. Tale spessore risulta comunque problematico anche nella stampa di allineatori in materiale puro, ma per gli scopi della ricerca è stato deciso di utilizzare uno spessore di 0,5 mm per la stampa degli allineatori in MED610 puro, mentre per le stampe in multi-materiale con la modalità rivestimento si è mantenuto uno spessore di 1 mm, in modo da consentire la formazione di un rivestimento di 0,3 mm sui due lati dello spessore lasciando un cuore di materiale base di spessore 0,4 mm.

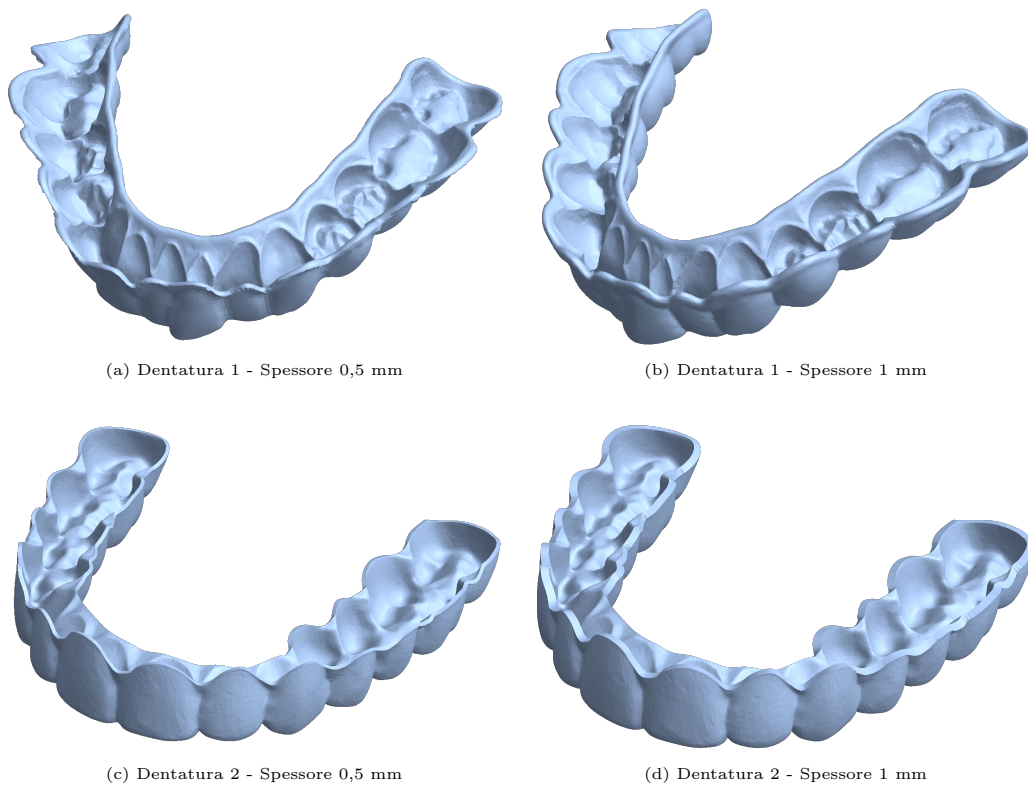


Figura 6.3: Riassunto grafico raffigurante la rappresentazione grafica dei file STL delle geometrie utilizzate per le stampe.

Le geometrie totali sono dunque quattro, riassunte in Figura 6.3, due costituite dagli allineatori relativi alla prima dentatura e due relative alla seconda, divise tra spessore 0,5 mm per la stampa con MED610 e spessore 1 mm per la stampa con modalità rivestimento di entrambe le dentature.

In Tabella 6.1 sono riassunte le stampe effettuate delle geometrie sopra elencate. La stampa è stata effettuata con modalità "matte" (opaca), e tale scelta deriva dalla necessità di testare un allineatore con una superficie omogenea in ogni punto, in quanto la modalità "glossy" produce superfici lucide soltanto sul lato esterno non a contatto con il supporto, caratteristica che avrebbe reso i test differenziati sulle due superfici, e che comunque non avrebbe reso totalmente trasparente i pezzi. Stampe in modalità "glossy" sono state effettuate successivamente come test secondari.

Geometria	Codice	Materiale Base	Rivestimento	Spessore Riv. (mm)	Nr. Pezzi
1_0,5 mm	001	MED625FLX	N/A	N/A	3
1.0,5 mm	002	MED610	N/A	N/A	3
2_0,5 mm	003	MED625FLX	N/A	N/A	3
2.0,5 mm	004	MED610	N/A	N/A	3
1_1 mm	005	MED610	MED625FLX	0,3	3
1.1 mm	006	MED625FLX	MED610	0,3	3
2_1 mm	007	MED610	MED625FLX	0,3	3
2.1 mm	008	MED625FLX	MED610	0,3	3

Tabella 6.1: Tabella riassuntiva delle stampe effettuate per gli allineatori. Sono indicati i rispettivi spessori del rivestimento, unitamente alla codifica utilizzata nel presente lavoro. In rosso le stampe effettuate in materiale MED625FLX puro, i pezzi si sono danneggiati già in fase di lavaggio di rimozione dei supporti.

La stampa è stata ovviamente effettuata con riempimento totale delle parti, che in altro modo sarebbero risultate discontinue nel volume e quindi intrinsecamente opache. A riguardo, per verificare l'effettiva omogeneità e assenza di vuoti dei materiali stampati, dei test preliminari con l'apparato di finitura sono stati effettuati per la taratura del macchinario e per prendere confidenza con tale apparato prima dei test sugli allineatori, mostrando che tali materiali possiedono un'ottima continuità, e che sicuramente non possiedono vuoti internamente. Per tali test sono stati utilizzati alcuni dei provini rimasti dai test meccanici, e i risultati di queste prove preliminari sono mostrati in Figura 6.4. Risulta evidente che l'effetto della pulitura in abrasivo rende la parte maggiormente trasparente, e non sono osservabili vuoti presenti all'interno del materiale.



Figura 6.4: Risultati dei test preliminari effettuati su MED610 per osservare l'effetto dell'abrasivo e l'eventuale presenza di vuoti nel materiale. I test mostrano che il miglioramento tramite l'utilizzo di abrasivo è possibile, e inoltre che il MED610 risulta completamente riempito con assenza di vuoti nel materiale. Nella foto : a sinistra il pezzo in MED610 testato con abrasivo, a destra la parte con una finitura "as-printed".

L'annerimento della superficie del provino testato è principalmente dovuto alla polvere di alluminio che si è andata a formare come prodotto delle collisioni tra abrasivo e tamburo, aspetto che con l'utilizzo è praticamente scomparso a causa del probabile incrudimento superficiale che l'alluminio della camera ha sperimentato. In conclusione, i materiali utilizzati sono gli stessi testati meccanicamente, mentre il fallimento della stampa di MED625FLX ha confermato che tale materiale non possiede le caratteristiche per essere utilizzato o testato. Per ogni provino sono stati stampati tre allineatori identici, al fine di testare i tre diversi processi di finitura superficiale, e valutarne gli effetti in modo qualitativo e con un confronto tra le diverse tecniche su geometrie identiche. Nel prossimo paragrafo le caratteristiche di questo processo, insieme con la descrizione dell'apparato sperimentale costruito e i parametri di lavoro, vengono indagati.

6.1.2 Processo di Finitura

Per operare la lucidatura degli allineatori stampati è stato scelto di effettuare un processo di finitura in tamburo, in modo da raccogliere risultati sull'effettiva utilità di tale tecnica con i materiali PolyJet MED610 e MED625. In questo caso ovviamente la problematica riguarda principalmente i materiali puri, in quanto il problema tribologico si pone solo alla superficie, e dunque anche per i materiali compositi solo sul materiale esterno a rivestire. In questo quadro, informazioni sulla tribologia, e in particolare sul problema dell'abrasione a due corpi, per resine termoindurenti non possiede una solida base in letteratura.

Per questo motivo, e per semplicità di reperimento, la scelta dell'abrasivo da utilizzare ha considerato un materiale generico quale l'ossido di alluminio, utilizzato in vari campi e per la lavorazione di molti materiali diversi, e spesso inserito in matrici a formare abrasivi solidi.

In un secondo momento, sono stati effettuati test di agitazione in solvente su tutte le tipologie di allineatori stampati come indicato in Tabella 6.1. In questo caso, contrariamente al processo di abrasione, indicazioni chiare e studi effettuati su diversi solventi sono presenti, che identificano come solvente ideale per la rimozione di difetti superficiali nei materiali stampati con resine della serie PolyJet l'alcol isopropilico puro (IPA 100%) [24].

Infine, grazie alle osservazioni rese possibili dalle prove separate con solvente e abrasivo, è stato deciso di testare un processo ibrido, come tentativo di compensazione dei difetti osservati su entrambi i processi.

I parametri con cui questi processi sono stati eseguiti e i materiali utilizzati sono discussi nei seguenti paragrafi.

Finitura in Abrasivo

In generale, per l'abrasione superficiale di parti in materiale polimerico è consigliato l'utilizzo di ossido di alluminio come mezzo abrasivo [20]. Tale composto infatti risulta molto versatile con ogni tipologia di materiale, essendo stabile chimicamente e possedendo un alto valore di durezza. Inoltre risulta facilmente reperibile, aspetto che è risultato necessario considerare in fase di sperimentazione.

Inoltre, essendo stato progettato un apparato appositamente per questa sperimentazione, non sono disponibili grane già tarate per l'utilizzo con tale macchinario, e non era possibile conoscere a priori l'effetto di tali processi. Per questo motivo non sono stati presi in considerazione modelli matematici per prevedere l'effetto dell'abrasione, modelli che comunque generalmente sono empirici. La sperimentazione si è dunque svolta maggiormente per studiare l'effetto di tale processo sui materiali stampati, con l'attesa che ne migliorasse la finitura superficiale riducendo i difetti. A tal fine sono state utilizzate grane di tre dimensioni diverse, elencate di seguito con riferimento al diametro delle particelle:

- Grana 20 (905 micron)
- Grana 220 (66 micron)
- Grana 800 (12 micron)

La scelta delle dimensioni è stata operata nell’ottica di avere la maggiore scelta possibile in termini di dimensioni, scegliendo così una grana grossa (20, Figura 6.5a), una fine-intermedia (220, Figura 6.5b) e una ultra-fine (800, Figura 6.5c). Durante i test preliminari per la taratura del macchinario è stato osservato che la sequenza di lavorazione che restituiva i risultati migliori era progressiva dalla grana più grossolana alla più fine, in tre riprese separate tra loro. Infatti, tale procedimento risulta maggiormente efficace se confrontato con un singolo passaggio di lavorazione utilizzando una qualsiasi miscela delle grane precedentemente elencate e visibili in Figura 6.5.



Figura 6.5: Le grane utilizzate nella sperimentazione, composte tutte di ossido di alluminio da frantumazione. Dimensioni decrescenti da sinistra.

Per determinare la velocità di rotazione ottimale è stato fatto riferimento alla letteratura, trovando che la fisica del problema della messa in rotazione dell’abrasivo è stata ampiamente indagata, formulando una semplice equazione (Equazione 6.1) per la valutazione della velocità di rotazione di un tamburo per cui il flusso di abrasivo crea un regime di ricircolo [22].

$$N = \frac{0,533}{\sqrt{D}} \quad (6.1)$$

Nell’Equazione 6.1, N indica la velocità di rotazione del tamburo in giri per minuto, mentre D indica il diametro della camera del tamburo. Grazie a tale equazione è stato possibile valutare una velocità di riferimento su cui basare i test, che risulta essere uguale a circa 85 giri/min per un diametro interno di 140 mm.

Purtroppo tale velocità risulta, seppur di poco, alta per le grane più fini che, nel caso della grana da 220, tendono a ruotare con il tamburo in alcuni momenti. Nel caso della grana da 800 è stato necessario inserire un mezzo per la movimentazione, poiché tale grana risulta talmente fine da agire come un liquido all’interno del tamburo, scivolando sulle pareti. Per questo motivo l’aggiunta di truciolo di legno è stata necessaria, e grazie alla quale la grana è stata movimentata. Succes-

sivamente, è stato possibile constatare, come per la grana da 220, che la velocità di 85 giri/min era troppo alta. Per questo in definitiva, per i primi test di taratura, e poi per i test sui provini, la velocità utilizzata è stata di 75 giri/min. Durante i test preliminari sono comunque state eseguite delle prove a velocità molto elevate che creavano ricircolo turbolento della grana, principalmente per miscele delle grane utilizzate, ma che purtroppo risultavano in urti continui dei pezzi di prova, che avrebbero sicuramente portato a rottura gli allineatori.

Come ultimo parametro di lavorazione, sempre grazie alla fase di test preliminari, è stata identificata come migliore finestra temporale per le prove il valore di 8 ore per ogni passaggio. Tale è infatti la soglia oltre la quale la lavorazione finisce per rovinare il pezzo definitivamente, osservata sui campioni dai test di flessione, soprattutto per le lavorazioni con grana da 20. Per questo i test di abrasione hanno avuto tutti un tempo di lavorazione di 8 ore per ogni dimensione di grana, per un totale di 24 ore totali per ogni pezzo.

Finitura in Solvente

Nel caso di processo con solvente, la tecnica pur avendo la conformazione di un processo di finitura in tamburo rotante, risulta essere un adattamento di un processo di agitazione delle parti in solvente, solitamente eseguito tramite sonicazione [24]. Tuttavia i processi di sonicazione in solvente risultano molto aggressivi nei confronti del materiale e la permanenza nel solvente potrebbe, soprattutto per spessori molto sottili, danneggiare la parte lavorata.

Il solvente utilizzato è l'isopropanolo con purezza del 100%, che come dimostrano le ricerche agisce sul MED610 migliorandone la trasparenza [24]. Tale effetto è dovuto alla composizione del MED610, per cui l'IPA (Iso-Propyl Alcohol) risulta affine. Molto è stato scritto sulle proprietà meccaniche della resina MED610, mentre la composizione non è stata ancora indagata. Esulando tuttavia dagli scopi principali della ricerca la considerazione di tale composizione, viene riassunta per semplicità in Tabella 6.2, in cui vengono indicati i componenti principali con le relative concentrazioni.

Composto	Concentrazione (%)
Esa-1,7,7-Trimetilbicciclo [2.2.1]Ept-2-ile Acrilato	21.728%
Triciclodecano DiMetanolo Diacrilato	9.297%
Bisfenolo A Epossiacrilato Oligomero	7.986%

Tabella 6.2: Componenti principali della resina MED610, in accordo con [i dati forniti dal produttore](#) e [24].

L'osservazione dei componenti del MED610 mette in luce che si tratta di una resina in prevalenza a base acrilica con presenza di gruppi epossidici nei componenti secondari. Per quanto riguarda invece il MED625FLX, sempre con riferimento ai [dati di sicurezza](#) forniti per il materiale, il componente principale (>84%) risulta essere il 2-[[[(butylamino)carbonyl]oxy]ethyl acrylate, rendendo tale materiale una resina acrilica. In entrambi i casi, dunque, la polarità dei gruppi laterali nella catena del polimero rende tali materiali solubili in soluzioni alcoliche. Tra queste, come già spiegato, l'IPA risulta il più efficace in tale scopo.

L'effetto di tale solvente è il rigonfiamento, o il rammollimento, della porzione superficiale di materiale, e in questo modo la riorganizzazione della superficie del pezzo per effetto della tensione superficiale, che tende ad omogeneizzare la struttura. Inoltre, l'eccesso di resina superficiale viene solubilizzato, e questo porta ad una netta rimozione dei difetti superficiali nell'oggetto.

Per quanto riguarda i parametri di lavorazione per questa tecnica, la velocità di rotazione del tamburo è stata mantenuta a 75 giri/min, nonostante tale velocità non condizioni il ricircolo di solvente con le stesse modalità con cui condiziona il flusso di abrasivo. Infatti aumentando la velocità si produce un'accelerazione della reazione tra solvente e materiale, poiché ad una velocità relativa tra superficie e solvente più alta, corrisponde una cinetica più veloce dovuta all'agitazione delle molecole di solvente che incidono sulle macromolecole del polimero con maggiore energia. Per questo motivo, inoltre, i tempi di lavorazione sono stati ridotti rispetto al test con abrasivo a 5 ore, in modo da non produrre danneggiamento del pezzo dovuto al completo rigonfiamento.

La lavorazione tramite solvente agisce dunque sulla fisica all'interfaccia con il materiale, sanando i difetti a livello micrometrico sulla superficie. Questo processo è sicuramente utile al raggiungimento di un alto grado di trasparenza, poiché, come osservato nel [Capitolo 3](#), le imperfezioni micrometriche producono opacizzazione. In questo senso, però, rimane presente la struttura macroscopica, che produce deviazione della luce distorcendo le immagini trasmesse attraverso tale materiale, e dunque rendendo l'allineatore nel complesso non totalmente invisibile nell'utilizzo. Tale aspetto viene trattato brevemente nella prossima sezione, che ha l'obiettivo di esporre il processo misto abrasivo-solvente, e le ragioni che hanno portato ad ipotizzarlo.

Finitura in Abrasivo e Solvente

L'ultimo dei tre processi testati è un processo ibrido che coniuga i benefici di entrambi i test precedenti. Tale test nasce dall'osservazione dei primi risultati ottenuti nelle prove preliminari (Appendice D) con l'abrasivo, per cui i materiali successivamente alla lavorazione mostravano migliori qualità superficiali e una rugosità ridotta, come viene illustrato nel corso del capitolo nella Sezione 6.2, mantenendo, se non incrementando, però l'opacità complessiva. Tale opacità, è stato notato, spariva quasi completamente durante i lavaggi per la rimozione della grana abrasiva residua, suggerendo che tale finitura nascesse da micro-imperfezioni che l'acqua utilizzata andava a colmare bagnando il pezzo. Da questo, è stato ideato tale tentativo di processo ibrido, poiché l'effetto dell'IPA sui materiali utilizzati era appunto di azione lucidante mirata alle imperfezioni micrometriche.

Inoltre, è plausibile ipotizzare che l'azione di rammollimento dovuta all'interazione tra IPA e i materiali acceleri l'effetto dell'abrasivo, per cui il processo sarebbe risultato maggiormente efficace e appianante della superficie.

La velocità di rotazione, come per gli altri test, è stata mantenuta a 75 giri/min, in modo da poter avere un confronto, seppur minimo in quanto processi di natura diversa, sulle diverse tecniche adottate, mentre il tempo di lavorazione, come per i test con solo solvente è stato di 5 ore. La grana utilizzata per i test ibridi però non è di singola dimensione, ma un mix tra la grana da 20 e quella da 220, dosate in parti uguali in peso, in modo da avere un'azione molto omogenea dell'abrasivo tramite amalgamazione della grana da 220 con il solvente che la manteneva dispersa a formare una pasta unica nella rotazione, e un'azione aggressiva, quasi di sgrossatura, da parte della grana da 20, più grossa e quindi non bene disperdibile nel liquido.

Queste combinazioni nei test nascono tutte dalle possibilità offerte da un apparato creato su misura per queste esigenze, che nella prossima sezione viene presentato dettagliatamente.

6.1.3 Apparato per Finitura a Tamburo

Tramite questa apparecchiatura, di cui è mostrata un'immagine in Figura 6.6, è stato possibile testare, regolando la velocità di rotazione e l'inclinazione del tamburo, un numero consistente di campioni con i diversi metodi sopra esposti. La possibilità di regolazione dei parametri è stata pensata per lasciare maggiore spazio di manovra in fase di calibrazione del processo, per cui la scelta di un motore passo-passo (23HS8430), anziché un motore in corrente continua, è dovuta alla

possibilità di regolazione della velocità dal programma caricato in un Arduino Uno, che opera da scheda di controllo, mentre la struttura principale che comprende le parti attive meccanicamente (albero, tamburo e piastra di supporto) sono state connesse al telaio tramite delle cerniere che ne permettessero l'inclinazione.

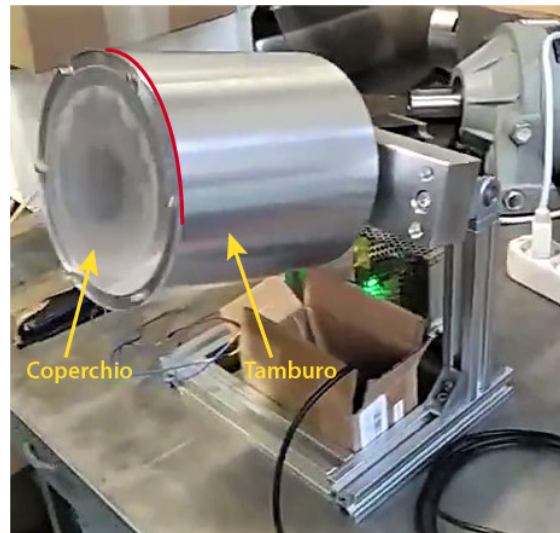
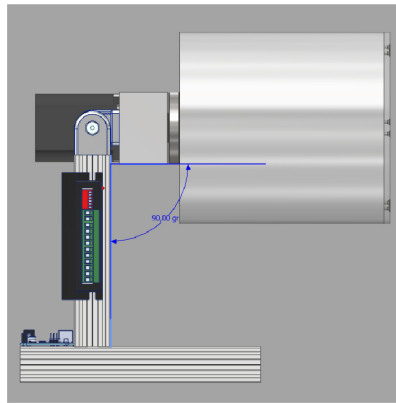


Figura 6.6: Immagine dell'apparato di finitura prodotto per la sperimentazione. Il tamburo viene messo in rotazione da un motore passo-passo, rendendo possibile la gestione delle velocità. In rosso l'intercapedine tra tamburo e coperchio, non essendo a tenuta in presenza di liquidi l'apparato deve essere utilizzato inclinato.

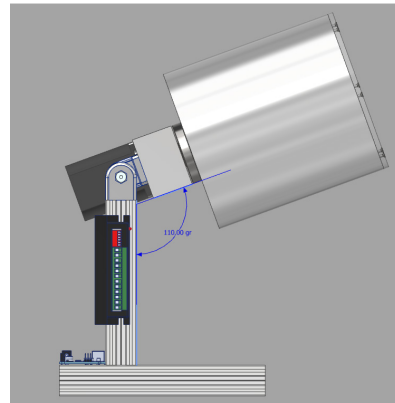
L'inclinazione permette inoltre di inserire dei solventi liquidi nella camera, prodotta cieca per lasciare questa possibilità, senza che essi escano dall'intercapedine tra il coperchio e il tamburo, ma generando comunque un buon grado di ricircolo del fluido nella camera. Se mantenuto orizzontale, infatti, il tamburo necessita di una guarnizione per mantenere il liquido all'interno della camera, che non è stata inserita per semplicità costruttiva.

Le tavole tecniche dei particolari attivi e dell'assieme con la distinta dei componenti sono contenute nell'Appendice A, in cui il telaio non è stato disegnato in una tavola a sé in quanto prodotto in corso d'opera.

Per quanto riguarda i componenti elettronici, invece, la parte fondamentale è stata svolta dalla "scheda di controllo", che per semplicità di programmazione è un Arduino Uno (Figura 6.8), le cui istruzioni erano semplicemente di generare impulsi periodici di input per il driver del motore, che a sua volta genera corrente per la movimentazione del motore. Il circuito completo insieme alle specifiche dei componenti è consultabile in Appendice B, mentre lo sketch caricato su Arduino in Appendice C.



(a) Conformazione orizzontale, perfetta per creare ricircolo di abrasivo a secco.



(b) Nel caso di presenza di solventi all'interno, puri o in concomitanza con abrasivo, è necessario utilizzare l'apparato con il tamburo inclinato data l'assenza di guarnizione.

Figura 6.7: Conformazioni diverse di orientamento dell'apparato. L'assenza di una guarnizione viene sostituita dalla possibilità di inclinazione. Inoltre le diverse inclinazioni possono produrre ricircoli diversi di abrasivo rendendo l'apparato utile a qualsiasi tipologia di processo di finitura in tamburo.

Il motore passo-passo 23HS8430 possiede una coppia di tenuta statica di $180 \text{ cm}\cdot\text{N}$, con i cavi energizzati, rendendolo un motore comunque per hobbisti, ma con un momento torcente sufficientemente alto da mantenere in rotazione il tamburo, mentre per la sua gestione la scelta è ricaduta sul modello di driver per motori passo-passo bipolarib TB6600, ideale per lavorare a tensioni relativamente basse (9-44 VAC), e perfetto nella gestione degli impulsi da dare al motore che trasforma prendendo in input solamente la cadenza del passo del motore, generata con Arduino a 5 V. Il motore e il driver sono mostrati in Figura 6.9.

L'alimentazione è stata gestita separatamente, in quanto il motore è stato fatto lavorare ad una tensione di 12 V, mentre Arduino utilizza 5 V in input per l'alimentazione. A tal fine, un trasformatore che porta da 220 VAC a 12 VDC la tensione della linea è stato installato per l'alimentazione di driver e motore, mentre un trasformatore con porta USB per dispositivi mobili ha permesso di alimentare Arduino tramite tale porta.

In conclusione, la produzione di un apparato versatile, che permetta di lavorare sia con abrasivi a secco che in presenza di solventi è stata fondamentale nella riduzione dei costi di sperimentazione e nella differenziazione dei test. I risultati della lavorazione degli allineatori stampati sono presentati nella prossima sezione.



Figura 6.8: Scheda di controllo utilizzata per la produzione dell'apparato sperimentale di finitura a tamburo. Modello Arduino Uno REV3 (<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>).

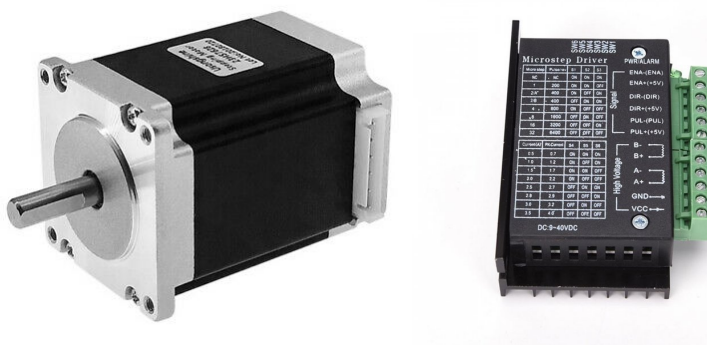


Figura 6.9: Motore 23HS8430 e relativo driver di gestione TB6600.

6.2 Risultati

I test effettuati hanno in generale permesso di ottenere buoni risultati di finitura, nonostante sia bene precisare fin da subito che il grado raggiunto non sia sufficiente a donare totale trasparenza agli allineatori.

La valutazione dei risultati è stata, per semplicità e per questioni di tempistiche, puramente visiva, osservando il miglioramento in termini di rugosità al tatto e trasparenza alla vista. Soprattutto per quanto riguarda la trasparenza, non essendo stato raggiunto un grado tale da rendere accettabili come prodotti finiti gli allineatori testati, non sono state svolte misurazione di spettrofotometria, consigliabili per valutare la qualità finale nel momento in cui il prodotto risulta accettabile da un punto di vista qualitativo.

Tuttavia, il miglioramento delle proprietà ottiche e di superficie, per alcuni dei

provini, è stato netto, permettendo così di identificare univocamente i procedimenti maggiormente efficaci per i diversi materiali. I risultati sono dunque da considerare soddisfacenti in termini di un miglioramento della qualità complessiva dei provini, e confermano la possibilità di utilizzo di alcuni dei processi testati come fase di post-processing per materiali PolyJet.

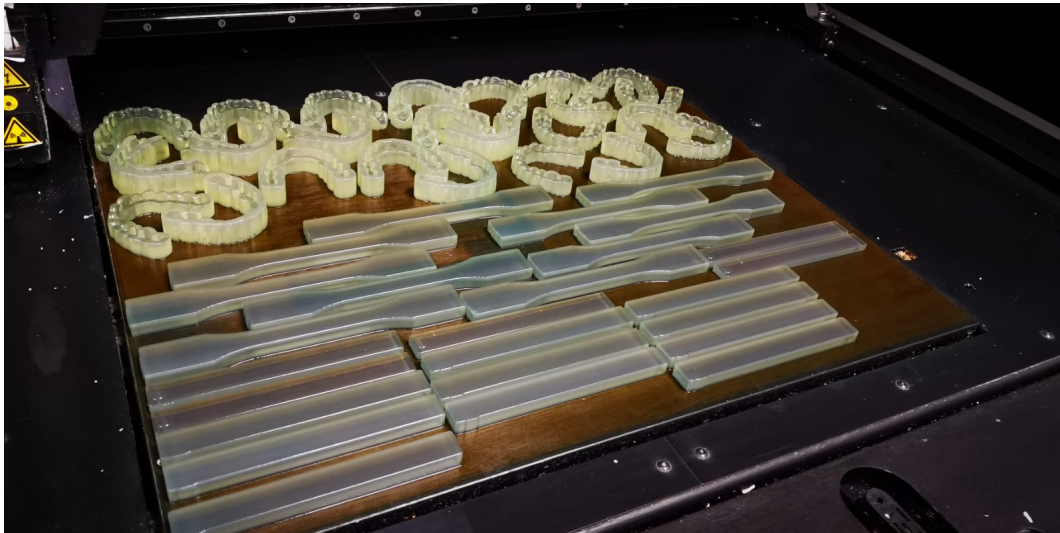


Figura 6.10: Il letto della stampante immediatamente dopo la stampa degli allineatori e dei provini per i test meccanici. Si nota la colorazione gialla degli oggetti stampati, dovuta principalmente al colore del materiale di supporto.

Inizialmente, successivamente alla stampa, i provini mostrano un certo grado di ingiallimento, aspetto ovviamente negativo per un allineatore trasparente in quanto rischia di dare alla dentatura di chi lo indossa una parvenza di giallo. Tale problema deriva dalla presenza di un residuo di supporto di stampa che possiede una colorazione gialla, e dovendo essere rimosso tramite un getto d'acqua manualmente, difficilmente il processo porta alla rimozione completa di tale materiale, soprattutto sulle parti meno esposte della superficie e nei difetti superficiali dovuti alla rugosità di stampa. Il letto di stampa con i campioni stampati e il supporto ancora presente sono raffigurati in Figura 6.10, in cui è ben visibile la colorazione dei provini, non dovuta però ai materiali di cui sono composti, ma alla colorazione del supporto. Si nota inoltre, successivamente alla rimozione dei supporti, un ingiallimento maggiore nei provini con MED625FLX (Figura 6.11) esposta esternamente, probabilmente dovuta alla maggiore affinità di tale resina con il materiale di supporto.



Figura 6.11: Provino 005, composto materiale base da MED610 con rivestimento in MED625FLX. Il provino mostra una leggera colorazione gialla.

Al contrario, per quanto riguarda i campioni in MED610, o che sono stati stampati utilizzando MED610 come rivestimento, l'ingiallimento è minore e il pezzo nel complesso appare maggiormente bianco, come mostrato in Figura 6.12. Tale ipotesi è stata formulata per confronto con i provini stampati con materiale base in MED625FLX, che non mostrano l'ingiallimento manifestato dai provini con MED625FLX interna, dimostrando così che l'ingiallimento non è intrinseco di questa resina, ma effettivamente dovuto ad un residuo dei supporti di stampa.

La colorazione bianca è principalmente originata dalla dispersione della luce, che può essere corretta tramite il miglioramento delle proprietà superficiali, mentre l'ingiallimento in linea di massima è presente anche su una superficie liscia in presenza di supporto residuo. Ai fini di un confronto maggiormente accurato, in Figura 6.13 vengono accostate le foto relative alla seconda dentatura, per tutti i materiali utilizzati.

Avendo come riferimento tali risultati di stampa, è possibile fare delle valutazioni sui processi di finitura. Ad ogni modo la qualità della stampa risulta essere nel complesso buona, e sicuramente tramite un processo ottimizzato è possibile ottenere un alto grado di trasparenza. Il presente lavoro mira principalmente a migliorare le caratteristiche superficiali e nel prossimo paragrafo sono mostrati i risultati ottenuti tramite abrasione a secco.



Figura 6.12: Provino 002, composto da sola MED610 con uno spessore di 0,5 mm, la colorazione risulta con un grado di ingiallimento minore rispetto ai provini con MED625FLX esterna.



Figura 6.13: Confronto tra i diversi materiali di stampa sulla stessa dentatura. I codici dei provini da sinistra verso destra: 004, 007, e 008. Il provino 008, stampato con rivestimento in MED625FLX, mostra un grado maggiore di ingiallimento.

6.2.1 Finitura in Abrasivo

Come precedentemente indicato, l'abrasivo utilizzato è l'allumina (Al_2O_3), di tipologia da frantumazione, per cui con particelle a spigolo vivo, caratteristica che permette una maggiore velocità di abrasione. Tale forma però genera intrinsecamente un problema di opacizzazione della superficie, dovuta principalmente alla formazione di micro-graffi superficiali. Tale ipotesi è stata accennata nella Sezione 6.1.2, in cui è spiegato come sia stato possibile giungere a tale conclusione, che rimane comunque da verificare con test ulteriori di microscopia.

I risultati per questa tipologia di processo sono veramente soddisfacenti in termini di qualità finale della superficie. La rugosità dovuta ai difetti di stampa e alla struttura stratificata è stata quasi totalmente eliminata, seppure una leggera, ma molto regolare ed omogenea, rigatura della superficie è rimasta. In generale comunque l'impressione è di un netto miglioramento della qualità della parte in termini di difetti superficiali, che vengono quasi completamente rimossi.

Il primo materiale testato è stato il MED610, iniziando così dalla valutazione della qualità di lavorazione del materiale puro, ricordando che esso è stato stampato con uno spessore di 0,5 mm, pari alla metà degli allineatori stampati in materiale composito, per cui questi provini risultano meccanicamente meno resistenti. Infatti, i due allineatori, con codici 002 e 004, sono entrambi andati incontro a rottura durante l'esperimento, probabilmente a causa del peso dell'abrasivo nel ricircolo, che flettendoli ha finito per romperli. Le foto dei due provini dopo la lavorazione sono mostrate in Figura 6.14, in cui è possibile osservare la formazione di buchi nello spessore, a testimoniare la fragilità delle parti.

Inoltre non è stato possibile pulire questi provini a sufficienza dall'abrasivo residuo, motivo per cui si mostrano estremamente opachi e biancastri, a causa del deposito di abrasivo sulla superficie che è rimasto dopo la lavorazione. In ogni caso l'azione dell'abrasivo ha portato alla riduzione della rugosità superficiale e alla levigatura dei difetti.

Per quanto riguarda il secondo materiale considerato, il composito con base MED610 e rivestimento in MED625FLX, i risultati ottenuti sono migliori e maggiormente incoraggianti verso questo processo. Purtroppo anche in questo caso il provino relativo alla seconda dentatura, con codice 007 (Figura 6.15b), è andato incontro a rottura, mentre il provino 005 (Figura 6.15a) ha resistito al processo, riportando una finitura superficiale di buona qualità. Quest'ultimo provino ha permesso di osservare, una volta rimosso l'abrasivo residuo sulla superficie dell'allineatore, che la superficie grazie a tale processo riesce a raggiungere un'ottima qualità. Come



Figura 6.14: Allineatori in MED610 pura lavorati con il processo tramite abrasivo. La rottura di tali allineatori indica l'inadeguatezza di uno spessore così sottile per la produzione dei pezzi, oltre che un'estrema fragilità.

è possibile osservare sempre in Figura 6.15a, la rimozione dell'abrasivo, soprattutto dopo il processo con grana da 800, risulta difficoltosa in quanto le polveri tendono ad aderire alla superficie nelle conche formate dai difetti, lasciando delle sgradevoli linee bianche, che tuttavia sono state rimosse sulle terminazioni (zona corrispondente ai molari) con l'ausilio di una spazzola, senza eccessiva difficoltà, ma richiedendo comunque un intervento manuale, sicuramente negativo dal punto di vista di uno "scale-up" industriale.

Nel complesso comunque si può riassumere il risultato della lavorazione di questi allineatori osservando che la finitura superficiale è ottima, ma l'opacità ancora eccessivamente alta, in parte per le polveri che aderiscono alla superficie e un po' anche a causa dei micro-graffi che tale abrasivo forma sulla superficie. Le cavità maggiormente chiuse, che costituiscono le sedi dei denti, sono state lavorate molto meno a causa della difficoltà per l'abrasivo di raggiungere in modo efficace tali parti, e questo rimane il difetto che incide maggiormente sulla qualità della finitura tramite questo processo.

L'ultimo materiale testato è il composito con MED625FLX come base e un rivestimento in resina rigida MED610. In questo caso la presenza di un materiale maggiormente rigido esternamente rende l'effetto dell'abrasivo maggiore, anche se di poco. Questo innalzamento dell'abrasione è plausibilmente dovuto al basso attenuamento dell'impatto delle particelle con la superficie. Tuttavia, l'abrasione a due corpi è un fenomeno molto complesso e per una valutazione accurata delle motivazioni di tale effetto risulta necessaria un'analisi separata e articolata, fuori dagli obiettivi del seguente lavoro.

Il risultato complessivo è visibile per i due allineatori stampati in Figura 6.16a per il provino 006, e in Figura 6.16b per il provino 008.

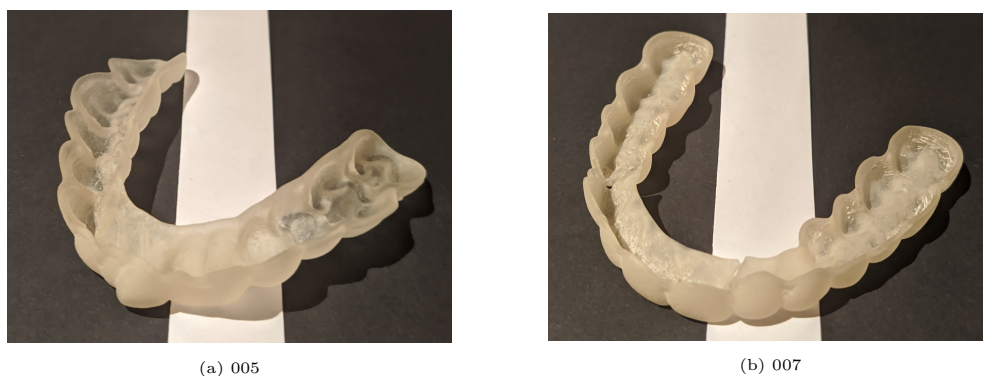


Figura 6.15: Allineatori in MED610 base e rivestimento in MED625FLX lavorati con il processo tramite abrasivo.

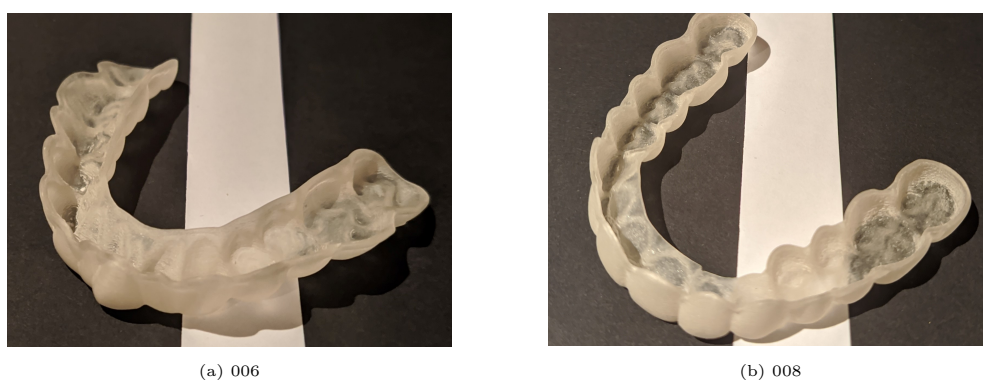


Figura 6.16: Allineatori in MED625FLX base e rivestimento in MED610 lavorati con il processo tramite abrasivo.

Le considerazioni sulla finitura sono le stesse fatte per il materiale composito a base MED610, ma osservando in questo caso un'omogeneità superficiale migliore, e anche un più alto grado di trasparenza, rispetto all'altro materiale. Inoltre, questi provini non sono andati incontro a rottura, dimostrando di essere maggiormente resistenti al processo.

Il processo di finitura tramite abrasivo risulta dunque un ottimo metodo per il miglioramento delle caratteristiche superficiali e per la rimozione dei difetti residui di stampa. La superficie risulta omogenea e pronta per eventuali altre lavorazioni che possano rendere trasparente un prodotto che tramite tale processo di abrasione è stato rifinito in termini di rugosità superficiale, riducendone il valore.

6.2.2 Finitura in Solvente

Come dimostrano ricerche pregresse [24], l'utilizzo di IPA per la finitura di parti stampate con tecnologia PolyJet, in particolare se composte da MED610, è effi-

cace nell'incrementare la trasparenza di tali materiali. L'effetto sugli allineatori stampati è stato di incremento della lucentezza della superficie, come è possibile osservare per il provino 002, composto da MED610, mostrato in Figura 6.17. Il provino è stato processato per 5 ore all'interno del tamburo in IPA, con velocità di rotazione di 75 giri/min.



Figura 6.17: Provino 002 lavorato per 5 ore in IPA a 75 giri/min. Il provino mostra una lucentezza superficiale migliorata, sintomo della riduzione netta della rugosità micrometrica, nonostante la macro-rugosità sia ancora visibile. L'opacizzazione, infatti, permane nonostante il pezzo mostri maggiore brillantezza

I risultati mettono dunque in luce, per i provini in materiale puro MED610, che è presente dell'opacità residua, mentre nel complesso confermano l'ipotesi di riduzione dei difetti micrometrici.

Per quanto riguarda, invece, i provini con materiale base MED610 e rivestimento in MED625FLX (005), la finitura dovuta all'effetto dell'IPA restituisce risultati diversi. Il MED625FLX infatti subisce maggiormente l'effetto del solvente, producendo così una finitura che in parte elimina anche la struttura stratificata, donando un'apparenza molto omogenea alla superficie. I risultati sono visibili in Figura 6.18, in cui l'allineatore, pur non avendo raggiunto la trasparenza, gode di una superficie molto omogenea se comparata con quella di stampa.

L'impressione osservando il provino 005 lavorato, è che sia difficile raggiungere un'ottima lucidità superficiale su un materiale come MED625FLX tramite un processo di finitura, tale da ottenere trasparenza, per cui il risultato da considerare come importante per quanto riguarda questo materiale è sicuramente l'omogeneità della superficie e l'eliminazione dei segni di stampa.



Figura 6.18: Provino 005 prodotto in MED610 materiale base con rivestimento in MED625FLX. Il provino mostra una superficie molto omogenea con parziale eliminazione dei difetti e dei segni di stampa.

Il provino 006, costituito da MED625FLX come materiale base e MED610 a rivestire la parte, ha mostrato risultati simili al provino 002 in materiale puro. Infatti la lucentezza del provino è migliorata come conseguenza del processo in solvente, con eliminazione dei residui e dei difetti di stampa, mentre le linee degli strati di stampa rimangono ancora visibili, aspetto che compromette sicuramente l'estetica del prodotto finito. Il provino testato è mostrato in Figura 6.19.

Come tutti i provini testati, sia con abrasivo che con solvente, l'ingiallimento è diminuito, probabilmente a causa dell'eliminazione dei residui del materiale di supporto.

Per questo processo è stato dimostrato, come prevedibile, che per un materiale rigido quale il MED610 la rugosità macrometrica, dovuta ai segni dei layer di stampa, non può essere eliminata utilizzando solamente IPA nel processo di finitura in tamburo rotante. Nonostante questo, però, il risultato in termini di lucentezza superficiale è da considerarsi soddisfacente come base per future indagini su tali materiali, possibilmente processati precedentemente per rimuovere la struttura dei layer sulla superficie.

Questa considerazione non risulta valida per il MED625FLX, che seppur abbia conseguito un miglioramento leggero della lucentezza superficiale ha tratto il maggior beneficio in termini di omogeneità superficiale.

In generale il processo non si è dimostrato estremamente aggressivo nei confronti dei provini, restituendo risultati soddisfacenti senza produrre la rottura di questi



Figura 6.19: Provino 006 costituito da MED625FLX come materiale base e MED610 come rivestimento. I risultati sono simili a quelli conseguiti con il provino 002, per cui la lucentezza superficiale è incrementata, nonostante la struttura stratificata permanga.

ultimi. È stato deciso tuttavia di non testare tramite questa tecnica la serie di allineatori relativi alla seconda dentatura, e mantenerli invece come campioni di controllo. Questa scelta deriva dalla consapevolezza che seppure il processo con IPA renda maggiormente lucida la superficie delle parti, rimane in generale inaccettabile la permanenza della struttura dei layer, molto accentuata nei provini con MED610 unico costituente o rivestimento, per cui il processo con solo IPA risulta da non considerare allo scopo della finitura.

Finitura con Processo Ibrido

Il processo di finitura ibrido tra i due precedentemente esposti, ha l'obiettivo di coniugare i miglioramenti ottenuti nelle parti tramite i processi di finitura con solvente e abrasivo singolarmente. La conformazione dell'esperimento è fondamentalmente quella del processo con abrasivo, in cui il solvente ha funzione di lavaggio e riduzione dei difetti micrometrici delle parti, a costituire nel complesso una pasta lucidante.

I risultati ottenuti tramite questa tipologia di processo sono nella sostanza simili a quelli ottenuti tramite il processo con abrasivo, con il vantaggio di aver evitato un'opacizzazione totale della parte e soprattutto l'adesione dell'abrasivo all'allineatore. Un confronto tra il campione 008 come stampato, lavorato con abrasivo e processato tramite modalità ibrida è mostrato in Figura [6.20](#).



Figura 6.20: Provino 008 in MED625FLX base e rivestito in MED610, confronto tra il provino come stampato, lavorato con abrasivo e lavorato con abrasivo e solvente (da sinistra verso destra).

Nel confronto in Figura 6.20 è possibile osservare un riassunto dei test che meglio hanno raggiunto un buon grado di omogeneizzazione della superficie degli allineatori. Il processo ibrido mostra un risultato maggiormente lucido e in cui i dettagli sono meglio evidenziati. Purtroppo come è possibile notare, la differenza rimane poca dalla parte stampata in termini di trasparenza, ma comunque, come già precisato più volte, i risultati sono da considerare incoraggianti nel senso di omogeneizzazione della superficie, rimozione dei segni di stampa e preparazione a eventuali processi successivi di lucidatura.

Il processo ibrido effettuato sul provino 002, in MED610 puro e con spessore 0,5 mm, ha mostrato risultati migliori rispetto alla lavorazione con solo abrasivo, in cui l'allineatore aveva subito l'adesione alla superficie della polvere di abrasivo oltre alla rottura durante la lavorazione. Grazie al processo ibrido infatti, l'allineatore viene lavorato dall'abrasivo e contemporaneamente pulito e liscio dall'IPA. Questa considerazione è dimostrata dal risultato mostrato in Figura 6.21, in cui sono mostrati i due allineatori 002 e 004, entrambi successivamente alla lavorazione con processo ibrido.

Nel caso del provino 004 (Figura 6.21b), la presenza di IPA ha indebolito a tal punto il materiale da portarlo a rottura, evento verificatosi comunque anche nel processo con solo abrasivo. In questo caso però la rottura si è verificata lungo le linee dei layer di stampa, motivo per cui risulta logico pensare che tale rottura sia dovuta all'effetto del solvente che determina un indebolimento dei legami tra gli strati. È plausibile dunque assumere che l'effetto maggiore del solvente sulle zone intermedie tra i layer sia dovuto ad una, seppur minima, differenza nel grado di reticolazione tra zone diverse nello spessore del layer, e che quindi nelle zone in cui il grado di polimerizzazione è inferiore il solvente vada a rigonfiare secondo una cinetica più rapida.

Per quanto riguarda, invece, i provini 005 e 007, costituiti di MED610 rivestito in

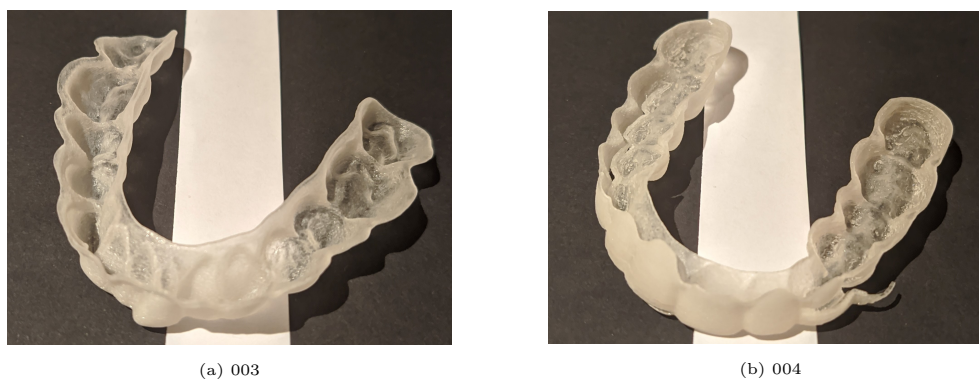


Figura 6.21: Allineatori in MED610 lavorati con il processo ibrido abrasivo/solvente. Tale lavorazione ha prodotto la rottura del provino 004 (b), mentre il provino 002 (a) mostra proprietà migliorate rispetto al provino come stampato e al processo con abrasivo.

MED625FLX, si osserva un comportamento diverso per il test con abrasivo e solvente. Nel caso del provino 007 (Figura 6.22b) il processo ha portato alla rottura del provino nelle zone intermedie tra i layer, provocando poi un distaccamento totale di una porzione di allineatore, dovuta molto probabilmente allo stesso fenomeno descritto per la rottura del provino 004. Inoltre è visibile un danneggiamento dello strato di MED625FLX, problematica riscontrata con questa entità solo in questo provino. Dall'altro lato, il provino 005 ha mostrato invece una finitura eccellente. La superficie risulta omogenea, e anche nelle zone più chiuse la lavorazione è stata efficace, portando ad una qualità ottima del prodotto finito, mostrato in Figura 6.22a.

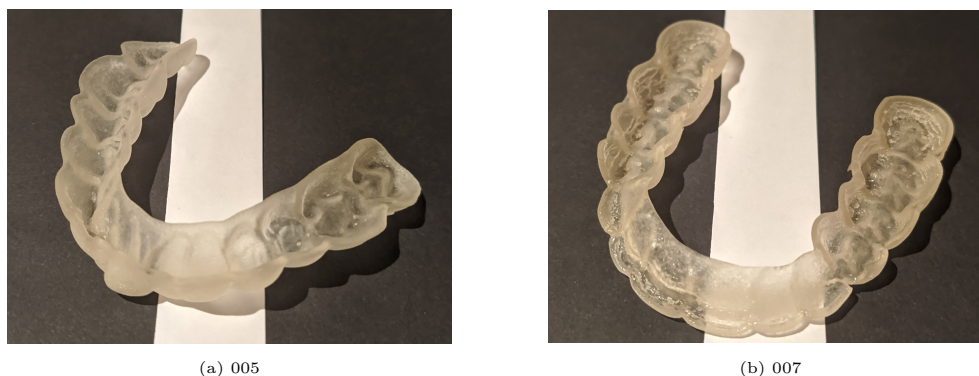


Figura 6.22: Allineatori in MED610 rivestiti con MED625FLX lavorati con il processo ibrido abrasivo/solvente. Per questo materiale i risultati ottenuti sono discordanti. L'allineatore 005 (a) ha raggiunto un grado ottimo di finitura, mentre il provino 007 è andato incontro a rottura sulla linea dei layer.

I risultati discordanti mostrano come la geometria del provino condizioni molto il risultato, soprattutto in termini di rottura, e probabilmente tale differenza è

dovuta alla diversità di ricircolo dei due allineatori nella camera. Al fine di ridurre tale effetto, una possibilità sarebbe quella di aggiungere una guarnizione sotto il coperchio della camera, in modo da lavorare con una rotazione con asse orizzontale e avere così maggiore ricircolo di abrasivo e solvente.

Il secondo materiale composito è stato testato tramite i provini 006 e 008, composti da MED625FLX con rivestimento di MED610. Il risultato è mostrato in Figura 6.23, in cui sono mostrati i due allineatori, la cui finitura risulta molto simile. Entrambi infatti presentano una rugosità complessiva ridotta e una finitura lucida della superficie. I segni di stampa non sono stati tuttavia rimossi completamente nella parte interna dell'allineatore, quella a contatto con il dente.

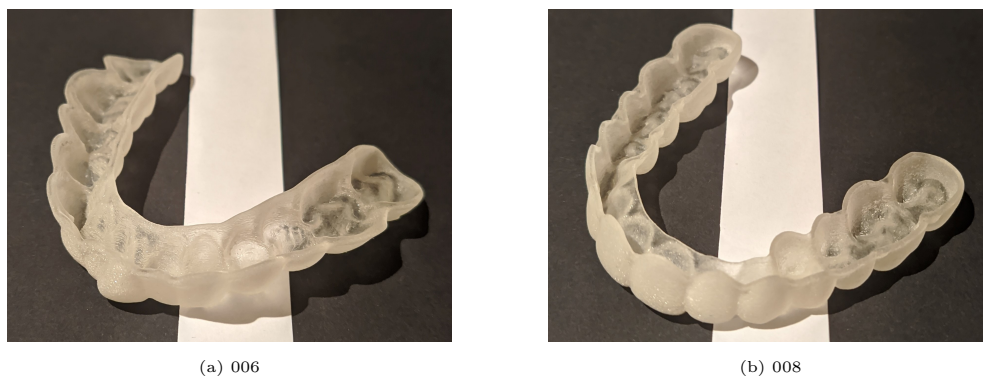


Figura 6.23: Allineatori in MED610 rivestiti con MED625FLX lavorati con il processo ibrido abrasivo/solvente. Per questo materiale i risultati ottenuti sono discordanti. L'allineatore 005 (a) ha raggiunto un grado ottimo di finitura, mentre il provino 007 è andato incontro a rottura sulla linea dei layer.

Dei difetti rimangono quindi presenti per quanto riguarda i provini 006 e 008, per cui non è possibile considerare il processo per questo materiale come ottimo in termini di finitura superficiale, nonostante la lucidità superficiale del prodotto finale sia buona.

In conclusione è stato possibile testare un buon numero di materiali differenti secondo diversi processi. Tale era infatti l'obiettivo di questa parte di lavoro, testare diverse modalità senza focalizzarsi su una in particolare, e verificando quale di queste si presta meglio allo scopo. Una volta identificato il processo che restituisce in una fase preliminare i risultati migliori, sarà possibile per ricerche future focalizzarsi eventualmente su tale processo e verificare quali siano i parametri migliori per ottenere dei buoni risultati.

6.3 Discussione dei Risultati e Conclusioni

Come è possibile osservare dalle foto dei provini lavorati, la trasparenza non è stata raggiunta praticamente per nessun provino. In compenso la qualità superficiale risulta parecchio migliorata per alcuni dei materiali testati, motivo per cui i risultati ottenuti sono da ritenere buoni, almeno in parte.

Un riassunto dei risultati ottenuti è mostrato in Tabella 6.3, grazie a cui è possibile avere una visione d'insieme dei risultati ottenuti, in modo da identificare meglio quelle che sono le vie percorribili per il raggiungimento dell'effettiva trasparenza.

Codice	Materiale Base	Materiale Rivestimento	Spess. Coating (mm)	Abr.	Sol.	A+S
001	MED625FLX	N/A	N/A	●	●	●
002	MED610	N/A	N/A	●	●	●
003	MED625FLX	N/A	N/A	●	●	●
004	MED610	N/A	N/A	●		●
005	MED610	MED625FLX	0,3	●	●	●
006	MED625FLX	MED610	0,3	●	●	●
007	MED610	MED625FLX	0,3	●		●
008	MED625FLX	MED610	0,3	●		●

Tabella 6.3: Riassunto dei risultati dei test. Per semplicità nella tabella vengono indicati i risultati dei test utilizzando dei simboli. La legenda : ● → Rottura provino, ● → Miglioramento lieve/nulla, ● → Miglioramento soddisfacente, ● → Miglioramento superficiale ma alta opacizzazione.

La prima considerazione da fare riguarda i provini stampati in materiale puro. Per quanto concerne gli allineatori in MED625FLX con spessore di 0,5 mm, essi non hanno superato la fase di lavaggio senza incorrere nella rottura, sintomo che tale materiale da solo non è in grado di produrre una parte con consistenza adeguata, nemmeno alla costituzione stessa del pezzo, e ancora meno alla funzione che deve svolgere. Come prevedibile, tale materiale non può essere utilizzato.

I provini in MED610 pura hanno dimostrato invece di poter resistere alla fase di lavaggio e a due dei tre processi, tra cui quello con abrasivo, il più aggressivo meccanicamente e che prevede un lungo tempo di lavorazione (24 ore totali), ha prodotto la rottura del provino. I risultati relativi invece alla lavorazione con solvente hanno prodotto un lieve miglioramento, sia in solvente puro che in presenza di abrasivo, nonostante la finitura non sia ancora soddisfacente e dei piccoli difetti si siano creati.

Resta chiaro che i provini con spessore maggiore, in materiale composito, possiedono una resistenza meccanica superiore, in parte dovuta chiaramente allo spessore più alto. Come mostra la Tabella 6.3 i risultati migliori sono stati conseguiti dai provini 005 e 006. Tale dato fornisce un'informazione inaspettata, in quanto l'ipotesi maggiormente plausibile in questo caso è che la differenza determinante tra questi provini e i provini 007 e 008 sia la geometria, avendo lavorato a parità di materiale. Rimane da considerare che i provini 007 e 008 non sono stati processati con IPA senza abrasivo, ma con i test eseguiti resta evidente che la differenza di qualità complessiva è alta. La spiegazione riguarda con ogni probabilità la complessità della geometria della prima dentatura, che non possiede quasi per niente piani verticali al piano di stampa. Per la seconda dentatura, che rappresenta una dentatura idealmente perfetta nell'allineamento e nell'inclinazione dei denti, le pareti dell'allineatore sono quasi totalmente verticali, e questo ha prodotto una rugosità maggiore.

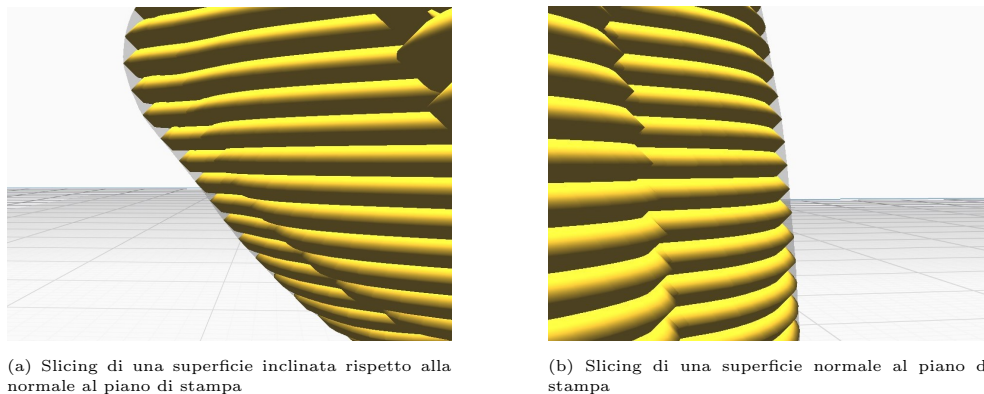


Figura 6.24: Confronto tra i risultati del processo di slicing di una superficie inclinata rispetto alla normale di stampa (prima dentatura) e una perpendicolare (seconda dentatura). Si può notare come nella superficie normale al piano l'effetto di separazione tra i layer è visivamente accentuato (b), mentre nel caso di una superficie inclinata il difetto viene smorzato dall'inclinazione (a).

Le pareti perfettamente verticali, infatti, soffrono di difetti dovuti allo scorrimento della resina liquida fuori dall'area del pezzo tra la fase di deposizione e la fase di reticolazione della resina, producendo successivamente all'indurimento delle "lamelle" orientate orizzontalmente e sporgenti dal pezzo finale, come mostrato schematicamente in Figura 6.24. Questo effetto è stato osservato in modo evidente sui provini per i test a flessione (Figura 6.25), la cui superficie risulta parecchio rigata nel senso parallelo al piatto di stampa.

Negli allineatori con la forma della seconda dentatura, quella perfettamente allineata, la finitura è molto simile, come mostrato nel dettaglio in Figura 6.26, e tale

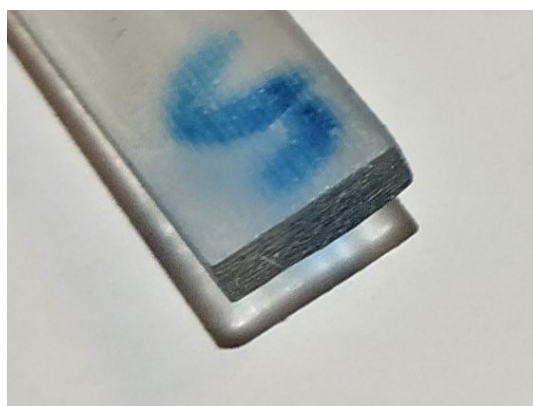


Figura 6.25: Dettaglio della superficie verticale al piatto di stampa del provino 009 per i test a flessione.



Figura 6.26: Dettaglio della superficie verticale al piatto di stampa del provino 008. La rugosità è evidente sulla porzione labiale dell'allineatore, verticale al piatto di stampa, mentre rimane poco accentuata nella porzione linguale che è invece leggermente inclinata.

difetto accentua l'effetto dei processi adoperati, soprattutto nel caso di utilizzo di IPA, nelle zone intermedie a layer adiacenti per cui, come specificato in precedenza, si ha ragione di credere abbiano un grado di reticolazione inferiore rispetto alla superficie direttamente esposta del layer appena depositato, per effetto della diminuzione dell'intensità di radiazione attraverso la resina [12].

Queste ipotesi, già forti delle osservazioni effettuate sui pezzi in Figura 6.25 e in Figura 6.26, sono state verificate stampando dei provini a "elica" che simulano la stampa delle diverse inclinazioni rispetto al piano di stampa. Non vengono mostrati tutti i provini stampati in quanto il risultato è stato lo stesso per tutti i materiali utilizzati nel presente lavoro, e a titolo esemplificativo, in Figura 6.27, viene mostrato il provino in MED610, che mostra chiaramente che nel caso di una superficie curva nelle tre dimensioni l'effetto di stratificazione della superficie viene



Figura 6.27: La rugosità nei provini che mostrano una superficie complessa e con curvatura nelle tre dimensioni possiedono una rugosità di stampa molto ridotta. I provini elicoidali sono stati stampati con l'asse dell'elica orizzontale, e mostrano una superficie che ruota dai 90° a 0° rispetto al piatto di stampa.

eliminato anche nelle parti quasi perpendicolari al piano di stampa, pur rimanendo dei segni degli strati, che non compromettono però eccessivamente la rugosità complessiva. Tale osservazione suggerisce che la stampa potrebbe migliorare in qualità stampando gli allineatori leggermente inclinati rispetto al piano, in modo da creare con maggiore probabilità dei piani inclinati negli allineatori, anche se essi dovessero essere del tipo della seconda dentatura, come nel caso della parte finale di trattamento, in cui i denti idealmente dovrebbero essere quasi perfettamente allineati.

Tutte le ultime considerazioni rimangono valide per ogni geometria al fine di incrementare la qualità del prodotto finito. La prima dentatura, infatti, oltre a mostrare una buona finitura di stampa, ha risposto meglio ai test di finitura, mostrando una superficie migliorata e per la maggioranza senza segni di stampa, per quanto riguarda le stampe in materiale composito.

I provini 005 e 006 sono infatti i migliori tra quelli testati, in termini di proprietà meccaniche e risultati di finitura. I risultati che hanno prodotto tramite i test con abrasivo e con abrasivo e solvente, portano a scartare il processo con solo solvente che risulta lucidante ma senza rimuovere i segni di stampa. Tali test sono da considerare, in quanto a qualità finale della parte, come possibile punto di partenza per future ricerche in merito. La particolarità di tali provini, infatti, è stata notata maggiormente in fase di lavaggio con acqua successivamente ai processi di finitura, per cui diventavano totalmente trasparenti quando immersi. Questo effetto ha portato immediatamente a valutare l'ipotesi di micro-imperfezioni sulla superficie che vanno ad opacizzare il pezzo nel complesso e che in acqua vanno a riempirsi, e successivamente alla formulazione di una possibilità di processo, successivo alla

finitura, di rivestimento con MED610 tramite immersione e successivo "curing" della resina residua superficialmente.

Quest'ultimo processo risulta essere a priori il maggiormente promettente per l'ottenimento di una trasparenza superiore. Per quanto riguarda i processi di finitura da operare in precedenza a tale rivestimento, il maggiormente consigliato, osservando i risultati, sembrerebbe essere il processo ibrido con abrasivo e solvente in concomitanza, che produce una minore opacizzazione e contemporaneamente elimina in parte i segni di stampa.

Concludendo, i materiali migliori testati per la finitura sono quelli costituenti i provini 005 e 006, compositi laminati di MED610 e MED625FLX, con spessore di 1 mm complessivo. In particolare il provino 005, composto di MED610 come materiale base e spessore di 0,4 mm rivestito di MED625FLX per uno spessore omogeneo di 0,3 mm, risulta ottimo sia in resistenza alla rottura in flessione, sia in termini di finitura superficiale, soprattutto per quanto riguarda il pezzo ottenuto tramite il test con processo ibrido.

Considerati tali risultati, si afferma come migliore abbinamento materiale-processo il MED610 rivestito in MED625FLX trattato tramite processo ibrido con abrasivo (Al_2O_3 , grana frantumata, miscela in parti uguali in peso di grana da 20 e 220) e solvente (IPA 100%, dosato a livello con l'abrasivo).

Capitolo 7

Conclusioni e Sviluppi Futuri

Il presente lavoro ha mostrato il grado di fattibilità della produzione di allineatori dentali stampati tramite tecniche di fabbricazione additiva. Lo scopo è di indagare le caratteristiche meccaniche di materiali compositi stampati tramite la funzione apposita delle stampanti 3D Stratasys Objet di stampa con rivestimento delle parti, al fine di produrre allineatori con un sufficiente grado di trasparenza e flessibilità, caratteristiche che potrebbero portare ad una competizione con gli attuali processi di produzione di allineatori termoformati.

Il punto di partenza è stato l'utilizzo di una tecnologia molto accurata, ma soprattutto in molti casi già disponibile presso i produttori di allineatori, considerato l'utilizzo per la stampa dei modelli per i processi di termoformatura. Lo smaltimento dei materiali di scarto e il costo di tali materiali rendono questo processo dispendioso e complesso, necessitando di una moltitudine di passaggi che richiedono lunghe tempistiche. Tuttavia, tali prodotti possiedono una qualità di gran lunga superiore rispetto agli allineatori ad oggi producibili tramite prototipazione rapida, specialmente in termini di elasticità e trasparenza.

Da tale necessità, questa ricerca si è posta l'obiettivo di indagare le possibilità che le odierne tecnologie offrono per l'ottenimento di allineatori stampati in 3D che soddisfino le richieste di progettazione, congiunte ai vantaggi offerti dalla prototipazione rapida, identificabili nella maggiore accuratezza, nelle tempistiche ridotte e nella riduzione degli scarti di produzione.

La soluzione alla fragilità tipica dei materiali stampati tramite le varie tecniche di prototipazione rapida è stata ricercata nella produzione di materiali compositi laminati, unendo un materiale rigido, il MED610, e uno molto elastico, il MED625FLX, entrambi trasparenti nello stato di materiali puri reticolati. L'effetto di tale tecnica di stampa sulla meccanica dei materiali utilizzati è stata indagata

nella prima parte del presente lavoro, tramite la stampa e la caratterizzazione di provini per test di trazione e flessione. Le curve di sforzo e deformazione riassuntive sono mostrate in Figura 7.1.

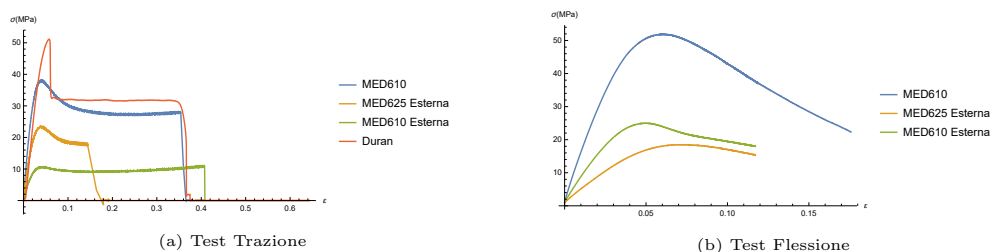


Figura 7.1: Curve σ - ϵ risultanti dai test meccanici effettuati sui materiali prodotti, confrontati con le proprietà del Duran®.

Questi risultati hanno, in un primo momento, messo in luce il comportamento a flessione del composito con MED625FLX esterna, verificando così l'ipotesi iniziale che vedeva un materiale esterno maggiormente elastico riparare il materiale più fragile dalla nucleazione di cricche superficiali.

Successivamente l'analisi delle curve ha permesso di valutare l'applicabilità di un semplice modello teorico per la previsione delle proprietà meccaniche a trazione di materiali compositi, il modello delle miscele. I risultati dell'elaborazione dei dati mostrano che il materiale con MED610 base e MED625FLX come rivestimento risponde perfettamente a tale modello, con uno scarto di appena 0,395 % sul valore del modulo elastico, mentre nel caso di MED610 esterna lo scarto è risultato del -22,962 %, segno che il MED610 molto probabilmente possiede alta sensibilità ai difetti di stampa, caratteristica attendibile trattandosi di un materiale fragile. Questa ipotesi è confermata dal valore di modulo elastico calcolato dai test sul MED610 che risulta inferiore rispetto a quello pubblicato sulla scheda del materiale fornita dal produttore.

Dai risultati sul materiale con MED625FLX esterno, azzerando l'errore, è stato possibile valutare a ritroso e con precisione il modulo elastico del MED625FLX, ipotizzato pari a 2 MPa inizialmente, pari al valore della gomma naturale considerata la consistenza simile di tale materiale al MED625FLX. Il valore calcolato è stato dunque di 14,59 MPa, molto vicino al valore ipotizzato.

Nonostante la mancata corrispondenza tra i valori di modulo teorico e sperimentale, per il MED625FLX rivestito con MED610 è stato possibile valutare un fattore di correzione moltiplicativo per il modulo elastico del MED610, in modo da rendere applicabile la regola delle miscele anche a tale materiale. Un riassunto dei modelli per i due materiali è mostrato con l'Equazione 7.1 per il materiale con MED610

esterna e con l'Equazione 7.2 per quello con MED625FLX a fare da rivestimento, in cui x rappresenta la frazione in sezione del materiale indicato a pedice, E il modulo elastico, e MED610 è indicato con R (Rigido) mentre MED625FLX con E (Elastico).

$$E_{tot} = x_R E_R + x_E E_E \quad (7.1)$$

$$E_{tot} = 0,7778 x_R E_R + x_E E_E \quad (7.2)$$

Tramite i modelli sopra esposti, è dunque possibile valutare in anticipo le proprietà meccaniche di tali materiali. In questo senso, ulteriori ricerche dovrebbero essere svolte, in un'ottica di valutazione precisa dei coefficienti da utilizzare per questi modelli, e di eventuale conferma dei valori ottenuti tramite questa sperimentazione. A tal fine si renderebbero utili dei test di trazione con spessori diversi del rivestimento mantenendo la geometria qui utilizzata, in modo da raccogliere dati su come il comportamento dei materiali venga modificato per diverse percentuali delle due resine in sezione. Ulteriormente si potrebbe indagare se tale comportamento sia identico per spessori complessivi più sottili.

Dati sul comportamento dinamico-meccanico dei materiali non sono stati raccolti, sebbene il primo test a trazione su MED610 puro, eseguito ad una velocità inferiore rispetto agli altri, mostri una curva sforzo-deformazione con valori di sforzo nettamente inferiori rispetto a quelli delle altre curve misurate, segno che il comportamento varia sostanzialmente variando la velocità di deformazione nonostante esso sia un materiale molto rigido, e dunque con tempi caratteristici dei moti molecolari attesi molto alti. Tale curva indica dunque la necessità di ulteriori studi sulle caratteristiche dinamico-meccaniche del materiale in questione, e con esso dei materiali compositi stampati in questa ricerca.

Nella seconda parte della ricerca, sono stati valutati invece gli effetti di tre processi di finitura su allineatori stampati in MED610 e MED625FLX, seguendo il medesimo principio della stampa dei provini per le prove meccaniche, valutandone il grado di miglioramento della superficie visivamente. In questo senso sicuramente si rende necessaria nel futuro una valutazione quantitativa degli effetti, che esula dagli scopi del presente lavoro, concentrato maggiormente sull'identificazione dei materiali e dei processi particolarmente indicati.

Senza ombra di dubbio gli allineatori che hanno restituito i risultati migliori sono i provini 005 e 006, per cui i difetti di stampa e i segni della struttura stratificata

sono stati quasi del tutto rimossi, soprattutto tramite la lavorazione in finitura a tamburo rotante operata con ossido di alluminio come abrasivo e IPA come solvente. Tale infatti è il processo maggiormente indicato, con l'accortezza di stampare gli allineatori con la quantità minore possibile di superficie perpendicolare al piano di stampa, necessità verificata dalla differenza di comportamento tra le due dentature utilizzate per generare gli allineatori. A tal proposito, la scrittura di un programma apposito per il calcolo dell'orientamento automatico di stampa, tramite ricalcolo delle coordinate degli elementi componenti il file STL, al fine di ridurre al minimo la superficie perpendicolare al piano di stampa è una possibilità da considerare in un'ottica di riduzione dei tempi di impostazione delle stampe. La trasparenza totale non è stata raggiunta tramite i processi testati, nonostante l'omogeneità della superficie dei provini 005 e 006 abbia raggiunto un buon grado. Osservando i provini dopo il processo (Figura 7.2) è possibile verificare l'opacità residua sulla superficie. Durante la fase di lavaggio è stato notato che se bagnati i provini mostrano un grado di trasparenza molto alto grazie all'acqua che colma i micro-graffi sulla superficie, e per questo un trattamento di rivestimento successivamente al processo di finitura è da tenere in considerazione, in quanto opererebbe seguendo lo stesso meccanismo di correzione dei difetti superficiali, soprattutto nel caso di rivestimento per immersione e curing di uno strato di MED610.

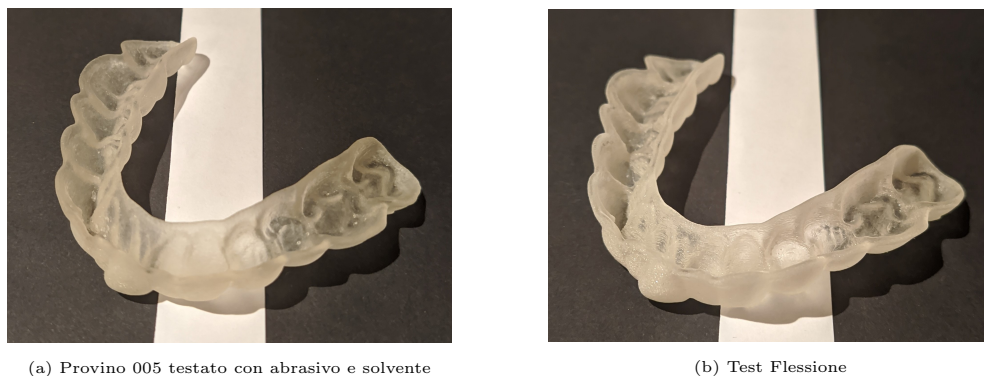


Figura 7.2: Provino 006 testato con abrasivo e solvente

Un processo di rivestimento andrebbe quindi a rendere la superficie maggiormente liscia eliminando ogni difetto residuo e rendendo l'allineatore totalmente trasparente. In questo senso, il materiale maggiormente indicato tra quelli testati è il MED610 rivestito in MED625FLX, che produce ottimi risultati di finitura e quando bagnato risulta maggiormente trasparente.

Riassumendo i risultati ottenuti nel complesso della ricerca, la stampa di materiali compositi laminati di MED610 e MED625FLX tramite funzione di rivestimento

nel software Objet Studio per stampanti 3D Stratasys Objet Dental Selection si dimostra una possibilità concreta di raggiungimento della produzione di allineatori trasparenti stampati tramite tecniche di fabbricazione additiva. L'indagine della meccanica dei materiali compositi mostra che i risultati migliori sono stati raggiunti dal composito prodotto in MED610 rivestito con MED625FLX, meno suscettibile alla rottura in flessione e con una consistenza meccanica sufficiente al trattamento di allineamento. I test di finitura, a loro volta, dimostrano che il medesimo materiale risulta ottenere il miglior grado di qualità superficiale dopo un processo di finitura in tamburo rotante con ossido di alluminio e IPA, mostrando inoltre un grado di trasparenza superiore agli altri provini quando bagnato, e essendo dunque maggiormente indicato per operare un rivestimento in resina biocompatibile per aumentarne la trasparenza.

In definitiva, ricerche future su tale materiale lavorato con il processo di finitura operato in questo lavoro, potrebbero portare alla produzione di allineatori trasparenti stampati tramite tecniche di fabbricazione additiva in serie.

Bibliografia

- [1] Craig A Andreiko e Ian Kitching. *Direct Manufacture of Orthodontic Aligner Appliance*. US Patent App. 13/650,886. Apr. 2013.
- [2] Alberto Boschetto e Luana Bottini. “Roughness prediction in coupled operations of fused deposition modeling and barrel finishing”. In: *Journal of Materials Processing Technology* 219 (2015), pp. 181–192.
- [3] William A Brantley. “Orthodontic wires”. In: *Orthodontic materials: scientific and clinical aspects*. Stuttgart: Thieme 95 (2001).
- [4] Gabriel Bugeida et al. “Numerical analysis of stereolithography processes using the finite element method”. In: *Rapid Prototyping Journal* (1995).
- [5] Han Chen e Yaoyao Fiona Zhao. “Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process”. In: *Rapid Prototyping Journal* (2016).
- [6] Antonio Coppola et al. “Set-Up of an Experimental Procedure for the Surface Smoothing of FDM Parts Through Acetone Vapor”. In: *Key Engineering Materials*. Vol. 813. Trans Tech Publ. 2019, pp. 447–452.
- [7] Andrew Dawood et al. “3D printing in dentistry”. In: *British dental journal* 219.11 (2015), pp. 521–529.
- [8] P. Fauchard. “The Surgeon Dentist, Treatise on the Teeth”. In: (1946).
- [9] Ian Gibson, David W. Rosen e Brent Stucker. *Additive manufacturing technologies*. Vol. 17. Springer, 2014.
- [10] Wolfram Hahn et al. “Influence of thermoplastic appliance thickness on the magnitude of force delivered to a maxillary central incisor during tipping”. In: *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 136.1 (2009), 12–e1.

- [11] Joe Hennessy e Ebrahim A Al-Awadhi. “Clear aligners generations and orthodontic tooth movement”. In: *Journal of orthodontics* 43.1 (2016), pp. 68–76.
- [12] Paul Francis Jacobs. *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- [13] VK Jain et al. “Investigations into abrasive flow finishing of complex workpieces using FEM”. In: *Wear* 267.1-4 (2009), pp. 71–80.
- [14] Rodrigue Desmorat Jean Lemaitre. *Engineering damage mechanics: ductile, creep, fatigue and brittle failures*. 1^a ed. Springer, 2005. ISBN: 3540215034,9783540215035,9783540215036.
- [15] Prashant Jindal et al. “Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners”. In: *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 156.5 (2019), pp. 694–701.
- [16] Ama Johal et al. “The reliability of thermoform retainers: a laboratory-based comparative study”. In: *European Journal of Orthodontics* 37.5 (nov. 2014), pp. 503–507. ISSN: 0141-5387. DOI: [10.1093/ejo/cju075](https://doi.org/10.1093/ejo/cju075). eprint: <https://academic.oup.com/ejo/article-pdf/37/5/503/8068689/cju075.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/ejo/cju075>.
- [17] NN Kumbhar e AV Mulay. “Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review”. In: *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* 99.4 (2018), pp. 481–487.
- [18] Jae-Sung Kwon et al. “Force delivery properties of thermoplastic orthodontic materials”. In: *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 133.2 (2008), pp. 228–234. ISSN: 0889-5406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.03.034>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889540607008682>.
- [19] Alexei A Maradudin. *Light scattering and nanoscale surface roughness*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [20] Ioan D. Marinescu, Eckart Uhlmann e Toshiro Doi. *Handbook of lapping and polishing*. CrC Press, 2006.
- [21] G Marom et al. “Hybrid effects in composites: conditions for positive or negative effects versus rule-of-mixtures behaviour”. In: *Journal of Materials Science* 13.7 (1978), pp. 1419–1426.

- [22] M Matsunaga. “Theory and experiments on centrifugal barrel finishing”. In: *The International Journal of Production Research* 5.4 (1967), pp. 275–287.
- [23] MA Moore. “A review of two-body abrasive wear”. In: *Wear* 27.1 (1974), pp. 1–17.
- [24] Catherine GY Ngan et al. “Optimising the biocompatibility of 3D printed photopolymer constructs in vitro and in vivo”. In: *Biomedical Materials* 14.3 (2019), p. 035007.
- [25] Yayue Pan et al. “Smooth surface fabrication in mask projection based stereolithography”. In: *Journal of Manufacturing Processes* 14.4 (2012), pp. 460–470.
- [26] In Baek Park, Young Myoung Ha e Seok Hee Lee. “Dithering method for improving the surface quality of a microstructure in projection microstereolithography”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 52.5-8 (2011), pp. 545–553.
- [27] William R Proffit, Henry W Fields Jr e David M Sarver. *Contemporary Orthodontics, 5e*. Elsevier India, 2012.
- [28] Arivazhagan Pugalendhi, Rajesh Ranganathan e Manivannan Chandrasekaran. “Novel fabrication method for clear and hard tooth aligner through additive manufacturing technology: A pilot study”. In: *Materials Today: Proceedings* (2020).
- [29] M Schmid, C Simon e GN Levy. “Finishing of SLS-parts for rapid manufacturing (RM)—a comprehensive approach”. In: *Proceedings SFF* (2009), pp. 1–10.
- [30] Prasanna-kumar Shivapuja et al. *Direct 3D-printed orthodontic aligners with torque, rotation, and full control anchors*. US Patent 10,179,035. Gen. 2019.
- [31] Sandra Tai. “Clear aligner technique”. In: *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 154 (2018), p. 886.
- [32] Francesco Tamburrino et al. “Mechanical Properties of Thermoplastic Polymers for Aligner Manufacturing: In Vitro Study”. In: *Dentistry Journal* 8.2 (2020), p. 47.
- [33] John R Tumbleston et al. “Continuous liquid interface production of 3D objects”. In: *Science* 347.6228 (2015), pp. 1349–1352.

- [34] Pawan Tyagi et al. “Reducing surface roughness by chemical polishing of additively manufactured 3D printed 316 stainless steel components”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 100.9-12 (2019), pp. 2895–2900.
- [35] Norman Wahl. “Orthodontics in 3 millennia. Chapter 1: Antiquity to the mid-19th century”. In: *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 127.2 (feb. 2005). ID: 272361, pp. 255–259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2004.11.013>.
- [36] Bernhard Wolf Weinberger. “Historical résumé of the evolution and growth of orthodontia”. In: *The Journal of the American Dental Association (1922)* 21.11 (1934), pp. 2001–2021.
- [37] RE Williams. “Acoustic emission characteristics of abrasive flow machining”. In: (1998).
- [38] Robert E Williams e Vicki L Melton. “Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes”. In: *Rapid Prototyping Journal* (1998).

Appendice A

Tavole Tecniche Dell'Apparato di Finitura in Tamburo

In questa sezione vengono riportate le tavole tecniche utilizzate per la produzione dell'apparato sperimentale per la finitura in tamburo. Il progetto e i disegni tecnici sono stati realizzati utilizzando il software di modellazione CAD Autodesk Inventor Professional 2020 concesso con licenza studenti per il Politecnico di Milano.

Un rendering dell'apparato è mostrato in Figura [A.1](#).

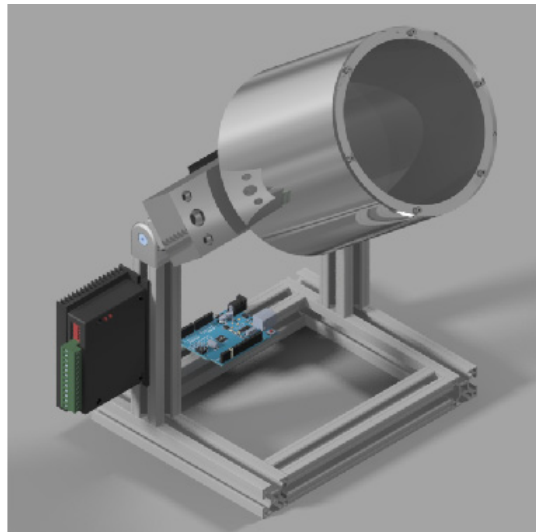
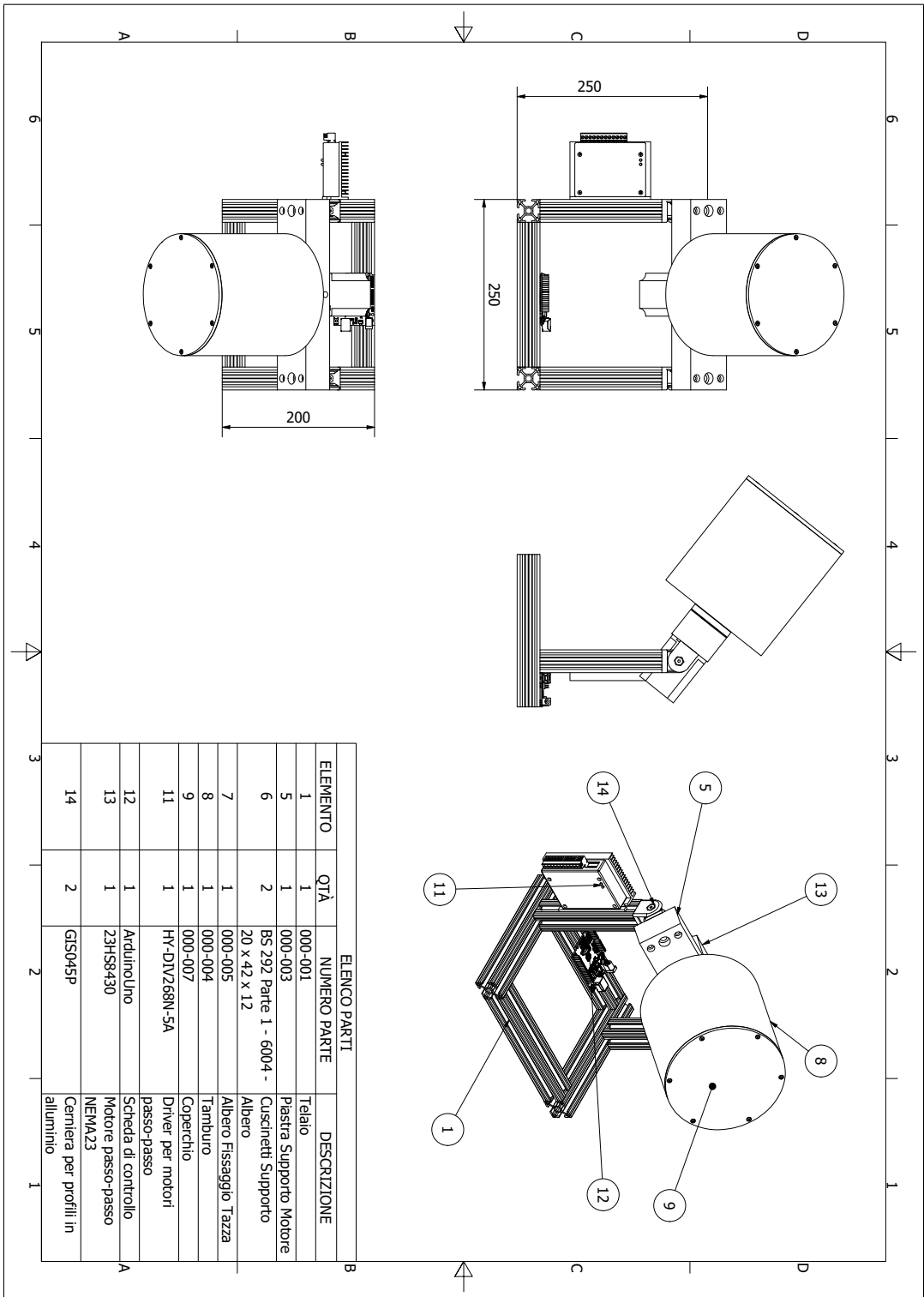
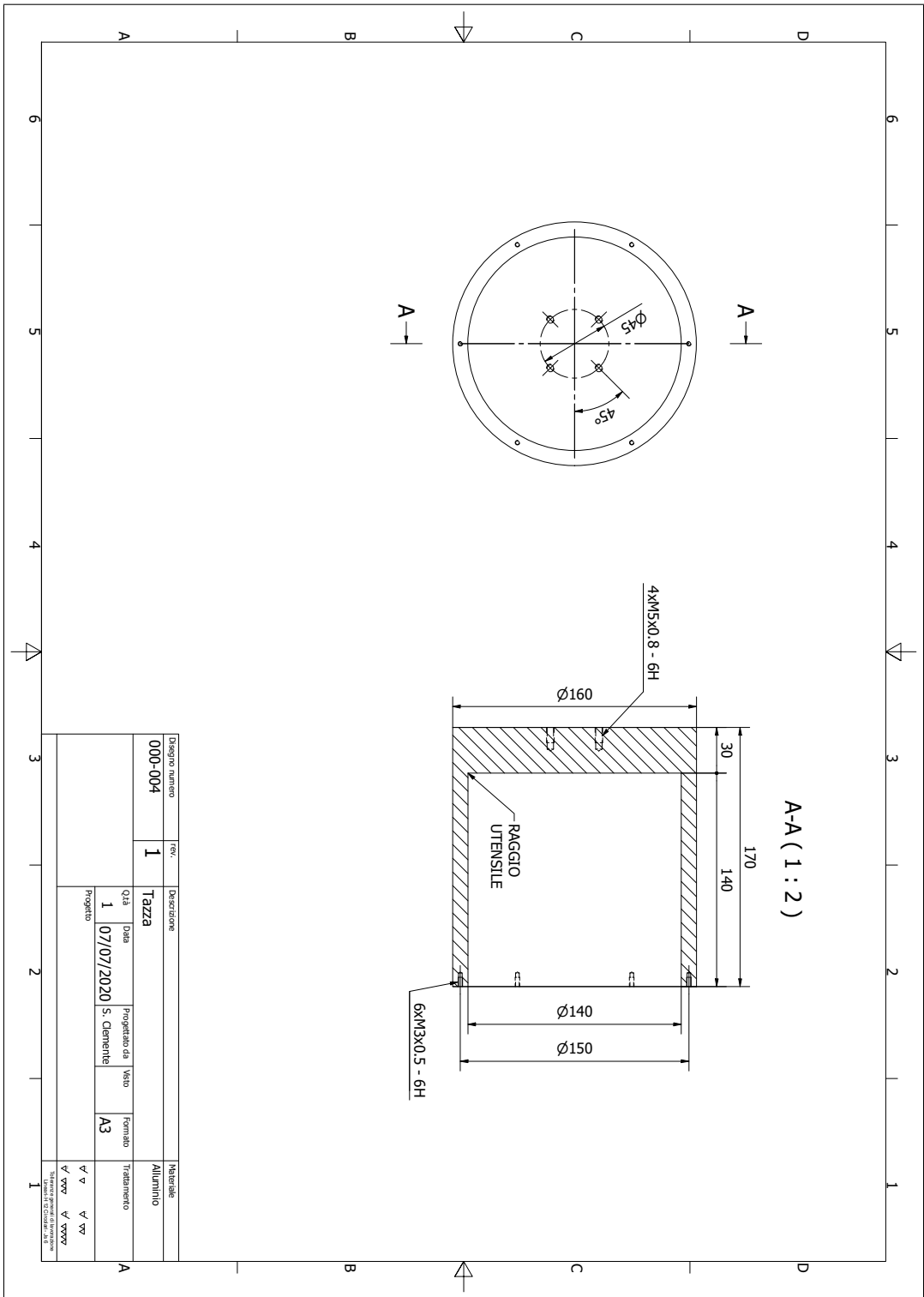


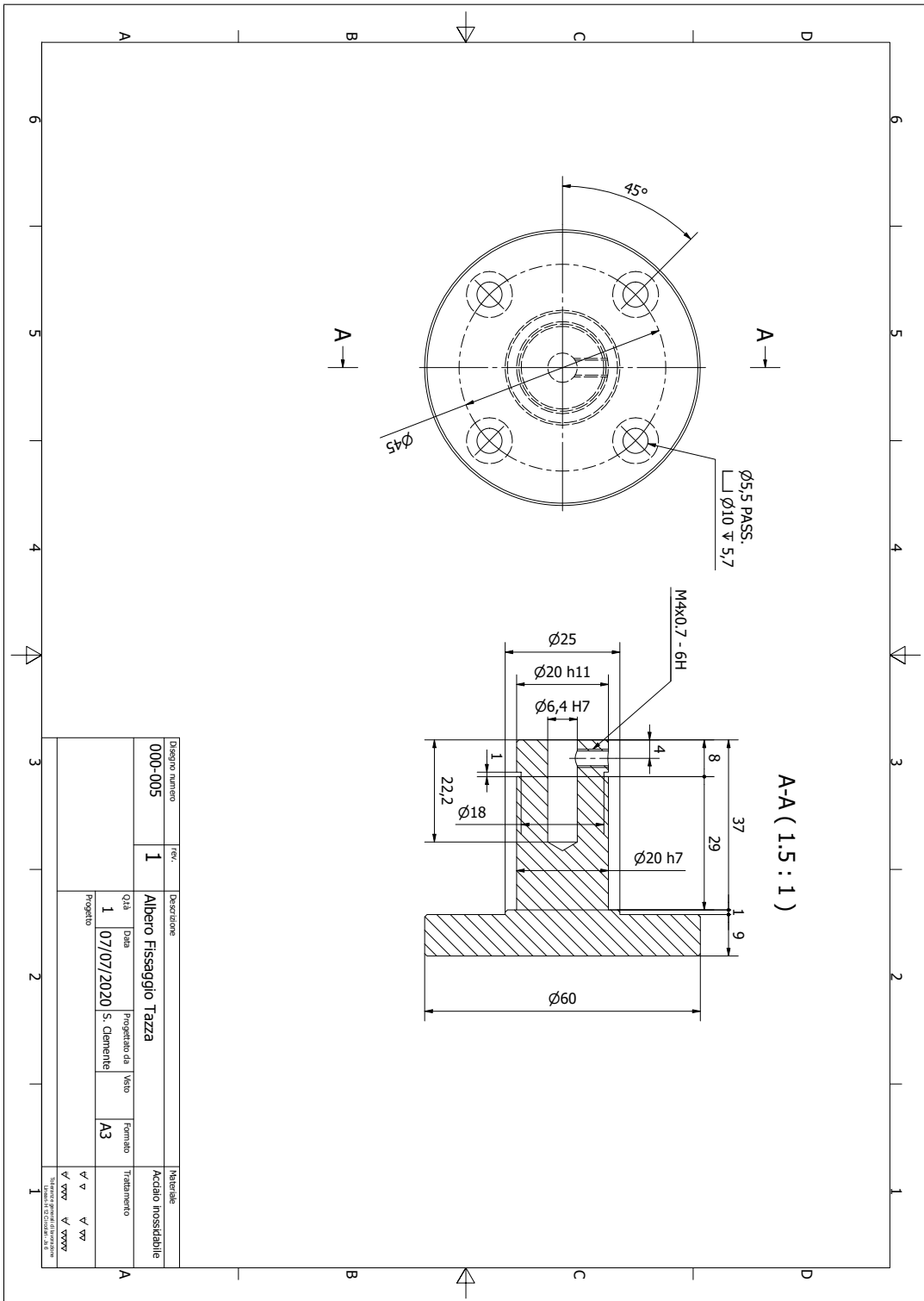
Figura A.1: Rendering dell'apparato di finitura a tamburo prodotto ed utilizzato per eseguire i test per il presente lavoro.



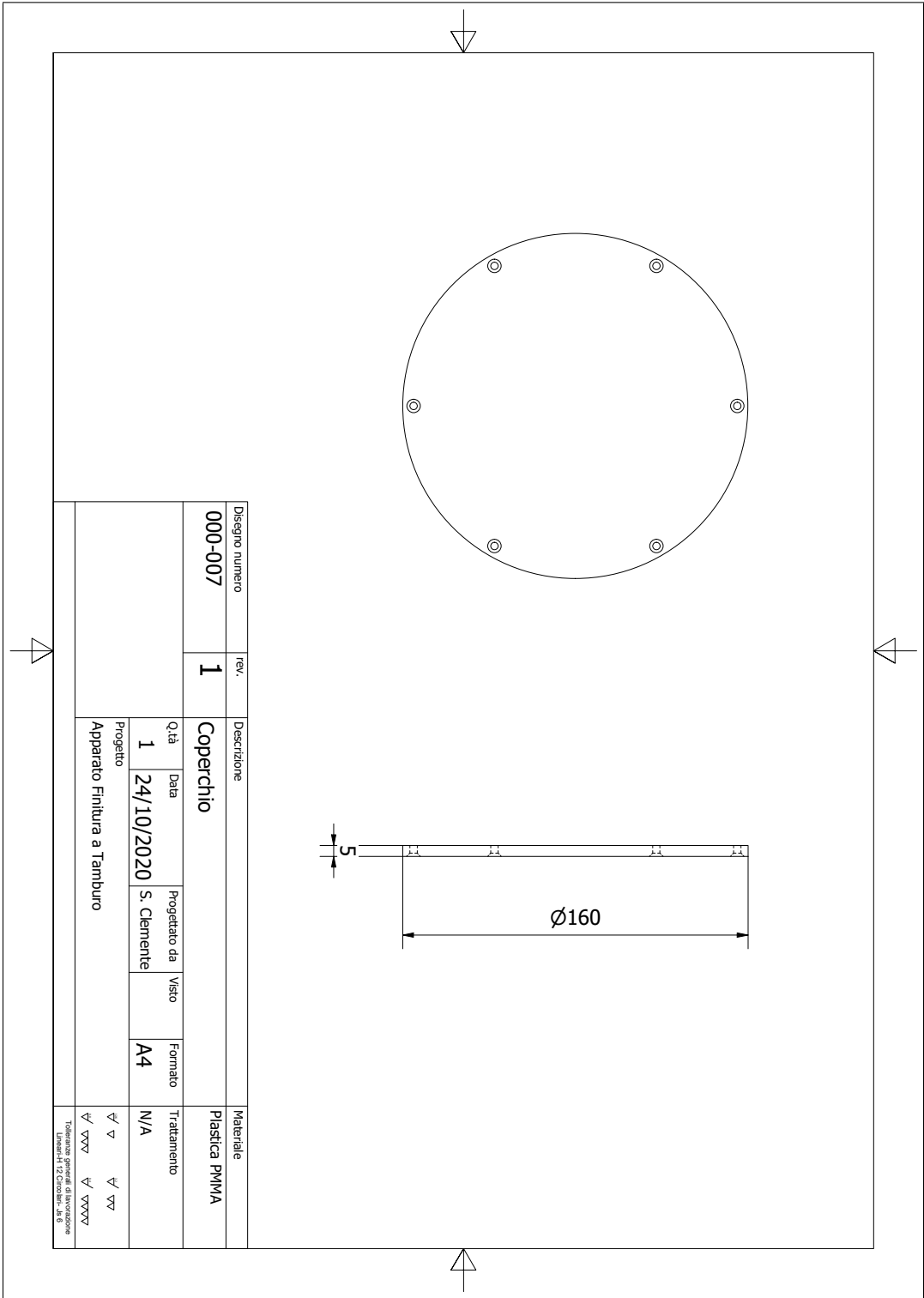
ELENCO PARTI

ELEMENTO	QTA	NUMERO PARTE	DESCRIZIONE
1	1	000-001	Telaio
5	1	000-003	Piastre Supporto Motore
6	2	B5 292 Parte 1 - 6004 - 20 x 42 x 12	Cuscinetti Supporto Albero
7	1	000-005	Albero Fissaggio Tazza
8	1	000-004	Tamburo
9	1	000-007	Coperchio
11	1	HY-D1V268N-5A	Driver per motori passo-passo
12	1	ArduinoUno	Scheda di controllo
13	1	Z3HSR430 NEMA23	Motore passo-passo
14	2	GIS045P	Cerniera per profili in alluminio





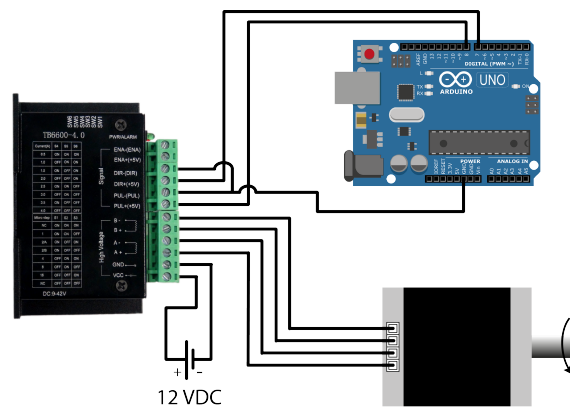
Disegno numero	rev.	Descrizione		Materiale	
000-005	1	Albero Fissaggio TAZZA		Acciaio Inossidabile	
Qda	Data	Progettato da	Verificato	Formato	Treatmento
1	07/07/2020	S. Clemente		A3	
Progetto					
<small> Se il file è in formato PDF, il disegno è stato generato automaticamente dal software di progettazione. </small>					



Appendice B

Circuito Apparato Finitura

Il circuito rappresentato in questa sezione schematizza i cablaggi che connettono tra loro i componenti utilizzati per la realizzazione dell'apparato per la finitura. L'immagine del driver BT6600 è tratta da <https://www.reprap-3d-printer.com/product/1234568429-stepper-driver-tb6600>.



Appendice C

Codice Arduino Uno R3

Di seguito viene rappresentato il codice caricato nella memoria del Arduino UNO R3 utilizzato per il controllo del motore 23HS8430 tramite il driver TB6600.

```
1 #define dirPin 7
2 #define stepPin 8
3
4 void setup() {
5     pinMode(stepPin, OUTPUT);
6     pinMode(dirPin, OUTPUT);
7     digitalWrite(dirPin, LOW);
8 }
9
10 void loop() {
11     digitalWrite(stepPin, HIGH);
12     delayMicroseconds(2000);
13     digitalWrite(stepPin, LOW);
14     delayMicroseconds(2000);
15 }
```

Il valore tra un impulso del motore e il successivo è stato impostato su 2000 microsecondi, che si traducono in 75 giri/min per la suddivisione del giro in 400 step. Il motore ha una suddivisione in 200 passi per un giro completo, ma il driver è stato impostato, per l'ottenimento di una coppia torcente maggiore, in modo da restituire un solo step al motore ogni due ricevuti.

Appendice D

Diario di Laboratorio Test Preliminari

Sono di seguito riassunte le considerazioni fatte durante i test preliminari per la taratura del macchinario progettato per la finitura a tamburo rotante.

Test	Prova	Provino	Test Precedenti	Parametri	Risultati	Osservazioni
1	Sì	009-1	Flessione	1 h Grana 20	Segni di stampa ancora visibili, grado di polishing migliore rispetto all'inizio	Pezzo tagliato a metà con tronchese Probabilmente per raggiungere migliore polishing è necessario più tempo
2	Sì	009-1 (Dopo 1 h)	Flessione Abrasion per 1 h a velocità più bassa	40 min 75 giri/min Grana 20	Migliorato il grado di finitura ma non ancora sufficiente, da testare tempi più lunghi	Velocità aumentata e aumentata la quantità di abrasivo rispetto a test 1
3	Sì	009-1 (Dopo Test 2)	Da Test 2	2 h 30 min 75 giri/min Grana 20 + 220	Ulteriore miglioramento ma finitura non ancora sufficiente, le linee longitudinali rimangono.	Aumentata velocità e tempi di permanenza nell'abrasivo.
4	Sì	009-1 (Dopo Test 3)	Da Test 3	8 h 75 giri/min Grana 20 + 220	Trasparenza finale soddisfacente, rugosità superficiale ancora alta, linee longitudinali ancora presenti.	Aumentata di molto la velocità, tempi di lavorazioni più lunghi
5	Sì	009-1 (Dopo Test 4)	Da Test 4	9 h 75 giri/min Grana 800	Nessun cambiamento particolare rispetto a risultati Test 4	Grana da 800 poco efficace
6	Sì	009-1 (Dopo Test 5)	Da Test 5	13 h 150 giri/min Grana 20 + 220 + 800	Nessun cambiamento particolare rispetto a risultati Test 5	Grana da 800 poco efficace
7	Sì	009-1 (Dopo Test 6)	Da Test 6	14 h 100 giri/min Grana 220 (600 g) Grana 800 (600 g)	Peggioramento, superficie rovinata	Probabilmente alti tempi di processo e velocità di rotazione del tamburo

8	Sì	010-1 2 segni	Flessione	14 h 100 giri/min Grana 220 (600 g) Grana 800 (600 g)	Peggioramento, superficie rovinata	Probabilmente alti tempi di processo e velocità di rotazione del tamburo
9	Sì	011-1 1 segno	Flessione	14 h 100 giri/min Grana 220 (600 g) Grana 800 (600 g)	Peggioramento, superficie rovinata	Probabilmente alti tempi di processo e velocità di rotazione del tamburo
10	Sì	009-2	Flessione	8 h 75 giri/min Grana 220 (1000 g) Grana 800 (1000 g)	Peggioramento lieve	Probabilmente alti tempi di processo e velocità di rotazione del tamburo
11	Sì	010-2 1 segno	Flessione	8 h 75 giri/min Grana 220 (1000 g) Grana 800 (1000 g)	Peggioramento lieve	Probabilmente alti tempi di processo e velocità di rotazione del tamburo
12	Sì	011-2 2 segni	Flessione	8 h 75 giri/min Grana 220 (1000 g) Grana 800 (1000 g)	Peggioramento lieve	Probabilmente alti tempi di processo e velocità di rotazione del tamburo
13	Sì	009-5	Flessione	Solvente alcolico	Miglioramento nella trasparenza, righe ancora visibili	
14	Sì	010-5	Flessione	Solvente alcolico	Lieve miglioramento nella trasparenza, righe ancora visibili	
15	Sì	011-5	Flessione	Solvente alcolico	Miglioramento nella trasparenza, righe ancora visibili	
16	Sì	009-2	Flessione Da test 10	2 h 30 min Con segatura 75 giri/min Grana 220 (600 g) Grana 800 (600 g)	Miglioramento lieve	
17	Sì	010-2 1 segno	Flessione Da test 11	2 h 30 min Con segatura 75 giri/min Grana 220 (600 g) Grana 800 (600 g)	Miglioramento lieve	
18	Sì	011-2 2 segni	Flessione Da test 12	2 h 30 min Con segatura 75 giri/min Grana 220 (600 g) Grana 800 (600 g)	Miglioramento lieve	
16	Sì	009-2	Flessione Da test 16	10 h 30 min Con segatura 75 giri/min Grana 800	Buon miglioramento	Opzione migliore utilizzare un mezzo come segatura su grane molto fini
17	Sì	010-2 1 segno	Flessione Da test 17	10 h 30 min Con segatura 75 giri/min Grana 800	Buon miglioramento	Opzione migliore utilizzare un mezzo come segatura su grane molto fini
18	Sì	011-2 2 segni	Flessione Da test 18	10 h 30 min Con segatura 75 giri/min Grana 800	Buon miglioramento	Opzione migliore utilizzare un mezzo come segatura su grane molto fini

Appendice E

Datasheets di Riferimento

L'elenco dei datasheet di riferimento di materiali e dispositivi è indicato di seguito.

- [Datasheet MED610 e MED625FLX](#)
- [Datasheet Sicurezza MED610](#)
- [Datasheet Sicurezza MED625FLX](#)
- [Datasheet Motore passo-passo 23HS8430](#)
- [Datasheet driver motore passo-passo TB6600](#)