



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

CORSO DI STUDIO IN BIOINGEGNERIA

Tesi di Laurea per il conseguimento del titolo di
Dottore Magistrale in Bioingegneria

**Caratterizzazione meccanica e
microstrutturale di allineatori ortodontici
innovativi ottenuti con stampa 3D di resine a
memoria di forma foto-polimerizzabili**

Virginia Astio

Giugno 2023

Relatore: Prof. Alberto Lagazzo

Correlatore: Dott.ssa Sara Drago

Indice

1. Introduzione: la malocclusione	1
1.1. Classificazioni.....	2
1.2. Incidenza	4
1.3. Stati patologici associati.....	7
1.4. Approcci terapeutici.....	8
2. Stato dell'arte: allineatori trasparenti.....	10
2.1. Evoluzione allineatori.....	10
2.2. Processo produttivo	12
3. Tecniche di produzione.....	13
3.1. Termoformatura	13
3.2. Stampa 3D diretta	14
3.2.1. Possibili vantaggi	17
4. Materiali utilizzati	19
4.1. Materiali polimerici.....	19
4.1.1. Polimeri termoplastici.....	19
4.1.2. PETG	23
4.2. Resine per stampa 3D diretta	24
4.2.1. Tera Harz TC-85	24
4.2.2. Polimeri a memoria di forma.....	25
5. Materiali e metodi.....	27
5.1. Preparazione provini.....	27
5.2. Prove meccaniche statiche	29
5.3. Prove a trazione a 37°C.....	34
5.4. Prove a flessione a 37°C.....	37
5.5. Test di Creep.....	39
5.6. Analisi termica	41
5.7. Verifica precisione di stampa	42
5.8. Metodi statistici	45
6. Risultati e discussione.....	46
6.1. Risultati relativi alle prove effettuate a temperatura ambiente.....	46
6.1.1. Prove a trazione.....	46

6.1.2.	Prove a flessione.....	54
6.2.	Risultati relativi alle prove effettuate a 37°C	58
6.2.1.	Prove a trazione.....	58
6.2.2.	Prove a flessione.....	65
6.3.	Statistica test a trazione e a flessione.....	69
6.4.	Risultati test di creep	76
6.5.	Risultati analisi termica	79
7.	Conclusioni e possibili sviluppi futuri	82
8.	Bibliografia.....	84

Indice delle figure

Figura 1.	<i>Classificazione di Angle [5].</i>	2
Figura 2.	<i>Classificazione del tipo di morso [5].</i>	4
Figura 3.	<i>Trattamento ortodontico convenzionale (a) e allineatore trasparente termoformato sul modello stampato in 3D (b) [22]......</i>	9
Figura 4.	<i>Processo di termoformatura su modello (a) e allineatore finale dopo post-processing (b) [20]......</i>	13
Figura 5.	<i>Flusso di lavoro della fabbricazione di allineatori trasparenti mediante il processo di termoformatura [17]......</i>	15
Figura 6.	<i>Processo di fabbricazione degli allineatori trasparenti stampati direttamente in 3D [17].</i>	16
Figura 7.	<i>Supporti necessari per la stampa diretta di allineatori [23]......</i>	16
Figura 8.	<i>(a) Configurazione originale in cui i segmenti elastici e di transizione sono aggrovigliati tra loro; (b) stiramento ad alte temperature (il segmento di transizione diventa morbido e può essere facilmente deformato); (c) forma temporanea a basse temperature (il segmento di transizione diventa duro a basse temperature); (d) recupero della forma [36]......</i>	25
Figura 9.	<i>Fogli di PETG (a) e fogli di PETG dopo il processo di termoformatura (b). ..</i>	28
Figura 10.	<i>Campioni di PETG e PETG termoformato dopo aver ricavato i provini con la fustellatrice (a) e campioni di TC-85 stampati (b).</i>	28
Figura 11.	<i>Provini per test a flessione di PETG (a) e TC-85 (b)......</i>	29

Figura 12. <i>Macchina universale per test meccanici statici Zwick/Roell Z050 usata per i test a trazione e a flessione.</i>	31
Figura 13. <i>Esempio di prova di flessione a tre punti eseguita su un campione stampato.</i>	32
Figura 14. <i>Esempio di prova di flessione a tre punti eseguita su un campione di PETG.</i>	32
Figura 15. <i>Esempio di prova a trazione eseguita su un campione di PETG.</i>	33
Figura 16. <i>Esempio di prova a trazione eseguita su un campione di TC-85.</i>	33
Figura 17. <i>Regression lineare temperatura.</i>	35
Figura 18. <i>Sistema per mantenere la temperatura a 37°C durante lo svolgimento delle prove a trazione.</i>	36
Figura 19. <i>Sistema con copertura isolante.</i>	37
Figura 20. <i>Sistema per mantenere la temperatura a 37°C durante lo svolgimento delle prove a flessione.</i>	38
Figura 21. <i>Set up sperimentale test di creep a 37°C.</i>	40
Figura 22. <i>Calorimetro Calvet C80 (a) e celle di riferimento e di misura (b).</i>	42
Figura 23. <i>File STL per stampa provini.</i>	43
Figura 24. <i>Provini per valutare precisione di stampa.</i>	43
Figura 25. <i>Esempio test a trazione su campione stampato.</i>	44
Figura 26. <i>Esempio test a flessione su un campione stampato.</i>	44
Figura 27. <i>Provini per test a flessione (a) e per test a trazione (b e c) prima e dopo i test meccanici.</i>	45
Figura 28. <i>Curva sforzo-deformazione PETG, test a trazione a temperatura ambiente, provini grandi.</i>	47
Figura 29. <i>Curva sforzo-deformazione PETG, test a trazione a temperatura ambiente, provini piccoli.</i>	47
Figura 30. <i>Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a trazione a temperatura ambiente, provini grandi.</i>	49
Figura 31. <i>Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a trazione a temperatura ambiente, provini piccoli.</i>	50
Figura 32. <i>Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a trazione a temperatura ambiente, provini grandi.</i>	52
Figura 33. <i>Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a trazione a temperatura ambiente, provini piccoli.</i>	52

Figura 34. <i>Curva sforzo-deformazione PETG, test a flessione a temperatura ambiente.</i>	54
Figura 35. <i>Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a flessione a temperatura ambiente.</i>	56
Figura 36. <i>Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a flessione a temperatura ambiente.</i>	57
Figura 37. <i>Curva sforzo-deformazione PETG, test a trazione a 37°C, provini grandi. ..</i>	59
Figura 38. <i>Curva sforzo-deformazione PETG, test a trazione a 37°C, provini piccoli. ..</i>	59
Figura 39. <i>Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a trazione a 37°C, provini grandi.</i>	61
Figura 40. <i>Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a trazione a 37°C, provini piccoli.</i>	61
Figura 41. <i>Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a trazione a 37°C, provini grandi.</i>	63
Figura 42. <i>Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a trazione a 37°C, provini piccoli.</i>	63
Figura 43. <i>Curva sforzo-deformazione PETG, test a flessione a 37°C.....</i>	65
Figura 44. <i>Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a flessione a 37°C. ...</i>	66
Figura 45. <i>Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a flessione a 37°C.....</i>	67
Figura 46. <i>Curva sforzo-deformazione di TC-85, PETG e PETG termoformato a diverse temperature.</i>	70
Figura 47. <i>Curva sforzo-deformazione di TC-85 a diverse temperature.</i>	70
Figura 48. <i>Modulo elastico a temperatura ambiente (a) e a 37°C (b).....</i>	72
Figura 49. <i>Grafici test di creep PETG.</i>	76
Figura 50. <i>Grafici test di creep PETG termoformato.</i>	76
Figura 51. <i>Grafici test di creep TC-85DAC.</i>	77
Figura 52. <i>Grafico calorimetro PETG.</i>	79
Figura 53. <i>Grafico calorimetro PETG termoformato.</i>	79
Figura 54. <i>Grafico calorimetro TC-85.....</i>	80

Indice delle tabelle

Tabella 1. <i>Classificazione dei diversi tipi di malocclusioni che interessano i denti decidui, con i loro punteggi di prevalenza percentuale e le relative deviazioni standard (SD). (*) L'asterisco indica l'assenza del valore SD perché il relativo punteggio medio di prevalenza è stato ricavato da un solo studio. (**) NPM = punteggi medi di prevalenza normalizzati al 100% [10].</i>	6
Tabella 2. <i>Classificazione dei diversi tipi di malocclusioni che interessano la dentizione mista, con i loro punteggi di prevalenza percentuale e le relative deviazioni standard (SD). (*) L'asterisco indica l'assenza del valore SD perché il relativo punteggio medio di prevalenza è stato ricavato da un solo studio. (**) NPM = punteggi medi di prevalenza normalizzati al 100% [10].</i>	6
Tabella 3. <i>Classificazione dei diversi tipi di malocclusioni che interessano la dentizione permanente, con i loro punteggi di prevalenza percentuale e le relative deviazioni standard (SD). (*) L'asterisco indica l'assenza del valore SD perché il relativo punteggio medio di prevalenza è stato ricavato da un solo studio. (**) NPM = punteggi medi di prevalenza normalizzati al 100% [10].</i>	7
Tabella 4. <i>Struttura chimica (molecolare) di alcuni allineatori ampiamente commercializzati [16].</i>	21
Tabella 5. <i>Proprietà meccaniche dei materiali polimerici termoplastici.</i>	23
Tabella 6. <i>Proprietà meccaniche resina a memoria di forma TC-85 [35].</i>	25
Tabella 7. <i>Parametri test meccanici statici TC-85.</i>	31
Tabella 8. <i>Parametri test meccanici statici PETG e PETG termoformato.</i>	31
Tabella 9. <i>Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG grandi e valori medi.</i>	48
Tabella 10. <i>Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG piccoli e valori medi.</i>	48
Tabella 11. <i>Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG termoformato grandi e valori medi.</i>	50
Tabella 12. <i>Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG termoformato piccoli e valori medi.</i>	51

Tabella 13. Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di TC-85DAC grandi e valori medi.	53
Tabella 14. Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di TC-85DAC piccoli e valori medi.	53
Tabella 15. Risultati relativi ai test a flessione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG e valori medi.	55
Tabella 16. Risultati relativi ai test a flessione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG termoformato e valori medi.	56
Tabella 17. Risultati relativi ai test a flessione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di TC- 85DAC e valori medi.....	58
Tabella 18. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di PETG grandi e valori medi.	60
Tabella 19. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di PETG piccoli e valori medi.	60
Tabella 20. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di PETG termoformato grandi e valori medi.	62
Tabella 21. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di PETG termoformato piccoli e valori medi.....	62
Tabella 22. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di TC-85DAC grandi e valori medi.	64
Tabella 23. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di TC-85DAC piccoli e valori medi.	64
Tabella 24. Risultati relativi ai test a flessione a 37°C effettuati sui campioni di PETG e valori medi.	66
Tabella 25. Risultati relativi ai test a flessione a 37°C effettuati sui campioni di PETG termoformato e valori medi.	67
Tabella 26. Risultati relativi ai test a flessione a 37°C effettuati sui campioni di TC-85DAC e valori medi.	68
Tabella 27.. Statistiche descrittive del modulo elastico di trazione misurato. I risultati sono espressi come mediana [intervallo interquartile]. Valore P intergruppo: valore P del test di Kruskall-Wallis. Valore P intra-gruppo: valore P del Test U di Mann-Whitney.....	71

Tabella 28. *Statistiche descrittive del carico massimo misurato. I risultati sono espressi come mediana [intervallo interquartile]. Valore P intergruppo: valore P del test di Kruskal-Wallis. Valore P intra-gruppo: valore P del Test U di Mann-Whitney..... 72*

Tabella 29. *Statistiche descrittive dell'allungamento a rottura. I risultati sono espressi come mediana [intervallo interquartile]. Valore P intergruppo: valore P del test di Kruskal-Wallis. Valore P intra-gruppo: valore P del Test U di Mann-Whitney..... 73*

Tabella 30. *Statistiche descrittive della tensione a rottura. I risultati sono espressi come mediana [intervallo interquartile]. Valore P intergruppo: valore P del test di Kruskal-Wallis. Valore P intra-gruppo: valore P del Test U di Mann-Whitney. 74*

Tabella 31. *Statistiche descrittive dei risultati dei test di flessione. I risultati sono espressi come mediana [intervallo interquartile]. Valore P intergruppo: valore P del test di Kruskal-Wallis. Valore P intra-gruppo: valore P del Test U di Mann-Whitney..... 75*

Sommario

Le anomalie relative all'occlusione sono molto diffuse e frequenti e possono essere trattate con diverse metodiche. L'aumento delle preoccupazioni estetiche relative agli apparecchi ortodontici tradizionali ha reso necessaria la ricerca di un trattamento più estetico che ha portato a sviluppare metodi alternativi ai classici apparecchi fissi, ovvero gli allineatori rimovibili trasparenti. La terapia mediante allineatori trasparenti consiste nell'utilizzo di una serie di mascherine rimovibili che vengono cambiate in sequenza per realizzare i movimenti ortodontici pianificati. L'attuale gold standard prevede che questi allineatori vengano prodotti a partire da lastre di materiali polimerici termoplastici, tra cui il più utilizzato è il PETG. Queste lastre vengono poi sottoposte a un processo di termoformatura sulle copie fisiche, quindi sui modelli 3D ottenuti a partire dalla pianificazione virtuale effettuata attraverso la piattaforma CAD. Il progresso tecnologico e dei materiali ha permesso di effettuare un cambiamento nel processo di produzione, rendendo possibile il passaggio alla stampa 3D diretta. Questa tecnica può superare i limiti del processo di termoformatura offrendo la possibilità di ottenere un maggior controllo dello spessore dell'allineatore nelle diverse zone dell'arcata, di produrre allineatori trasparenti con spessore personalizzato e un migliore adattamento. Permette inoltre di ridurre le fasi di produzione, quindi i costi e di migliorare l'impatto ambientale.

La composizione del materiale utilizzato per la produzione dipende, però, strettamente dal processo di fabbricazione che si sceglie di utilizzare. Attualmente non esistono materiali stampabili che soddisfino gli standard di compatibilità e che abbiano proprietà meccaniche adeguate, ad eccezione di Tera Harz TC-85. Questa resina è stata oggetto di questo studio, incentrato principalmente sulla verifica sperimentale delle sue proprietà meccaniche e termiche da comparare con il PETG.

1. Introduzione: la malocclusione

Con il termine occlusione si indica il modo in cui i denti delle due arcate vengono a contatto, quindi il rapporto che intercorre tra le due arcate in condizioni statiche e dinamiche, ovvero sia in fase di chiusura della bocca, sia durante la masticazione e i movimenti parafunzionali (anche in queste fasi, infatti, si verificano dei contatti) [1, 2].

Durante il movimento di chiusura delle arcate, la mandibola si sposta in senso verticale e si pone quanto più possibile vicina al mascellare superiore; per farlo passa automaticamente da una posizione di apertura a una di intercuspidação abituale, caratterizzata dal contemporaneo molteplice verificarsi di un elevato numero di punti di contatto tra il complesso delle superfici occlusali superiori e inferiori dei denti posteriori. Partendo da questa posizione la mandibola può nuovamente compiere movimenti di apertura, protrusione e lateralità [2].

Il raggiungimento della posizione di intercuspidação abituale è un riflesso appreso, programmato a livello neuromuscolare. L'occlusione abituale è chiamata infatti anche occlusione miocentrica o miofunzionale ed è caratterizzata da equilibrio muscolare. L'intercuspidação abituale può essere alterata in seguito a modificazioni della dentatura che possono quindi compromettere l'equilibrio esistente tra le superfici occlusali [2].

Non solo alterazioni della dentatura ma anche una disarmonia delle strutture scheletriche o neuro-muscolari può portare ad un'alterazione della normale occlusione.

Le modificazioni dei contatti tra le superfici occlusali sono quindi in continua evoluzione e possono portare a delle condizioni patologiche [2], che possono essere prevenute o eliminate solo con un trattamento specifico [1].

Il termine malocclusione si riferisce a qualsiasi relazione anomala o scorretta tra i denti dell'arcata superiore e inferiore [3]. La malocclusione è quindi una condizione dello sviluppo in cui si verifica una deviazione dalla normale relazione o allineamento dei denti con gli altri denti della stessa arcata e/o con i denti dell'arcata opposta [4].

La maggior parte delle persone presenta un certo grado di deviazione dall'occlusione ideale e, di solito, questa problematica si trasmette da una generazione all'altra [3].

Per adottare dei termini di comunicazione standard e per acquisire le conoscenze essenziali per la scelta del protocollo di trattamento si possono dividere i tipi di malocclusione in

diversi gruppi. I due metodi più utilizzati per la classificazione delle malocclusioni sono: il “sistema Angle (Edward Angle, 1899-1907)” e il “sistema Simon (Simon, 1922)” [3].

1.1. Classificazioni

La classificazione di Angle è il sistema più conosciuto al mondo per la valutazione delle malocclusioni sagittali ed è stato il metodo standard per più di 100 anni [5]. Il grande vantaggio di questo metodo è la semplicità di utilizzo.

Come mostra la Figura 1, la classificazione di Angle si basa sulla posizione relativa del primo molare mascellare e suddivide i tipi di malocclusioni in tre classi [5]:

- Classe I (occlusione neutra): la cuspidine mesio-vestibolare del primo molare mascellare articola con il solco mesio-vestibolare del primo molare mandibolare su entrambi i lati;
- Classe II (occlusione distale): la cuspidine mesio-vestibolare del primo molare mascellare articola mesialmente al solco mesio-vestibolare del primo molare inferiore su almeno un lato;
- Classe III (occlusione mesiale): la cuspidine mesio-vestibolare del primo molare mascellare articola distalmente al solco mesio-vestibolare del primo molare mandibolare su almeno un lato [6].

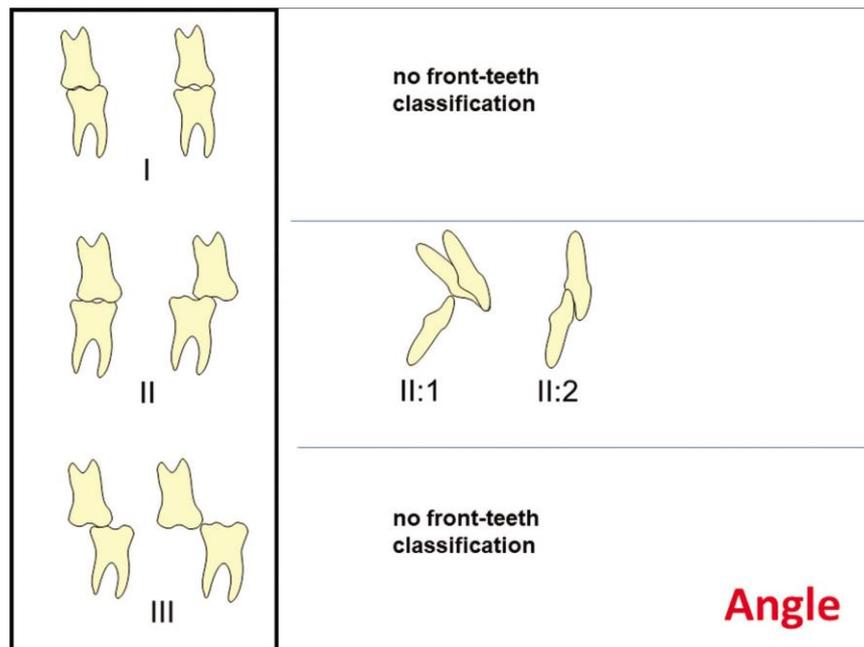


Figura 1. *Classificazione di Angle [5].*

Il più grande svantaggio della classificazione di Angle è il fatto che la posizione dei denti anteriori viene considerata solo nei soggetti appartenenti alla Classe II, ma non nei casi di Classe I e III. Pertanto, la precisione del metodo è limitata all'occlusione dei molari e non tiene regolarmente conto dei denti anteriori, che sono però di estrema importanza nella valutazione delle malocclusioni sagittali [5].

Per risolvere i limiti di questa classificazione nel 2018 è stata introdotta in letteratura una nuova classificazione delle malocclusioni: la classificazione del tipo di morso [7].

Questa classificazione si può considerare come una classificazione di Angle estesa. Essa, infatti, migliora la categorizzazione delle malocclusioni sagittali poiché include una distinzione basata sulla posizione degli incisivi in tutte e tre le classi di Angle [5].

Per quanto riguarda la relazione molare si considera la stessa distinzione usata nella classificazione di Angle, la novità è quindi l'introduzione di una distinzione che riguarda la posizione degli incisivi. In particolare, nella classificazione del tipo di morso viene considerata anche la relazione sagittale degli incisivi espressa dall'overjet, e indicata in quattro classi di incisivi (0, 1, 2 e 3):

- 0 o normale overjet (2,0-3,5 mm): gli incisivi mascellari hanno un'angolazione normale;
- 1 o grande overjet (>3,5 mm): gli incisivi mascellari sono inclinati o hanno un'angolazione normale (viene considerato l'incisivo centrale con l'overjet più ampio);
- 2 o piccolo overjet (<2,0 mm): gli incisivi mascellari sono retrocessi e il morso è profondo, cioè l'overbite è superiore a 5 mm (devono essere interessati almeno due incisivi centrali);
- 3 o overjet negativo (morso trasversale anteriore): gli incisivi inferiori sporgono in avanti rispetto a quelli superiori (devono essere interessati almeno i due incisivi centrali) [5].

Di conseguenza, nella classificazione del tipo di morso, le relazioni tra i molari (I, II e III) sono combinate con quattro relazioni tra gli incisivi (0, 1, 2 e 3), dando origine ai seguenti nove tipi di morso [Figura 2]: I:0, I:1, I:2, I:3, II:0, II:1, II:2, III:0, e III:3 [5].

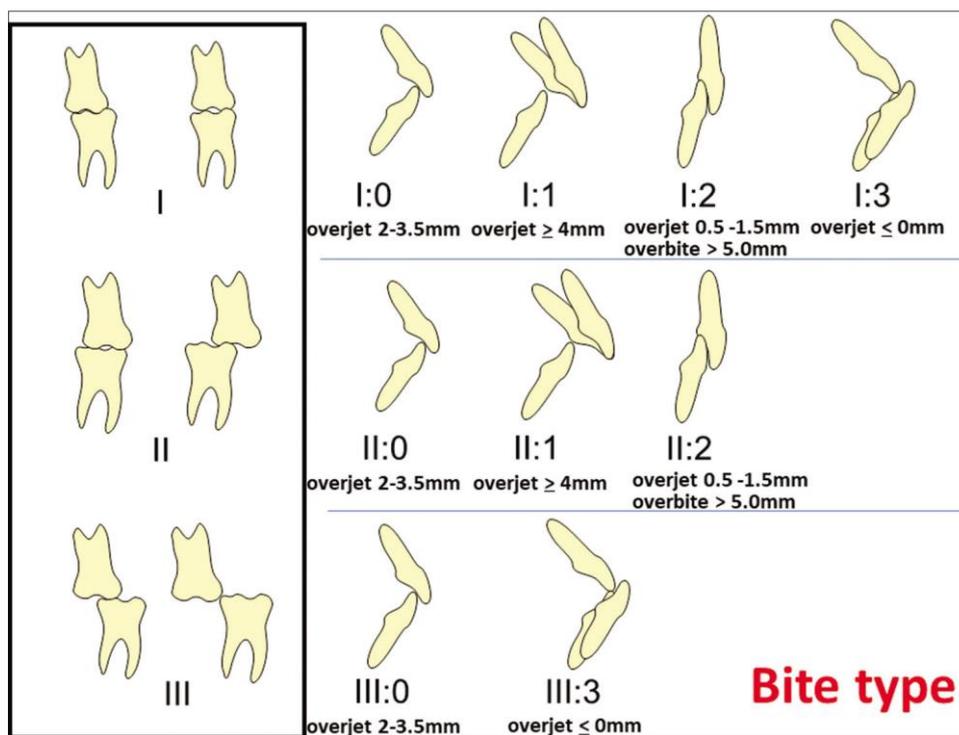


Figura 2. *Classificazione del tipo di morso [5].*

1.2. Incidenza

La malocclusione è una delle condizioni orali più comuni, con una prevalenza che va dal 20 al 100% [4]. Questa variazione è probabilmente dovuta alle differenze nei metodi diagnostici e alle caratteristiche di ciascuna popolazione [8].

A causa della sua elevata prevalenza, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) considera la malocclusione uno dei più importanti problemi di salute orale, dopo la carie e la malattia parodontale. La sua prevalenza è molto variabile ed è stimata tra il 39% e il 93% nei bambini e negli adolescenti [9].

La Tabella 1, Tabella 2, Tabella 3 mostrano la prevalenza globale della malocclusione. Nello specifico, Lombardo et al. (2020) [10] hanno effettuato una revisione sistematica che ha fornito un accurato quadro epidemiologico mondiale sulla prevalenza delle malocclusioni nella dentatura primaria, mista e permanente. Secondo i dati raccolti, più della metà dei bambini e degli adolescenti nel mondo soffre di un tipo di malocclusione, senza differenze significative tra maschi e femmine. Questa elevata prevalenza non è scesa al di sotto del 50% in nessuno dei continenti del mondo con l'eccezione, seppur trascurabile,

dell'Africa (48%); in Oceania non sono stati trovati studi che trattassero questo argomento [10]. La malocclusione raggiunge la sua massima prevalenza a livello mondiale nella prima infanzia durante il periodo della dentizione decidua (54%) e si mantiene invariata nella dentizione permanente (54%). In base a questi dati di prevalenza, la malocclusione rappresenta un importante problema di salute orale e un onere economico sia per le famiglie dei bambini affetti sia per i servizi pubblici di salute dentale [10].

Il primo parametro analizzato in questa revisione è stato la classe occlusale di Angle; circa due terzi della popolazione mostra una classe dentale I sia durante la dentizione primaria che permanente. Per quanto riguarda il restante terzo della popolazione, la classe II è risultata tre volte più prevalente della classe III sia nella dentizione permanente che in quella primaria. Inoltre, la prevalenza della classe I sembra diminuire dalla dentizione primaria a quella mista e permanente, probabilmente a causa di manifestazioni genetiche o di condizionamenti ambientale, mentre le classi II e III di Angle rimangono sostanzialmente stabili nelle tre diverse dentizioni [10]. Circa il 70% dei bambini e degli adolescenti ha mostrato parametri normali di overjet sia nella dentizione primaria che in quella permanente. Tra il restante 30% il risultato prevalente è l'aumento dell'overjet, molto più frequente (7 volte) dell'overjet inverso sia nella dentizione primaria che permanente [10].

In conclusione, da questo studio si evince che la malocclusione nei bambini e negli adolescenti è una condizione altamente diffusa in tutto il mondo e colpisce un individuo su due (o più) [10].

Tabella 1. *Classificazione dei diversi tipi di malocclusioni che interessano i denti decidui, con i loro punteggi di prevalenza percentuale e le relative deviazioni standard (SD). (*) L'asterisco indica l'assenza del valore SD perché il relativo punteggio medio di prevalenza è stato ricavato da un solo studio. (**) NPM = punteggi medi di prevalenza normalizzati al 100% [10].*

Primary dentition												
Malocclusion Traits	Europe		America		Africa		Asia		Worldwide			
	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	NPMs (%)**	
Sagittal	Angle Class I	29.5	*	70.22	47			49.68	20.2	62.3	31.5	54.2
	Angle Class II	19.3	10,8	20.47	36			33.27	11	23.29	20.5	35.3
	Angle Class III	13	*	6.37	1.8			13.18	8.9	7.76	6.1	10.5
	Normal overjet	40.76	22	69	17.3					69	14.8	72.6
	Increased overjet	36.8	8.5	20	5.9	11.4	*	33.90		23	14.4	24.2
	Reverse overjet			3.10	*	1.4	*			3	1.2	3.2
Vertical	Normal overbite	52,05	45	65.40	*	56.50	*			66	16.6	69.5
	Open bite	34	29.7	2	1.8	2.6	*			5	17.5	5.3
	Deep bite			12.80	8.2	36	*	63.70	*	24	21.1	25.2
Transverse	Crossbites	7	0.07			5.6	*			10	8.5	10
	Posterior Crossbite	3.82	1.13	17	8					14	7.7	14
	Scissorbite					0.4				0.4	*	0.4
	Midline shift							26.6	*	27	*	27
	Crowding			28.40	*	41.5	*	6.5	*	16	17.6	16
Diastema												

Tabella 2. *Classificazione dei diversi tipi di malocclusioni che interessano la dentizione mista, con i loro punteggi di prevalenza percentuale e le relative deviazioni standard (SD). (*) L'asterisco indica l'assenza del valore SD perché il relativo punteggio medio di prevalenza è stato ricavato da un solo studio. (**) NPM = punteggi medi di prevalenza normalizzati al 100% [10].*

Mixed dentition												
Malocclusion Traits	Europe		America		Africa		Asia		Worldwide			
	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	NPMs (%)**	
Sagittal	Angle Class I	53	11.6	41	15.4	61	*	57	12	54	12.5	60.7
	Angle Class II	30	5.1	50	14.4	24	*	23	7.9	29	11	32.6
	Angle Class III	3	3.2	8	1.9	10	*	6	1.8	6	2.9	6.7
	Normal overjet	70	19.9	68	19.4	70	*	75	6.1	71	15.7	71.6
	Increased overjet	24	13.75	29	9.8	24	*	24	3.4	27	9.5	30.3
	Reverse overjet	3	0.9	1	3.7	3	*	1	2.6	1	2.4	1.1
Vertical	Normal overbite	76	12.3	52.3	*	76	*	63	2.5	69	10.1	70.4
	Open bite	3	0.7	6	5.9	3	*	2	1.6	3	4.4	3.4
	Deep bite	19	8	20	16.2	19	*	35	0.7	26	10.1	26.5
Transverse	Crossbites	36	*			7.1	*			11	20.6	11
	Posterior Crossbite	11	4.1	29.20	*			5	4.7	8	8.9	8
	Scissorbite	1.9	*					2	*	2	0.07	2
	Midline shift	21.9	*			42.20	*			35	14.3	35
	Crowding	42	*	50	15.8			11.8	*	37	37	37

Diastema	52.5	*	33	25.9	35	22.7	35
----------	------	---	----	------	----	------	----

Tabella 3. Classificazione dei diversi tipi di malocclusioni che interessano la dentizione permanente, con i loro punteggi di prevalenza percentuale e le relative deviazioni standard (SD). (*) L'asterisco indica l'assenza del valore SD perché il relativo punteggio medio di prevalenza è stato ricavato da un solo studio. (**) NPM = punteggi medi di prevalenza normalizzati al 100% [10].

Permanent dentition												
Malocclusion Traits	Europe		America		Africa		Asia		Worldwide			
	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	Mean (%)	SD	NPMs (%)**	
Sagittal	Angle Class I	34.5	15.2	49.62	28.9	83.5	19.1	67.55	26.8	55.5	24.6	61
	Angle Class II	36.7	18.1	22.69	10.8	11.7	15.1	18.52	9.3	24.7	13.6	27.2
	Angle Class III	14.2	11.2	26.24	17.1	2.61	1.2	4.86	5.5	10.7	9.5	11.8
	Normal overjet	54.5	*			51	*	57	14.4	57	11.7	70.4
	Increased overjet	30	19.7	18	14	25	26	19	19.3	21	21.2	25.9
	Reverse overjet	7.1	3.9	0.2	0.1	6	5.5	10	7.1	3	5.5	3.7
Vertical	Normal overbite	65	18.3	9		56	17.8	30	34.3	49	27	64.5
	Open bite	12	10.2	5	18.7	5	2.6	9	6.5	6	12	7.9
	Deep bite	14	28.1	5	*	31	2.6	27	19.6	21	20.4	27.6
Transverse	Crossbites	10	0.35		*	5.4	*	2.3	*	5	4.1	5
	Lateral Crossbite	5	0	4	1.5			8	2.8	7	2.3	7
	Scissorbite	0.30	0					5	*	5	6.5	5
	Midline shift	32	*	37	*	21.6	*	29.7	*	28	5.6	28
	Crowding	51	16.5	39	14.5	13	0	50	28.9	39	23.6	39
Diastema	4	14.8	1	1.2	20.9	*	22	5.6	5	8.5	8.5	

1.3. Stati patologici associati

La malocclusione dentale è un problema piuttosto comune e molto diffuso già in età pediatrica. La malocclusione non è soltanto un problema estetico che provoca un viso asimmetrico o un sorriso poco armonioso ma ad essa possono essere associati anche molteplici problemi che possono coinvolgere non solo la bocca ma anche altri apparati. Se la malocclusione è molto accentuata provoca un affollamento dei denti e quindi una conseguente predisposizione allo sviluppo di carie. Inoltre, può provocare anche gengiviti e parodontiti. Il problema principale è relativo alla masticazione; una scorretta masticazione può portare ad una sollecitazione della mandibola con carichi errati e quindi

conseguenti dolori temporo-mandibolari che possono anche scatenare dolori cervicali o cefalee. Nei casi più gravi può creare anche problemi all'apparato respiratorio come tosse cronica, sinusiti, asma, o problemi relativi al tratto gastro-intestinale [11].

Gli ortodontisti considerano tradizionalmente come principali obiettivi terapeutici il ripristino della salute orale, della funzione e dell'estetica. Tuttavia, l'impatto sociale positivo causato dal miglioramento dell'estetica è sempre più accettato come importante beneficio del trattamento [12]. La malocclusione, infatti, insieme all'allineamento dei denti anteriori, alla forma e alla posizione dei denti e al contorno gengivale simmetrico, è uno degli aspetti che influenzano la percezione dell'estetica facciale e quindi l'autostima [12, 13].

1.4. Approcci terapeutici

È raro riscontrare nell'uomo un'occlusione ideale. Le anomalie relative all'occlusione sono molto diffuse e frequenti ma si tende a correggerle solo nei casi in cui esse determinino dei disturbi funzionali [2].

Le malocclusioni possono essere trattate con diverse metodiche. Escluse quelle derivate da problemi di carattere scheletrico, che richiedono un intervento di tipo chirurgico, esse possono essere trattate con trattamenti di tipo ortodontico, di tipo protesico o entrambi. Il trattamento ortodontico è la scelta più consigliata ma, in alcuni casi, soprattutto a causa dell'età del paziente, è necessario ricorrere al trattamento protesico [1].

Negli ultimi anni le preoccupazioni estetiche relative agli apparecchi ortodontici sono notevolmente aumentate a causa dell'aumento dei pazienti adulti che si sottopongono al trattamento. Questo ha quindi alimentato la richiesta di una tecnica di trattamento più estetica che ha portato a sviluppare metodi alternativi ai classici apparecchi fissi per il trattamento delle malocclusioni [14, 15].

Gli allineatori rimovibili trasparenti risultano infatti un'ottima alternativa estetica e confortevole. Inoltre, questa soluzione rispetta maggiormente la salute parodontale del paziente in quanto possono essere rimossi durante i pasti e possono essere lavati [16].

Nel corso degli anni si sono verificati grandi miglioramenti tecnologici nell'ambito dei biomateriali e nella progettazione assistita da computer e questo ha reso la terapia mediante allineatori trasparenti un pilastro del trattamento ortodontico [17].

La terapia con allineatori trasparenti, nel caso di malocclusioni da lievi a moderate e in pazienti non in crescita, è quindi una valida alternativa al trattamento mediante apparecchi fissi convenzionali. È però meno efficace e prevedibile rispetto a questi ultimi nei casi di movimenti dentali e malocclusioni ortodontiche complesse. Tuttavia, grazie ai miglioramenti di software, materiali e dispositivi ausiliari, si è verificato un aumento delle malocclusioni che possono essere trattate [18].



Figura 3. *Trattamento ortodontico convenzionale (a) e allineatore trasparente termoformato sul modello stampato in 3D (b) [22].*

2. Stato dell'arte: allineatori trasparenti

In ortodonzia la terapia mediante allineatori trasparenti è emersa, quindi, come promettente alternativa ai tradizionali apparecchi fissi.

La terapia mediante allineatori trasparenti consiste nell'utilizzo di una serie di mascherine trasparenti rimovibili che vengono cambiate in sequenza per realizzare i movimenti ortodontici pianificati. Queste mascherine vengono sostituite circa ogni due settimane e il paziente le deve indossare sempre, ad eccezione dei pasti o per l'igiene orale. Questi allineatori permettono quindi di realizzare significativi movimenti ortodontici attraverso l'utilizzo di materiali termoplastici [17].

2.1. Evoluzione allineatori

Gli allineatori hanno subito molte modifiche nel corso degli anni per ricercare una migliore efficienza ed estetica. È stata pubblicata una rassegna narrativa nella quale vengono discussi gli sviluppi storici e i protocolli attuali utilizzati nella produzione degli allineatori, che comprende l'intera gamma dei materiali utilizzati e ne delucida le caratteristiche cruciali per determinarne le prestazioni in ambiente orale [17]. Come è riassunto nello studio di Bichu et al. [17], le trasformazioni degli allineatori trasparenti in generale e di Invisalign in particolare permettono di distinguere otto diverse generazioni di allineatori trasparenti:

- Prima generazione: gli allineatori di prima generazione, per ottenere i risultati desiderati, si basavano unicamente sul materiale plastico termoformato, senza alcun elemento di supporto incorporato nel sistema di allineamento. Il primo caso clinico è stato pubblicato nel 2000 con l'utilizzo di Invisalign di prima generazione per il trattamento di un lieve affollamento. Il materiale utilizzato, Proceed30, era una miscela di polimeri che però non soddisfaceva tutti i requisiti fisici, chimici e clinici.
- Seconda generazione: è stato introdotto l'utilizzo di attacchi per fornire un migliore controllo dei movimenti dentali pianificati. Inoltre, è possibile aggiungere bottoni in composito ed elastici intermascellari. Il materiale viene sostituito con uno che fornisce un'elasticità maggiore chiamato Exceed30.

- Terza generazione: vengono introdotti attacchi ottimizzati, progettati e posizionati direttamente dal software e rientrano nella plastica poliuretanica per esercitare una pressione maggiore su punti specifici della corona, al fine di produrre un momento di coppia e una coppia radicolare.
- Quarta generazione: sono stati introdotti gli attacchi G4 per facilitare i risultati clinici nei casi di morso aperto. È stato inoltre introdotto un nuovo materiale, un poliuretano termoplastico aromatico multistrato (SmartTrack™) che offre prestazioni migliori, come una forza delicata e più costante, un'azione più duratura e una migliore adesione, che facilita l'utilizzo da parte dei pazienti. Rispetto a quello utilizzato in precedenza offre una maggiore costanza nell'applicazione delle forze ortodontiche, una maggiore elasticità, stabilità chimica e un adattamento dell'allineatore ancora più preciso e confortevole.
- Quinta generazione: il passaggio alla quinta generazione ha migliorato la prevedibilità della correzione del morso profondo introducendo aree di pressione sulla linguale dei denti anteriori superiori e inferiori, rampe di morso di precisione sulla linguale degli incisivi superiori e attacchi di ritenzione a forma di cupola smussata sui premolari.
- Sesta generazione: l'innovazione clinica di sesta generazione riguarda il trattamento ortodontico delle estrazioni dei primi premolari, che utilizza la nuova tecnologia SmartStage™ e le funzioni SmartForce™ per fornire un controllo verticale e un parallelismo radicolare che ottimizzano la progressione dei movimenti dentali per i trattamenti di estrazione pianificati per il massimo ancoraggio.
- Settima generazione: nel 2016 è stato rilasciato Invisalign G7, un insieme di funzioni progettate per garantire un maggiore controllo dei movimenti dentali e migliori risultati di trattamento, in particolare per i pazienti adolescenti.
- Ottava generazione: nel 2020 sono stati effettuati i miglioramenti dell'ottava generazione, volti a migliorare ulteriormente la prevedibilità della correzione del morso profondo con l'attivazione dell'allineatore SmartForce™ per l'intrusione anteriore e i miglioramenti nell'impostazione del software virtuale ClinCheck per livellare la Curva di Spee. Inoltre, grazie al supporto dell'espansione e agli attacchi di rotazione, G8 riduce inoltre al minimo il ribaltamento indesiderato della corona durante l'espansione dell'arcata posteriore, [17].

2.2. Processo produttivo

Gli allineatori trasparenti vengono fabbricati attraverso l'utilizzo della tecnologia CAD/CAM.

La progettazione assistita da computer (CAD) e la fabbricazione assistita da computer (CAM) sono processi digitali che offrono l'opportunità di creare protesi e altri prodotti dentali in modo completamente digitale rispetto al metodo convenzionale precedente. I dati così ottenuti possono quindi essere manipolati secondo le necessità prima di essere convertiti in una forma fisica utilizzando le dimensioni e i materiali definiti durante la fase di progettazione digitale. Questa sequenza di passaggi viene definita "flusso di lavoro digitale" [19]. La fase iniziale è quindi l'acquisizione dei dati. L'acquisizione dei dati può avvenire attraverso un approccio diretto, quindi attraverso una scansione digitale intraorale, o attraverso un approccio indiretto, quindi prelevando delle impronte in mastice dal paziente ed effettuando in seguito una scansione digitale [17]. Si ottiene così una rappresentazione digitale completa della dentatura del paziente che costituisce la base per la pianificazione dei movimenti dentali desiderati che si vuole ottenere attraverso l'utilizzo degli allineatori trasparenti. Viene poi utilizzata la piattaforma CAD per la pianificazione virtuale di tutti i movimenti dentali che si desidera ottenere. Attraverso movimenti sequenziali, la posizione dei denti viene modificata fino ad arrivare alle posizioni desiderate; così si generano dei modelli virtuali sequenziali con i denti che si trovano nelle posizioni previste per ogni fase [18, 17].

Vengono poi prodotti dei modelli che rappresentano il progressivo movimento dentale che si vuole ottenere. È fondamentale ottenere questi modelli con precisione e, per farlo, è possibile scegliere tra il tradizionale gesso e la moderna stampa 3D [20]. La tecnologia maggiormente utilizzata per la fabbricazione di questi modelli è la stampa 3D.

In seguito, gli allineatori trasparenti vengono termoformati sulle copie fisiche, quindi sui modelli 3D ottenuti, e infine vengono rifilati e lucidati [17]. A questo punto il medico potrà consegnarli al paziente nella sequenza corrispondente ai modelli [18].

3. Tecniche di produzione

3.1. Termoformatura

Gli allineatori dentali trasparenti vengono convenzionalmente prodotti partendo da un'impronta dentale del paziente su modelli in gesso e applicando la tecnica della termoformatura di una lastra termoplastica trasparente biocompatibile mediante una macchina termoformatrice sottovuoto [21]. La tecnologia utilizzata per la fabbricazione dei modelli ortodontici è la stampa tridimensionale. La serie di allineatori trasparenti viene poi termoformata sulla base di questi modelli. I due processi, quindi stampa tridimensionale seguita da termoformatura, a seconda del tipo di malocclusione, del protocollo di cambio degli allineatori e del numero di perfezionamenti, possono richiedere molto tempo, manodopera e costi elevati [17]. Inoltre, questo sistema porta ad una grande produzione di modelli e, ad oggi, non è ben documentato l'impatto ambientale delle resine che vengono utilizzate per stampare i modelli 3D. È quindi necessario considerare diversi aspetti, tra cui il consumo energetico, i materiali di scarto e l'inquinamento ambientale [22].



Figura 4. *Processo di termoformatura su modello (a) e allineatore finale dopo post-processing (b) [20].*

3.2. Stampa 3D diretta

Il progresso tecnologico e dei materiali degli ultimi anni ha cambiato il processo di produzione degli allineatori, passando dalla tecnica di termoformatura a quella della stampa diretta. Graphy Inc (Seoul, Corea) ha creato la prima resina fotopolimerizzabile, chiamata TC-85DAC, che permette di stampare direttamente gli allineatori senza bisogno di creare prima i modelli e di effettuare il processo di termoformatura [23].

Per la stampa 3D diretta degli allineatori possono essere utilizzati diversi metodi di stampa come la fabbricazione di filamenti fusi (FFF), la sinterizzazione laser selettiva (SLS) o la fusione (SLM) ma, per le caratteristiche specifiche e i requisiti delle proprietà del materiale più adeguati, l'opzione più promettente risulta essere la stampa 3D mediante fotopolimerizzazione di resine liquide trasparenti [17].

Come è visibile dalla Figura 5 e dalla Figura 6, il flusso di lavoro nel caso di stampa 3D diretta cambia. In particolare, è possibile riconoscere diverse fasi [23]:

- Scansione intraorale;
- Importazione di scansioni dentali;
- Progettazione di allineatori;
- Esportazione dell'allineatore virtuale;
- Posizionamento dei supporti di stampa;
- Stampa;
- Rimozione della resina in eccesso;
- Rimozione dei supporti;
- Polimerizzazione UV;
- Lucidatura.

Per prima cosa è sempre necessaria un'accurata scansione intraorale, seguita dall'elaborazione delle scansioni nel software CAD ortodontico. A questo punto l'allineatore viene progettato virtualmente utilizzando strumenti di disegno attorno al modello iniziale. La serie successiva degli allineatori viene poi progettata automaticamente dal software in base ai movimenti dei denti.

Gli allineatori vengono poi esportati dal software e posizionati sulla piattaforma virtuale della stampante 3D. In questa fase è necessario scegliere come posizionare gli allineatori in quanto il diverso orientamento della stampa potrebbe influenzare le proprietà

meccaniche dell'allineatore. Il posizionamento orizzontale permette di ottenere una stampa più veloce perché il numero di strati complessivo risulta essere inferiore, però il numero di supporti necessari alla stampa risulta superiore. I supporti sono necessari per stampare gli allineatori. Solitamente vengono posizionati grazie all'utilizzo di un software nel quale è necessario impostare i parametri in modo accurato. Successivamente si procede con la stampa. Una volta terminato il processo di stampa è necessario rimuovere la resina in eccesso; gli allineatori stampati vengono puliti mediante centrifugazione per circa 6 minuti a 600 giri al minuto. I supporti, invece, vengono rimossi solo dopo la fase di polimerizzazione per evitare di alterare la forma dell'allineatore. Infine, si procede alla lucidatura con spazzole rotanti [23].

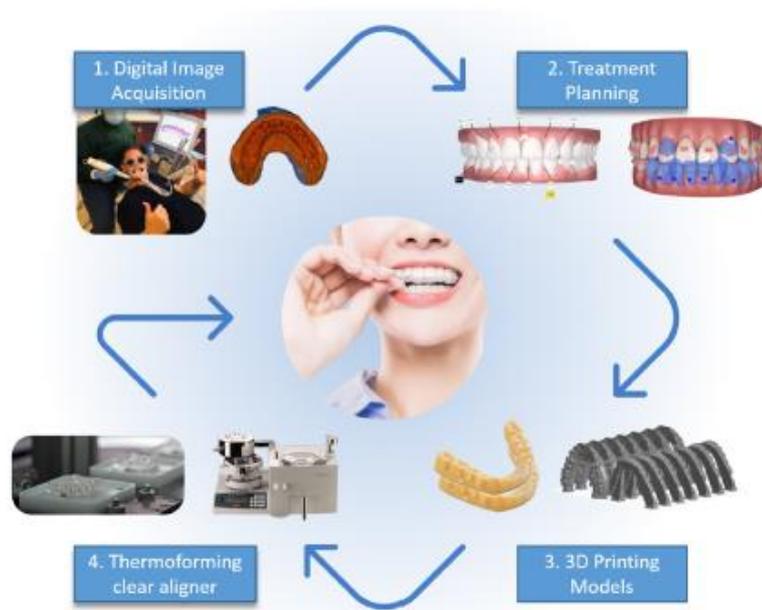


Figura 5. Flusso di lavoro della fabbricazione di allineatori trasparenti mediante il processo di termoformatura [17].

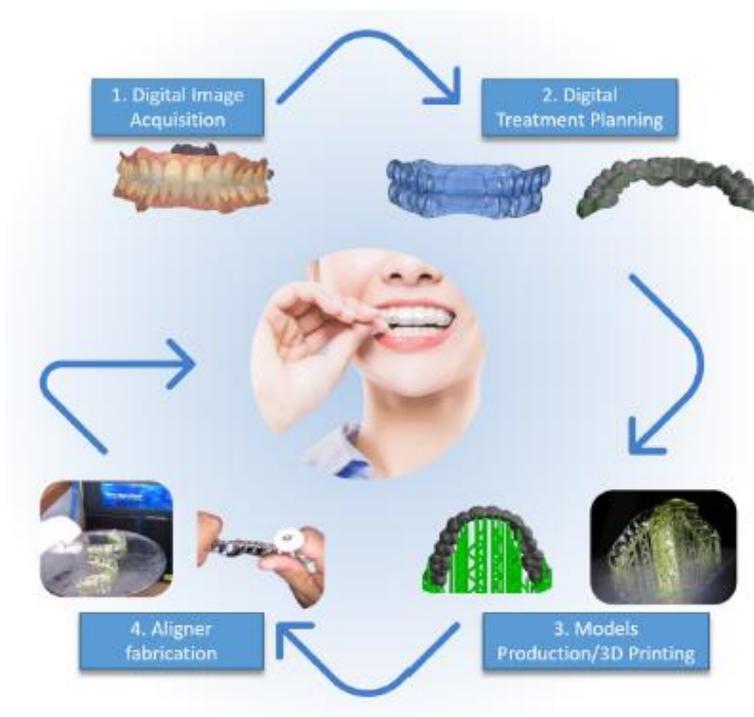


Figura 6. *Processo di fabbricazione degli allineatori trasparenti stampati direttamente in 3D [17].*

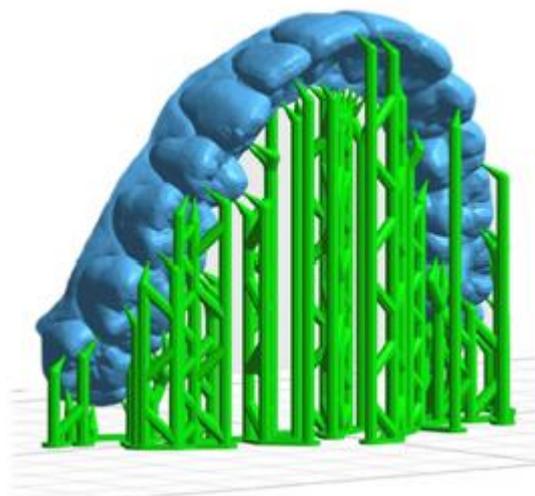


Figura 7. *Supporti necessari per la stampa diretta di allineatori [23].*

3.2.1. Possibili vantaggi

Gli allineatori stampati direttamente sono un'innovazione del campo dell'ortodonzia, infatti gli studi scientifici sono ancora pochi e riguardano prevalentemente la citotossicità dei materiali utilizzati, la precisione di adattamento e le proprietà meccaniche. È necessario effettuare degli studi in vivo per determinare se questa tecnica permetta effettivamente la produzione di allineatori migliori rispetto a quelli termoformati.

La ricerca scientifica dovrebbe essere condotta sia in vitro che in vivo prima che il materiale venga immesso sul mercato ortodontico; gli allineatori stampati direttamente devono essere perciò testati prima che questa tecnologia possa sostituire i tradizionali allineatori termoformati [23].

Tuttavia, gli allineatori stampati sembrano presentare alcuni vantaggi rispetto a quelli termoformati [23].

Teoricamente la stampa 3D diretta rende possibile la produzione di allineatori trasparenti con spessore personalizzato e soprattutto permette il controllo dello spessore dell'allineatore nelle diverse zone dell'arcata. Questo è molto importante perché non è solo il materiale scelto per la produzione ma anche lo spessore a determinare le proprietà meccaniche del materiale e l'entità della forza esercitata [17]. Gli allineatori termoformati, invece, hanno uno spessore inferiore dopo la procedura di termoformatura rispetto al foglio di plastica utilizzato inizialmente. Le proprietà fisiche dell'allineatore trasparente termoformato sono determinate dal processo di deformazione termica durante il quale possono verificarsi contrazione ed espansione del materiale, con conseguente differenza di spessore di ciascun dente [23].

Il processo di termoformatura determina quindi cambiamenti nelle prestazioni del materiale. Questa tecnica provoca alterazioni nello spessore, nella durezza e nella trasparenza dell'allineatore prodotto [16].

Uno dei vantaggi più evidenti è la riduzione delle fasi di produzione che permette di avere un flusso di lavoro più veloce; le fasi si riducono all'esportazione dei file dei modelli virtuali degli allineatori e alla successiva importazione nel software della stampante. La procedura post stampa prevede poi solo la rimozione dei supporti necessari durante il processo e la polimerizzazione UV. Si elimina così il processo di rimozione degli allineatori dai modelli che richiede molto tempo perché comprende rimozione, creazione di bordi adeguati e lucidatura, e la procedura risulta essere più semplice e pulita [23].

Inoltre, Kim et al. [24] hanno studiato l'accuratezza di adattamento degli allineatori stampati rispetto ai materiali disponibili in commercio utilizzati per produrre allineatori termoformati. Lo studio ha evidenziato una migliore precisione degli allineatori stampati rispetto ai due allineatori termoformati.

L'accuratezza dell'adattamento è una delle caratteristiche più importanti di un allineatore; essa, infatti, influisce sull'efficacia del risultato finale poiché un allineatore deve essere a contatto con i denti per poter esprimere al meglio tutto il suo potenziale meccanico.

Un altro potenziale vantaggio riguarda l'impatto ambientale. I modelli dentali in resina necessari per la produzione di allineatori con la tecnica della termoformatura non sono riciclabili; una soluzione futura potrebbe quindi essere utilizzare allineatori stampati con materiali che ne consentano il riciclo [23].

Va considerato però un altro aspetto importante, ovvero la variabilità dei risultati dovuta all'utilizzo di differenti stampanti 3D. Zinelis et al [25] hanno studiato l'effetto che diverse stampanti 3D hanno sulle proprietà meccaniche degli allineatori stampati direttamente. In questo studio sono stati stampati allineatori utilizzando diverse stampanti partendo dallo stesso file, selezionando gli stessi parametri, posizionando la piattaforma di stampa con la stessa inclinazione e seguendo la stessa procedura di polimerizzazione. Il risultato dello studio ha dimostrato come la stampa non sia una procedura coerente e stabile ma, al contrario, dipenda dalla stampante utilizzata.

4. Materiali utilizzati

La composizione del materiale utilizzato per la realizzazione di un allineatore è un fattore determinante poiché influisce sulle prestazioni cliniche dell'allineatore stesso [16]. Questa composizione, però, dipende strettamente dal processo di fabbricazione che si sceglie di utilizzare e che, come già spiegato nel capitolo precedente, può essere fondamentalmente suddiviso in due categorie: il metodo usato convenzionalmente, quindi la termoformatura sottovuoto grazie all'utilizzo di modelli e la stampa 3D diretta senza modelli fisici intermedi [17].

Il primo processo di produzione è ampiamente adottato sia a livello commerciale che clinico. Per produrre gli allineatori trasparenti attraverso il processo di termoformatura su modelli sono spesso utilizzati i materiali polimerici termoplastici [14].

4.1. Materiali polimerici

4.1.1. Polimeri termoplastici

I polimeri possono essere suddivisi in due gruppi principali in base al loro comportamento nel processo termico. Alcuni polimeri, classificati come “termoplastici”, si comportano come liquidi viscosi al riscaldamento e possono essere rilavorati quasi all'infinito. Alcuni esempi commerciali sono il polistirene, il polietilene e il polipropilene.

Altri polimeri, chiamati invece “termoindurenti” mantengono la loro forma definitiva dopo una prima fase di riscaldamento durante la sintesi o un successivo trattamento.

Per produrre allineatori trasparenti con il metodo classico della termoformatura vengono utilizzati polimeri termoplastici. I polimeri termoplastici possono essere classificati in base alla loro struttura molecolare in polimeri amorfi e polimeri semicristallini. I polimeri amorfi hanno strutture molecolari disposte in modo irregolare e caratterizzate da un basso grado di impacchettamento molecolare. I polimeri semicristallini, invece, contengono sia aree di catene uniformemente impacchettate, domini cristallini, sia aree disposte irregolarmente, regioni amorfe. In generale, i polimeri amorfi sono più morbidi, trasparenti, hanno un basso ritiro e una migliore resistenza agli urti. I polimeri semicristallini sono duri, opachi o traslucidi, hanno una buona resistenza chimica e un punto di fusione elevato [16].

Il materiale termoplastico comunemente utilizzato è il polietilene tereftalato modificato con glicole (PET-G); possono però essere adottati anche polipropilene (PP), policarbonato (PC), poliuretani termoplastici (TPU), etilene vinilacetato e molti altri materiali [26].

Vengono utilizzati materiali termoplastici perché le loro proprietà biomeccaniche giocano un ruolo fondamentale nelle prestazioni degli allineatori trasparenti e quindi nell'ottenimento del movimento ortodontico dei denti desiderato [18]. Queste proprietà includono elasticità, bassa durezza, resilienza, stabilità dimensionale, trasparenza, bassa citotossicità, elevata biocompatibilità e resistenza all'effetto della saliva e della temperatura che si verifica nel cavo orale [18].

Oggi sono disponibili sul mercato molti polimeri termoplastici, ma non tutti i materiali hanno le stesse caratteristiche chimiche prima e dopo l'usura [27]. In generale, durante l'utilizzo, si verificano una serie di fattori che possono alterare le proprietà del materiale, come stress masticatori e l'azione degli enzimi salivari [28, 14]. All'interno della cavità orale gli allineatori sono soggetti a umidità e a variazioni di temperatura che possono alterarne la forma e le proprietà nel tempo. Sono inoltre soggetti a forze continue e intermittenti dovute alle normali funzioni orali come masticare, parlare, deglutire e parafunzioni come stringere e digrignare [16].

Un'altra caratteristica che può influenzare le proprietà meccaniche e quindi anche le prestazioni del materiale è lo spessore [26]. Attualmente gli allineatori sono disponibili in diversi spessori che vanno da 0,50 mm a 1,5 mm [14].

Gli allineatori ortodontici trasparenti termoplastici, per essere efficaci, dovrebbero idealmente esercitare forze continue e controllate per produrre i movimenti dentali previsti [16].

Per ottenere il risultato desiderato, e quindi ottenere allineatori più performanti, una soluzione è quella di mescolare diversi tipi di polimeri come poliestere, poliuretano e polipropilene, così da migliorare le proprietà meccaniche e chimiche e quindi le prestazioni cliniche dell'allineatore finale [17].

Le miscele di poliestere, poliuretano e polipropilene vengono comunemente utilizzate nella produzione commerciale degli allineatori trasparenti. È importante il rapporto utilizzato per la miscelazione dei polimeri poiché influisce in modo significativo sulle caratteristiche della miscela polimerica finale.

Ad esempio, la miscela PETG/policarbonato (PC)/TPU in un rapporto di 70/10/20 permette di ottenere allineatori con migliori proprietà meccaniche rispetto ad altri rapporti di miscela

e che hanno dimostrato di produrre forze ortodontiche sufficienti e sostenibili rispetto ad altri prodotti commercializzati. Analogamente, un'altra miscela formata da PETG/PC2858 miscelato in un rapporto di 70/30, ha espresso la migliore combinazione di resistenza alla trazione, all'urto e all'allungamento a rottura [16, 17].

I sistemi di allineatori trasparenti sono prodotti in tutto il mondo da numerose aziende, compresi i marchi leader nei prodotti ortodontici, come visibile nella Tabella 4 [16].

Tabella 4. *Struttura chimica (molecolare) di alcuni allineatori ampiamente commercializzati [16].*

Aligner	Material	Manufacturer
Biolon	PET-G (Polyethylene terephthalate glycol)	Dreve dentamid GmbH, Unna, Germany
Duran	PET	Scheu dental, Iserlohn, Germany
EasyDU	PET (PFb/PFc)	BenQ Co., Taipei, Taiwan
F22	Polyurethane	Sweden-Martina, Due Carrare, PD, Italy
Invisalign	SmartTrack (multi-layer aromatic thermoplastic polyurethane)	Align Technology, Santa Clara, CA, United States
MaxFlex	TPU	Maxflex Co., Taipei, Taiwan
Nuvola	Polyethylene terephthalate glycol (PET-G)	GEO srl, Rome, RM, Italy
Spark	Trugen (multi-layer polyurethane)	Ormco Orange, CA, United States

Per la fabbricazione di allineatori trasparenti è bene utilizzare materiali termoplastici con un limite di snervamento elevato, elevata resistenza a trazione ed elevata tenacità. Un parametro molto importante è il modulo di elasticità o modulo di Young. Quest'ultimo è una misura della rigidità del materiale. Un materiale ideale per allineatori dovrebbe possedere una rigidità adeguata a esercitare le forze e i momenti necessari per ottenere i movimenti dentali pianificati. Quindi se il modulo è troppo elevato, l'allineatore risulta molto rigido e questo si traduce in difficoltà di posizionamento e rimozione da parte del

paziente, ma, se il materiale ha bassa rigidità quindi modulo basso, l'allineatore non è in grado di generare le forze adeguate [17].

Gli allineatori trasparenti assorbono meno energia, poiché si deformano in modo permanente sotto carichi moderati e pesanti e presentano una resilienza notevolmente inferiore rispetto ai fili per arcata metallici. Infatti, l'affollamento dentale che può essere risolto con un singolo filo in nichel-titanio, richiede più allineatori trasparenti per essere corretto. I fili per arcata metallici sono in grado di immagazzinare energia e di trasferirla ai denti per un certo periodo di tempo, subendo un affaticamento minimo [17].

I materiali per allineatori trasparenti sono, invece, materiali di natura "viscoelastica", con proprietà che quindi costituiscono una via di mezzo tra le proprietà dei materiali puramente viscosi e quelle dei materiali puramente elastici. Il loro comportamento può variare significativamente nel tempo sotto carico [16].

I materiali viscoelastici possono assorbire urti, vibrazioni e forze e questa natura consente all'allineatore di deformarsi e allungarsi e di generare le forze necessarie per il movimento programmato del dente quando l'allineatore viene applicato alla dentizione [17].

Uno dei fattori più cruciali per determinare l'efficienza di un allineatore trasparente è il rilassamento dello stress, ovvero quanto il carico per mantenere una deformazione costante diminuisce in funzione del tempo. Il rilassamento dello stress è fondamentalmente una misura del mantenimento di una forza costante, che è un fattore auspicabile in ortodonzia anche se i materiali per allineatori non sembrano garantirlo in modo eccellente.

La riduzione della forza osservata con gli allineatori trasparenti non dipende in modo lineare dal tempo, ma piuttosto è possibile osservare un drastico calo della forza nelle prime ore di utilizzo dell'allineatore, indicativo dell'affaticamento del materiale.

Questo processo di rilassamento dello stress è influenzato dall'effettiva composizione del materiale termoplastico, dalla temperatura della cavità orale, dall'entità della forza a cui è sottoposta una specifica parte dell'allineatore e dallo spessore del materiale utilizzato per la fabbricazione dell'allineatore [17].

Inoltre, le forze che gli allineatori applicano devono rientrare nei limiti biologici che i denti umani possono tollerare.

I fattori sopra evidenziati riassumono le caratteristiche principali degli allineatori trasparenti in termini di erogazione della forza, entità, costanza e decadimento.

Riassumendo, le caratteristiche degli allineatori sono le seguenti:

- applicano forze ridotte;
- funzionano meglio con attivazioni minori;
- presentano una bassa flessibilità;
- subiscono un rapido decadimento della forza [17].

Tabella 5. *Proprietà meccaniche dei materiali polimerici termoplastici.*

Proprietà meccaniche	PET	PETG	Polipropilene	Policarbonato
Resistenza a trazione [MPa]	80	51.5	30	70
Modulo elastico a trazione [GPa]	3,2	2,2	1,4	2,3
Resistenza alla flessione [MPa]	125	80	-	>95
Modulo elastico a flessione [GPa]	2.6	-	-	2,6
Allungamento a rottura [%]	20	>100	70	100
Durezza shore D	81	-	70	-
Riferimenti	[29]	[30]	[31]	[32]

4.1.2. PETG

Il PET-G è un copolimero amorfo del PET (polietilene tereftalato), dove il termine G indica il gruppo glicolico aggiuntivo [14]. La differenza tra i due è che il PET-G non subisce la cristallizzazione indotta dalla deformazione, indipendentemente dal tasso di deformazione e dalle temperature raggiunte durante la lavorazione [33].

Questo materiale è ampiamente utilizzato nella produzione di allineatori trasparenti grazie alle sue eccellenti proprietà meccaniche e ottiche [16]. In particolare, è un materiale molto resistente agli urti ed ha un'eccellente resistenza chimica e trasparenza [34]. Alcuni studi hanno dimostrato che il materiale ha buona stabilità a contatto con l'ambiente [16].

4.2. Resine per stampa 3D diretta

Gli allineatori stampati direttamente possono superare i limiti legati al processo di termoformatura come l'alterazione delle caratteristiche meccaniche, dimensionali ed estetiche del materiale offrendo una migliore accuratezza e precisione geometrica, una migliore vestibilità, una maggiore efficacia e resistenza meccanica [16].

Diversi studi hanno analizzato le proprietà meccaniche e biologiche delle resine adatte per la stampa 3D di allineatori, però, attualmente non esistono materiali stampabili che soddisfino gli standard di compatibilità e traslucenza e che abbiano proprietà meccaniche adeguate, ad eccezione di Tera Harz TC-85 (Graphy, Seoul, Corea del Sud).

Questo materiale è stato approvato dalla Korea Food and Drug Administration (KFDA), dalla Food and Drug Administration (FDA) e dalla Commissione Europea (CE) [17].

4.2.1. Tera Harz TC-85

A causa di problemi legati al brevetto non è possibile accertare con precisione la struttura chimica del materiale ma i risultati dell'analisi spettroscopica all'infrarosso a riflettanza totale attenuata e a trasformata di Fourier hanno indicato che il materiale è un polimero vinil-estere-uretanico alifatico, probabilmente reticolato con una funzionalizzazione metacrilata. [34].

Tuttavia, le proprietà meccaniche del nuovo materiale devono ancora essere valutate per le applicazioni cliniche.

Le proprietà meccaniche e il comportamento dei materiali per la stampa 3D composti da polimeri reticolati dovrebbero essere diversi rispetto ai materiali termoplastici convenzionali composti da polimeri non reticolati utilizzati per la termoformatura.

Tera Harz TC-85 è un materiale fotopolimerico biocompatibile ed è disponibile in due colori. TC-85DAC è completamente trasparente, mentre TC-85DAW è bianco e garantisce durata ed estetica. Inoltre, Graphy Inc. sostiene di poter fornire colori personalizzati per soddisfare esigenze specifiche. L'allineatore diretto Tera Harz può essere stampato in 3D direttamente con una stampante 3D [17].

Tabella 6. *Proprietà meccaniche resina a memoria di forma TC-85 [35].*

	Resistenza a trazione [MPa]	Modulo elastico a trazione [GPa]	Resistenza a flessione [MPa]	Allungamento a rottura [%]	Durezza shore D
TC-85	-	≥ 1.5	≥ 65	-	≥ 95

4.2.2. Polimeri a memoria di forma

Si definiscono materiali intelligenti o materiali responsivi agli stimoli quei materiali che sono in grado di rispondere in modo appropriato a vari stimoli e generare quindi una risposta prevedibile e ripetibile.

Un sottoinsieme di questi materiali è costituito dai polimeri a memoria di forma (SMP), noti anche come polimeri a movimento attivo. Il meccanismo di memoria di forma degli SMP si basa sulla presenza di una rete polimerica stabile che determina la forma originale del materiale e una rete polimerica reversibile che consente al materiale di trasformarsi in una forma alterata o temporanea [17, 36]. Sono quindi presenti due domini che possiedono due diverse temperature di transizione vetrosa, uno è il segmento elastico e l'altro è il segmento di transizione. Il segmento elastico mantiene sempre un'elevata elasticità, mentre il segmento di transizione cambia la sua rigidità in modo significativo in presenza dello stimolo giusto.

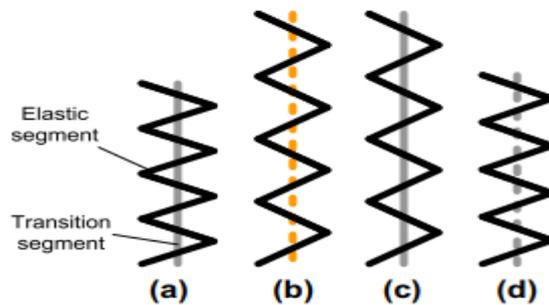


Figura 8. (a) Configurazione originale in cui i segmenti elastici e di transizione sono aggrovigliati tra loro; (b) stiramento ad alte temperature (il segmento di transizione diventa morbido e può essere facilmente deformato); (c) forma temporanea a basse temperature (il segmento di transizione diventa duro a basse temperature); (d) recupero della forma [36].

L'effetto di memoria di forma si riferisce quindi al fenomeno per cui un materiale, dopo essere stato gravemente e quasi plasticamente distorto, è in grado di recuperare la sua forma originale alla presenza di uno stimolo adeguato [37].

La transizione vetrosa e la fusione sono le due transizioni più comunemente usate nei polimeri per lo SME (effetto della memoria di forma) termoresponsivo.

I polimeri a memoria di forma presentano importanti vantaggi rispetto alle leghe a memoria di forma. In particolare, hanno densità inferiore e costi di fabbricazione e lavorazione inferiori; la deformazione recuperabile è superiore; la temperatura di recupero della forma può essere facilmente modificata in un ampio intervallo; molti SMP hanno un'eccellente stabilità chimica, biocompatibilità e persino biodegradabilità; inoltre un SMP può essere attivato da più di un tipo di stimolo [36].

Tera Harz TC-85 è una resina a memoria di forma fotopolimerizzabile.

Nella ricerca volta a migliorare sempre di più i materiali utilizzati nella produzione di allineatori e le conseguenti proprietà meccaniche, una nuova idea è rappresentata dai polimeri a memoria di forma.

Alcuni studi hanno ipotizzato che i materiali polimerici a memoria di forma potrebbero essere utilizzati per la fabbricazione di allineatori ortodontici. In particolare, questa caratteristica potrebbe consentire la fabbricazione di un singolo allineatore che cambia forma e che potrebbe essere in grado di sostituire fino a tre allineatori convenzionali successivi [17]. Questo permetterebbe quindi di ridurre il numero di allineatori necessari per ogni trattamento e quindi anche i costi.

5. Materiali e metodi

5.1. Preparazione provini

La prima parte del progetto ha riguardato la preparazione dei provini da testare. Per effettuare le prove a flessione la geometria tipicamente utilizzata è quella del parallelepipedo. Per realizzare un test a trazione occorre invece scegliere una geometria del provino adatta in modo che la rottura avvenga circa a metà e non in corrispondenza dell'afferraggio. Questa forma è detta a osso di cane, ovvero provini caratterizzati da un tratto utile sul quale viene misurato l'allungamento, raccordato alle estremità da due teste di dimensioni maggiori perché, dato che sono le zone più sollecitate, potrebbero essere un punto di innesco di frattura; in questo studio sono stati utilizzati provini a osso di cane a sezione piana.

Per quanto riguarda la resina a memoria di forma i campioni sono stati realizzati attraverso una stampante 3D a partire da un file STL. In particolare, le prove di flessione a tre punti sono state eseguite su cinque provini a forma di parallelepipedo di larghezza 12 mm e spessore 1 mm. Per il test a trazione, invece, sono stati utilizzati provini con forma a osso di cane a sezione piana di due misure differenti (cinque provini piccoli e tre grandi): larghezza 10 mm in corrispondenza delle estremità e 5 mm nella parte centrale, lunghezza 40 mm per i provini piccoli; larghezza 20 mm in corrispondenza delle estremità e 10 mm nella parte centrale, lunghezza 90 mm per i provini grandi. Poiché i provini ottenuti non risultavano essere perfettamente omogenei nello spessore è stato effettuato un calcolo dell'area in più sezioni di ogni provino al fine di calcolare poi uno spessore medio. Lo spessore misurato per i provini destinati ai test a trazione è risultato essere: 2.15 mm per il primo provino piccolo e 2.10 mm per tutti gli altri provini piccoli; 2.25 mm per il primo provino grande e 2.20 mm per il secondo e il terzo. Per i provini per i test a flessione invece 1.1 mm per il primo e il terzo provino e 1.05 per tutti gli altri.

Per analizzare le proprietà del PETG e PETG termoformato, le prove di flessione a tre punti sono state eseguite su 10 provini sempre a forma di parallelepipedo di larghezza 12 mm, lunghezza 40 mm, ricavati a partire da fogli quadrati di materiale di spessore 1 mm.

Per il test a trazione i provini a forma di osso di cane sono stati realizzati a partire da fogli piani quadrati di spessore 1 mm grazie all'utilizzo di una fustellatrice. I provini ottenuti,

sei provini grandi e sette piccoli, sono stati realizzati con le stesse dimensioni di quelli stampati con la resina TC-85.

Anche per preparare i provini di PETG termoformato da testare a trazione sono stati effettuati gli stessi passaggi. Con la fustellatrice sono stati realizzati cinque provini grandi e otto piccoli a partire da fogli di PETG precedentemente sottoposti al processo di termoformatura. Lo spessore in seguito al processo è risultato essere 0.75 mm.

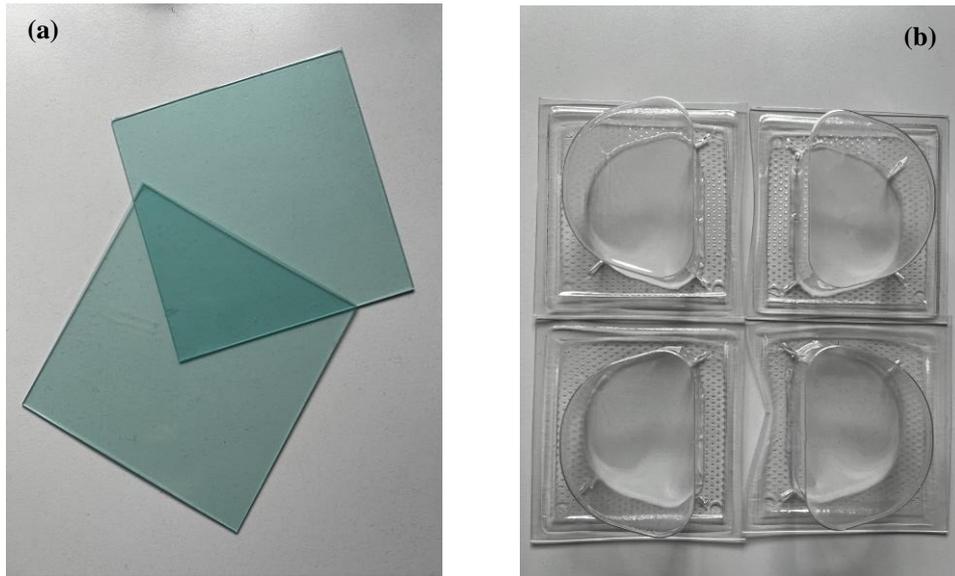


Figura 9. Fogli di PETG (a) e fogli di PETG dopo il processo di termoformatura (b).



Figura 10. Campioni di PETG e PETG termoformato dopo aver ricavato i provini con la fustellatrice (a) e campioni di TC-85 stampati (b).

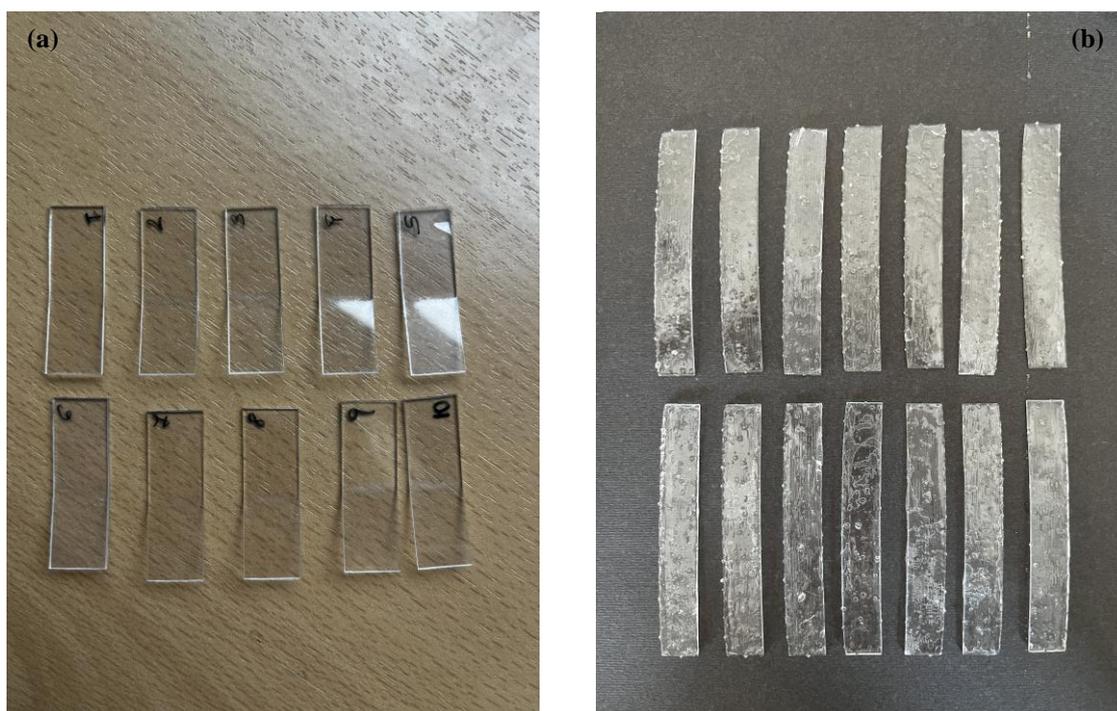


Figura 11. *Provini per test a flessione di PETG (a) e TC-85 (b).*

5.2. Prove meccaniche statiche

Per valutare le proprietà della resina a memoria di forma TC-85DAC e compararle con quelle del PETG sono state eseguite in laboratorio alcune prove meccaniche statiche. In particolare, sono state eseguite prove di flessione a tre punti e prove di trazione. Per questo studio è stata utilizzata una macchina universale per prove meccaniche (UTM). Questa macchina è definita universale perché può essere utilizzata per eseguire più prove statiche, tra cui prove di trazione, compressione e le prove di flessione. Un UTM tradizionale è composto da cella di carico, traversa, estensimetro, afferraggi, elettronica e sistema di azionamento ed è gestito da un software utilizzato per configurare la macchina e impostare i parametri di prova definiti dagli standard internazionali. In particolare, per questa analisi è stata utilizzata la macchina Zwick/Roell Z050, una macchina a doppia colonna, come è visibile nella Figura 12, che supporta una forza massima di prova di 50 kN ed è dotata di una cella di carico da 1 kN. La macchina dispone di due sensori: la cella di carico per misurare la forza applicata e un sensore per misurare lo spostamento verticale della traversa mobile.

Le prove a flessione a tre punti sono test in cui il provino viene appoggiato su due supporti laterali e viene sollecitato con un carico in corrispondenza dell'asse centrale. Le prove di flessione comprendono sia prove di trazione che di compressione, poiché la parte superiore del provino è sottoposta a compressione, mentre la parte inferiore è sottoposta a trazione. Le prove a trazione sono, invece, prove eseguite attraverso l'applicazione di un carico monoassiale crescente, in cui le due estremità del provino vengono bloccate alla parte fissa e alla traversa mobile della macchina. Il movimento della traversa mobile genera poi la deformazione del provino. Sono presenti, inoltre, gli estensimetri che permettono di misurare la variazione di lunghezza del provino. Entrambe le prove terminano quando nel provino si verifica una frattura o nel momento in cui vengono raggiunti valori di carico o deformazione preimpostati tramite il software. Per il test di trazione è necessario bloccare il campione attraverso degli afferraggi. In questo caso sono state utilizzate delle morse autoserranti, ovvero morse di forma cuneiforme che all'aumentare della trazione tendono a stringere maggiormente il campione permettendo un miglior fissaggio di quest'ultimo al sistema di blocco.

Sono stati eseguiti test su diversi campioni di TC-85, di PETG e di PETG termoformato. Attraverso il software di prova testXpert sono state inserite le dimensioni dei vari provini utilizzati per le prove come descritto precedentemente.

Sempre attraverso il software sono stati impostati i parametri della prova ed è stato possibile visualizzare in tempo reale il test in corso. I parametri di prova scelti per questi test meccanici statici vengono riassunti nella Tabella 7 e nella Tabella 8. Il precarico rappresenta il carico minimo al di sopra del quale si inizia ad acquisire il dato, mentre la velocità di precarico è la velocità con cui inizia la prova fino al raggiungimento del precarico. La velocità di modulo a trazione/flessione è, invece, la velocità nella regione iniziale, ovvero quella in cui il materiale si comporta come un solido elastico; poiché il software non conosce il limite di elasticità del materiale è stato impostato al 1% della deformazione. È opportuno che in questo tratto la velocità della prova sia inferiore perché è necessario acquisire più punti così da ottenere una risoluzione più elevata e poter calcolare più facilmente il modulo elastico del materiale. Le prove procedono quindi da zero al punto di snervamento con velocità bassa e poi, in alcuni casi la velocità rimane invariata fino alla fine del test, in altri la velocità aumenta e la prova prosegue con velocità corrispondente al parametro definito come velocità di prova. Per i test a flessione è stata impostata una distanza tra i supporti pari a 30 mm. Per i test a trazione è stata inoltre

impostata la distanza tra gli estensimetri; in particolare 10 mm per i test sui provini piccoli e 30 mm per i test sui provini più grandi.

Tabella 7. Parametri test meccanici statici TC-85.

Tipo di prova	Provino	Precarico [N]	Velocità di precarico [mm/min]	Velocità modulo a trazione/flessione [mm/min]	Velocità di prova [mm/min]
Test a flessione	Tutti	0.5	5	1	1
Test a trazione	Provini piccoli da 1 a 3; tutti i provini grandi	1	1	1	10
	Provini piccoli da 4 a 5	1	1	1	1

Tabella 8. Parametri test meccanici statici PETG e PETG termoformato.

Tipo di prova	Precarico [N]	Velocità di precarico [mm/min]	Velocità modulo a trazione/flessione [mm/min]	Velocità di prova [mm/min]
Test a flessione	0.5	5	1	5
Test a trazione	1	1	1	10

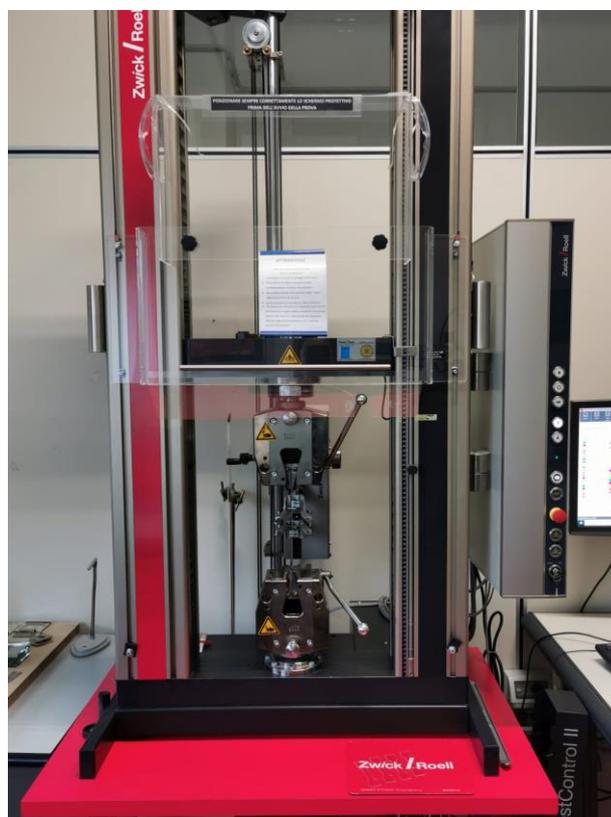


Figura 12. Macchina universale per test meccanici statici Zwick/Roell Z050 usata per i test a trazione e a flessione.

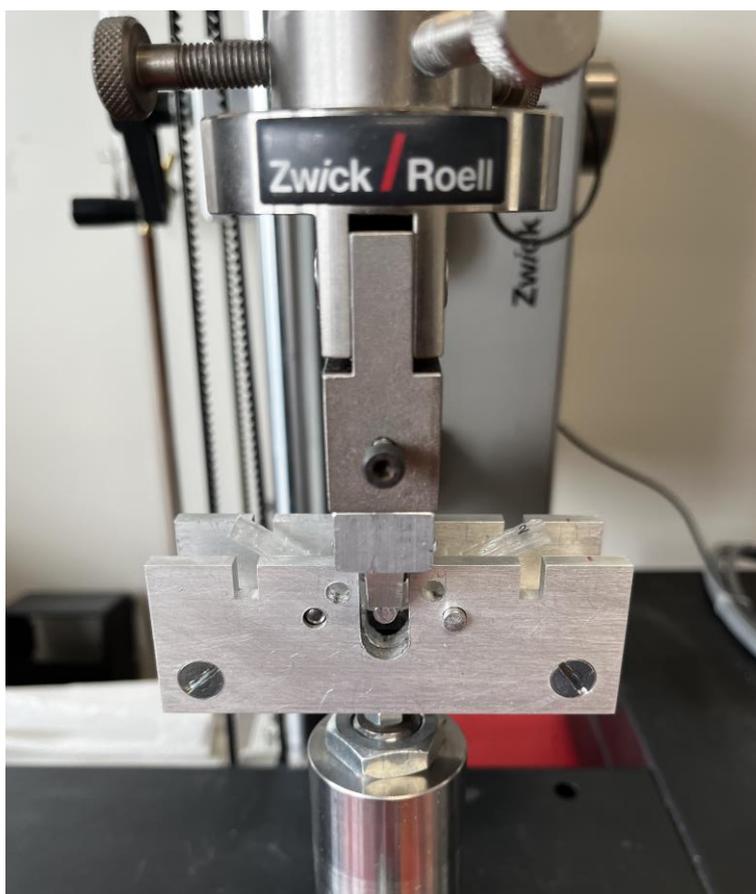


Figura 13. Esempio di prova di flessione a tre punti eseguita su un campione stampato.

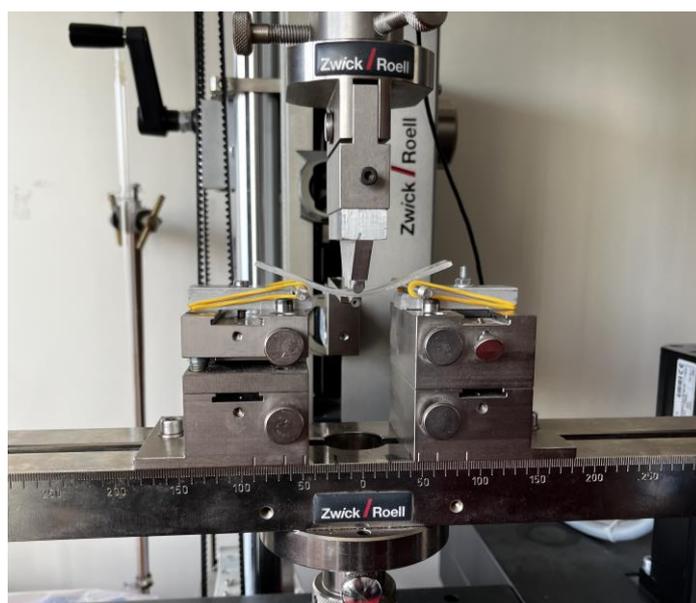


Figura 14. Esempio di prova di flessione a tre punti eseguita su un campione di PETG.

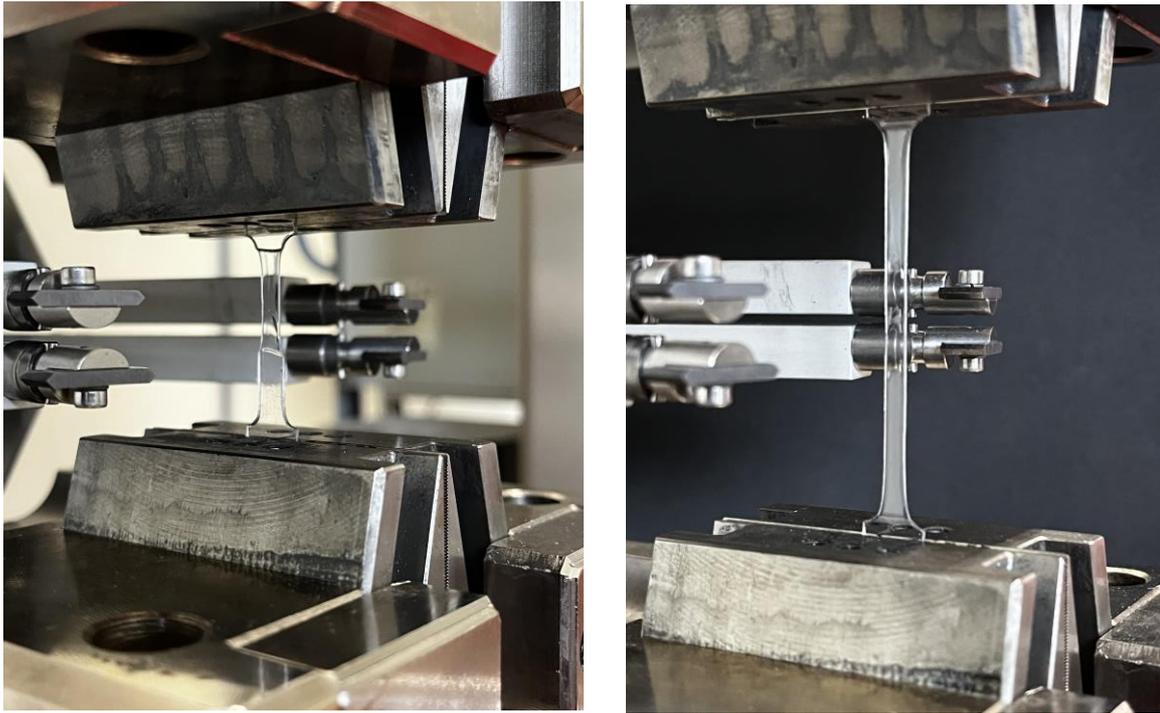


Figura 15. Esempio di prova a trazione eseguita su un campione di PETG.



Figura 16. Esempio di prova a trazione eseguita su un campione di TC-85.

Una volta terminato il test, i dati sono stati elaborati grazie all'utilizzo del software Matlab. Il risultato tipico di una prova meccanica statica è la curva sforzo-deformazione. Si ottiene quindi una curva sforzo-deformazione per ogni provino testato sia a flessione che a trazione. Quando un carico agisce su un materiale produce sollecitazioni e conseguenti deformazioni nel materiale; si definisce lo sforzo come la forza applicata su una determinata superficie ed è espresso in $[N/m^2]$, la deformazione è invece una grandezza adimensionale data dal rapporto tra due lunghezze, quindi dalla variazione di lunghezza fratto la lunghezza a riposo $[\Delta L/L_0]$. La forza crescente applicata e la deformazione prodotta vengono registrate dal software fino a quando non si verifica una frattura o finché il carico o la deformazione raggiungono un valore predeterminato, e il risultato è un grafico X-Y, dove sulle ascisse è riportata la deformazione in percentuale e sulle ordinate la sollecitazione in MPa. La curva sforzo-deformazione è quindi un grafico che mostra la variazione della sollecitazione all'aumentare della deformazione.

Per un materiale duttile la forma tipica è la seguente: un primo tratto rettilineo definisce la regione elastica del materiale in cui il rapporto tra sforzo e deformazione è lineare; alla fine di questo tratto rettilineo è presente il punto di snervamento, cioè una zona di transizione dalla regione elastica a quella plastica, che è caratterizzata da un appiattimento della curva in cui la deformazione aumenta a un ritmo più veloce dello sforzo; segue poi un tratto caratterizzato da deformazione plastica fino a una possibile frattura del materiale. Nei materiali fragili invece non è presente il tratto di deformazione plastica.

Da una curva sforzo-deformazione è possibile quindi ottenere importanti informazioni relative alle proprietà meccaniche del materiale e quindi diversi parametri, tra cui il modulo elastico a flessione/trazione e la resistenza alla flessione/trazione del materiale per valutarne l'elasticità, indicazioni sul comportamento duttile o fragile del materiale o la riproducibilità.

5.3. Prove a trazione a 37°C

Per simulare al meglio le condizioni di utilizzo degli allineatori sono state ripetute le prove di trazione mantenendo il campione ad una temperatura di 37°C durante lo svolgimento dei test. Per poterlo fare è stato ideato un sistema che permette al macchinario di svolgere liberamente la prova ma allo stesso tempo rende l'ambiente intorno al provino termostato. È stato utilizzato un tubo di rame avvolto in un numero di spire opportunamente calcolato

così da garantire il riscaldamento del provino durante tutto l'allungamento conseguente al test di trazione. Il tubo è stato collegato alla traversa mobile della macchina universale così da seguirne il movimento durante la prova. Il raggiungimento della temperatura desiderata, ovvero quella presente all'interno del cavo orale, è stato possibile grazie ad un termostato che controlla la temperatura del liquido che viene fatto circolare all'interno del tubo. È stata inoltre utilizzata una termocoppia posizionata in corrispondenza del campione per verificare istante per istante che la temperatura fosse corretta. Tutto il sistema è stato poi rivestito con un pannello di materiale isolante.

Prima di iniziare le prove sui materiali di interesse è stata effettuata una verifica sul macchinario. Impostando diverse temperature nel termostato in un range di valori dai 35°C ai 90°C sono stati raccolti i dati relativi alle temperature che effettivamente si verificavano in corrispondenza della zona tra gli afferraggi con due diverse termocoppie e in due diversi istanti, appena raggiunto il valore impostato nel termostato e dopo aver lasciato la temperatura selezionata per alcuni minuti. A partire dai dati, grazie ad una regressione lineare, è stato possibile identificare la temperatura corretta da impostare per far sì che la prova si svolgesse effettivamente a 37°C.

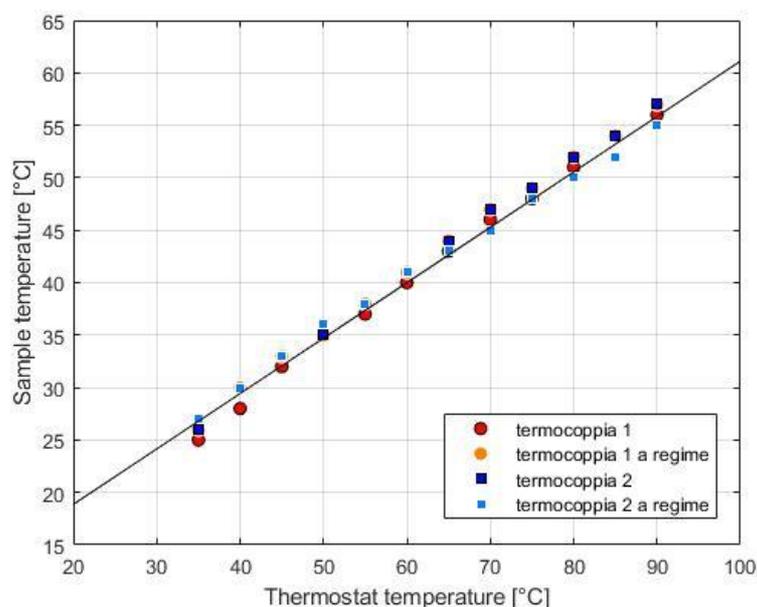


Figura 17. *Regressione lineare temperatura.*

Sono state quindi svolte le prove a trazione utilizzando provini dei tre diversi materiali con le stesse dimensioni di quelli utilizzati per le prove a temperatura ambiente, quindi provini

di due diverse dimensioni. In particolare, sono stati ricavati a partire da fogli di PETG, sei provini piccoli e sei grandi di spessore 1 mm grazie all'utilizzo della fustellatrice. Sempre con l'utilizzo della fustellatrice sono stati ricavati sei provini grandi e cinque piccoli a partire da fogli di PETG precedentemente sottoposti a termoformatura; gli spessori di questi provini risultavano essere 0.7 mm per tutti i provini e 0.75 mm per il quarto e il quinto, provino grande e il terzo e quinto provino piccolo. Infine, sono stati stampati sei provini grandi e sette piccoli con la resina TC-85. Anche in questo caso, a causa della non omogeneità dello spessore è stato effettuato un calcolo dell'area in più sezioni di ogni provino al fine di calcolare poi uno spessore medio. Lo spessore misurato è risultato essere per i provini grandi: 2.5 mm, 2.3 mm, 2.05 mm, 2.00 mm, 2.05 mm, 1.95 mm. Per i provini piccoli: 2.25 mm, 2.25 mm, 1.85 mm, 1.90 mm, 2.00 mm, 2.00 mm, 2.00 mm.

Sempre attraverso il software di prova testXpert sono state inserite le dimensioni dei vari provini utilizzati per le prove come descritto precedentemente, e sono stati impostati gli stessi parametri pre-prova e di prova utilizzati precedentemente per le prove effettuate a temperatura ambiente e riassunti nella Tabella 7 e Tabella 8.

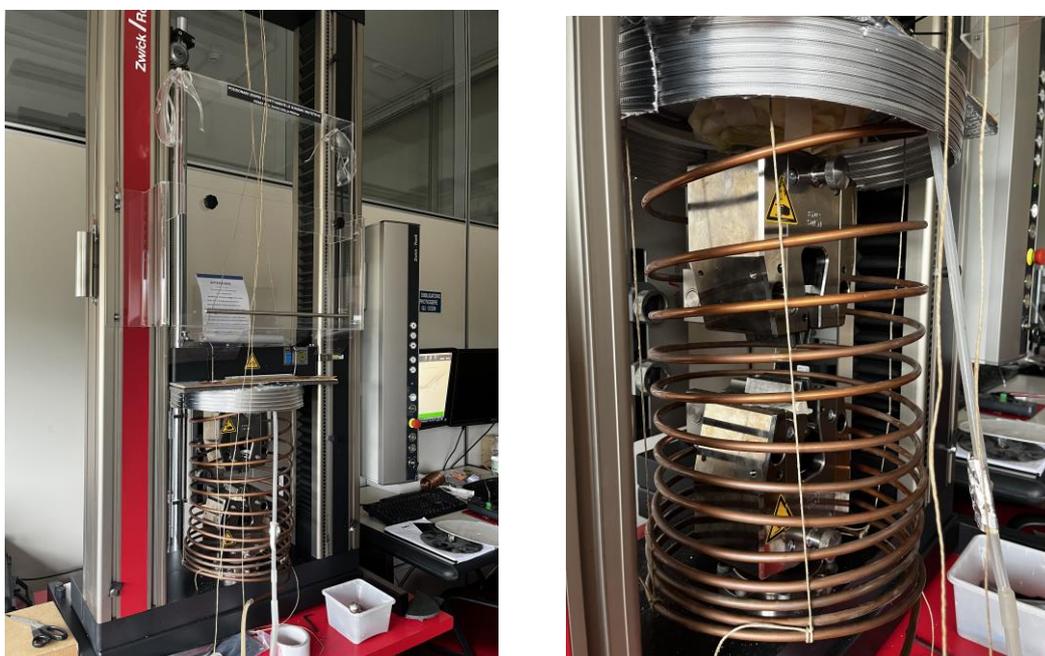


Figura 18. Sistema per mantenere la temperatura a 37°C durante lo svolgimento delle prove a trazione.



Figura 19. *Sistema con copertura isolante.*

5.4. Prove a flessione a 37°C

Anche per quanto riguarda i test a flessione è stato scelto di ripeterli mantenendo la temperatura a 37°C per simulare al meglio le condizioni di utilizzo degli allineatori. Il sistema utilizzato è simile a quello precedentemente adottato per svolgere i test a trazione come descritto nel paragrafo precedente. È stato aggiunto un cilindro centrale rivestito di materiale isolante per proteggere la cella di carico dal calore e far sì che si creasse una zona che non risentisse dell'aumento della temperatura.

Anche in questo caso sono state svolte le prove a flessione utilizzando provini dei tre diversi materiali con le stesse dimensioni di quelli utilizzati per le prove a temperatura ambiente.

In particolare, sono stati ricavati a partire da fogli di PETG e da PETG termoformato di spessore 1 mm, dieci provini di larghezza 12 mm e lunghezza 40 mm. Sono stati poi stampati cinque provini di TC-85 sempre di larghezza 12 mm e lunghezza 80 mm. Anche in questo caso è stato misurato lo spessore medio che è risultato essere 1.05 mm per il terzo e il quarto provino e 1 mm per tutti gli altri.

Sempre attraverso il software di prova testXpert sono state inserite le dimensioni dei vari provini utilizzati per le prove come descritto precedentemente, e sono stati impostati gli stessi parametri pre-prova e di prova utilizzati precedentemente per le prove effettuate a temperatura ambiente e riassunti nella Tabella 7 e Tabella 8.

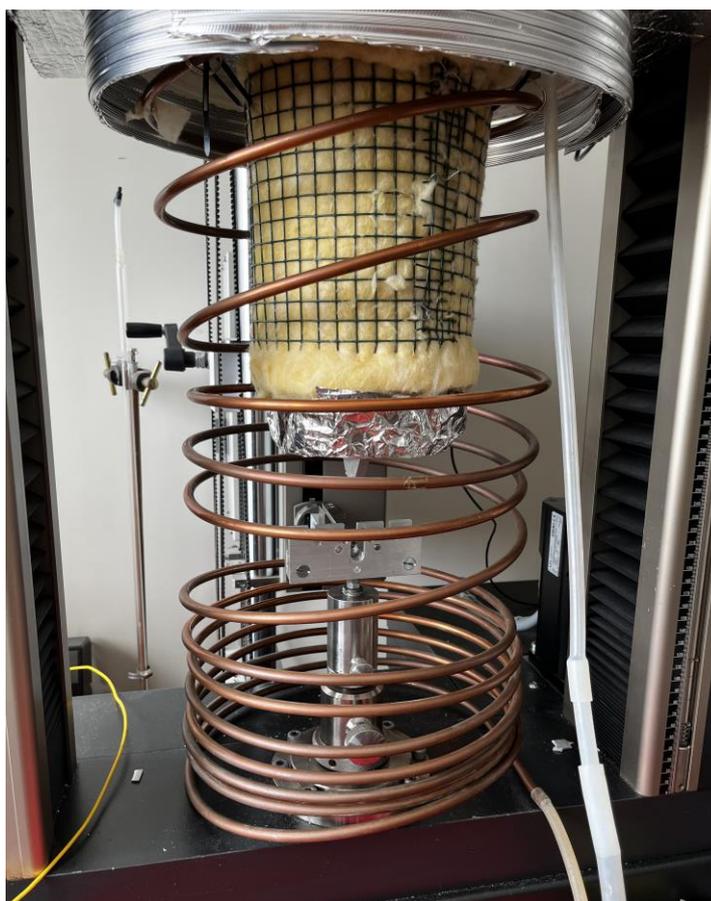


Figura 20. Sistema per mantenere la temperatura a 37°C durante lo svolgimento delle prove a flessione.

5.5. Test di Creep

Dopo aver effettuato le prove meccaniche a trazione e a flessione è stato scelto di approfondire l'analisi effettuando dei test di creep.

Il test di creep permette, infatti, di valutare il comportamento nel tempo, ovvero come varia la deformazione se si sottopone il materiale ad un carico costante. Lo stress viene mantenuto costante per un certo intervallo temporale e si valuta la risposta nel tempo della deformazione.

Per effettuare il test di creep è stato organizzato un set up che comprende la realizzazione di tre prove contemporaneamente.

È stato utilizzato un bagno termostatico, ovvero un contenitore riempito con acqua che permette di mantenere i campioni a temperatura costante. Sono state effettuate diverse prove per scegliere la temperatura da impostare affinché il provino durante il test fosse effettivamente ad una temperatura di 37°C.

Per effettuare questo test è necessario calcolare lo stress a cui sottoporre il materiale nel tempo. Per farlo sono stati osservati i risultati relativi alle prove a flessione fatte precedentemente al fine di ottenere il carico massimo del materiale. In particolare, nel caso del PETG e del PETG termoformato il carico massimo è risultato essere rispettivamente di circa 20 N e di 8 N; per il test è stato scelto di procedere imponendo l'80% di questi valori, ovvero circa 16 N e 6 N. Nel caso del TC-85 il carico massimo è invece inferiore, circa 1.2 N, per cui il valore che è stato utilizzato è 1 N.

Per alcuni provini è stato scelto, invece, di utilizzare un carico che simulasse al meglio quello presente in bocca durante l'utilizzo di un allineatore, quindi circa 1 N. Per il TC-85, quindi, non c'è differenza ma per gli altri materiali il carico è diminuito notevolmente.

Per misurare la deformazione nei diversi istanti temporali sono stati utilizzati dei comparatori, ovvero strumenti che leggono lo spostamento di un'asta mobile che scorre all'interno di una guida. Per ottenere i valori corretti di carico a seconda del materiale testato sono stati aggiunti dei pesi applicando una base forata all'estremità superiore dei comparatori.

Per valutare la deformazione nel tempo sono stati recuperati i dati relativi alla deformazione del campione a diversi istanti temporali. In particolare, per i primi 10 minuti ogni minuto, poi dopo 10 minuti per quattro volte, poi dopo 20 minuti, dopo 30 minuti e

dopo un'ora. In seguito, si è proseguito per 7 giorni recuperando i valori della deformazione una volta al mattino e una alla sera.

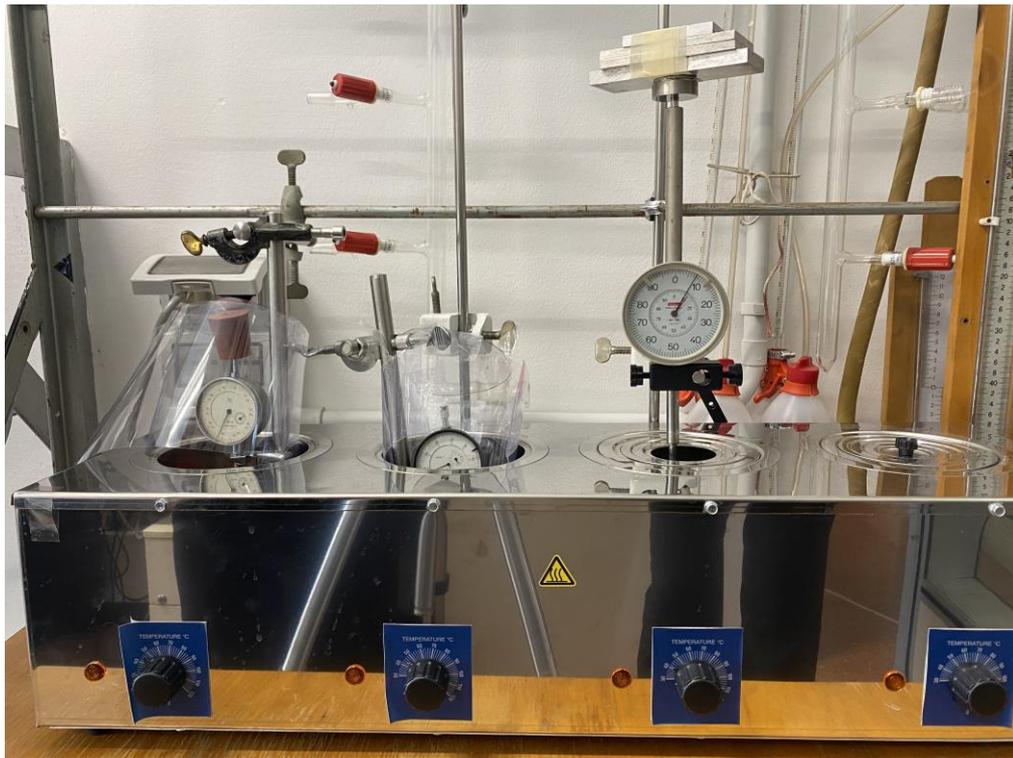


Figura 21. *Set up sperimentale test di creep a 37°C.*

5.6. Analisi termica

La DSC, calorimetria a scansione differenziale, è un metodo termico nel quale viene misurata, in funzione della temperatura del campione, la differenza tra i flussi termici nella sostanza ed in un riferimento mentre entrambi sono sottoposti ad un programma controllato di temperatura. Esiste la DSC a compensazione di potenza e la DSC a flusso di calore. In questo studio è stato utilizzato il secondo metodo ma entrambi forniscono la velocità del flusso di calore in relazione alla temperatura.

In particolare, per questa analisi è stata utilizzata la macchina Calvet C80. Il calorimetro in questione è costituito da un'unità cilindrica che isola il materiale di cui si vogliono analizzare le caratteristiche termiche dall'ambiente esterno. All'interno dell'unità cilindrica vi sono due cavità, una di riferimento e una di misura contenenti rispettivamente la cella di riferimento e quella di misura. In questo calorimetro, inoltre, entrambe le celle sono completamente circondate da una serie di termocoppie che consentono di misurare tutto il calore. Nel calorimetro, quindi, il calore fluisce nel campione e nel riferimento attraverso una piattaforma termoelettrica riscaldata elettricamente e la differenza tra i flussi di calore del campione e del riferimento viene misurata dalle termocoppie.

Nella cella di riferimento è possibile inserire materiale inerte ma in questo caso è stato scelto di lasciarla vuota.

Sono stati testati i tre materiali in questione, ovvero PETG, PETG termoformato e TC-85. Sono stati ricavati dei piccoli pezzi di materiale, in particolare 151 mg di PETG, 151 mg di PETG termoformato e 151 mg di TC-85. Le prove sono state poi ripetute aumentando la quantità di materiale (500 mg) al fine di ottenere un grafico più chiaro.

Il materiale da analizzare è stato inserito nella cella di misura, mentre la cella di riferimento è stata lasciata vuota. Sono stati poi inseriti i parametri di prova, in particolare tutte le prove sono state fatte partire da 35°C, il calorimetro ha iniziato a scaldare fino a raggiungere i 250°C e, una volta raggiunti, ricava la curva di ritorno fino a raggiungere nuovamente i 35°C.

I dati vengono poi visualizzati attraverso il software SETSOFT 2000 che permette di osservare l'andamento nel tempo del flusso termico e della temperatura oppure il flusso termico in funzione della temperatura. Una volta esportati i dati sono stati elaborati attraverso l'utilizzo del software Matlab al fine di ottenere dei grafici più chiari.



Figura 22. *Calorimetro Calvet C80 (a) e celle di riferimento e di misura (b).*

5.7. Verifica precisione di stampa

Infine, l'ultima parte del lavoro riguarda la valutazione della precisione di due diverse stampanti 3D. In particolare in questo lavoro di tesi sono stati effettuati i test relativi alla prima stampante, in seguito il lavoro procederà con i test sulla seconda. Per effettuare questa valutazione è stato inizialmente creato un file STL per stampare campioni di una forma particolare che permettesse di valutare la precisione della macchina lungo tutti gli assi.

I campioni ottenuti utilizzando la prima stampante sono cinque. Questi cinque campioni sono stati misurati con un calibro per più volte al fine di ottenere una misura il più accurata possibile.

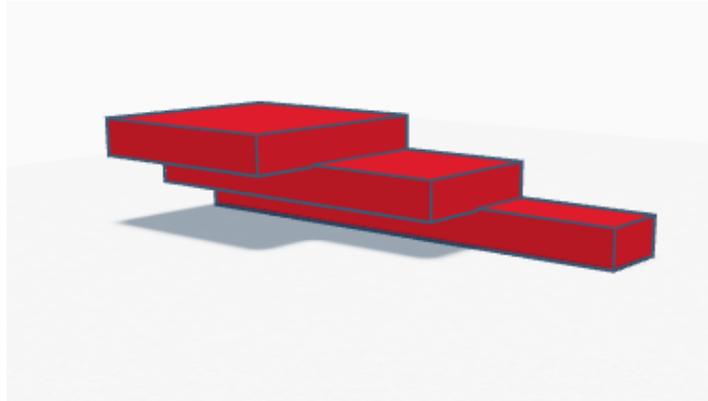


Figura 23. *File STL per stampa provini.*

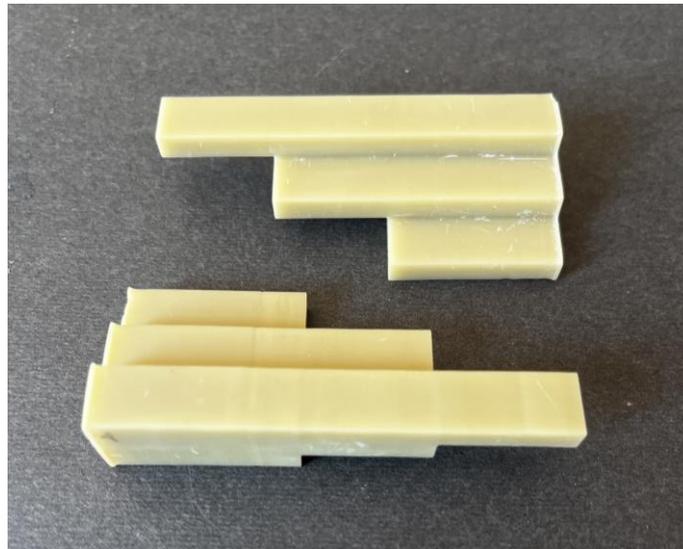


Figura 24. *Provini per valutare precisione di stampa.*

In seguito, sono stati effettuati dei test a trazione e a flessione su provini stampati sempre dalla stessa stampante.

In particolare, sono stati stampati cinque provini piccoli e cinque grandi ad osso di cane da testare a trazione e sei provini a parallelepipedo per i test a flessione.

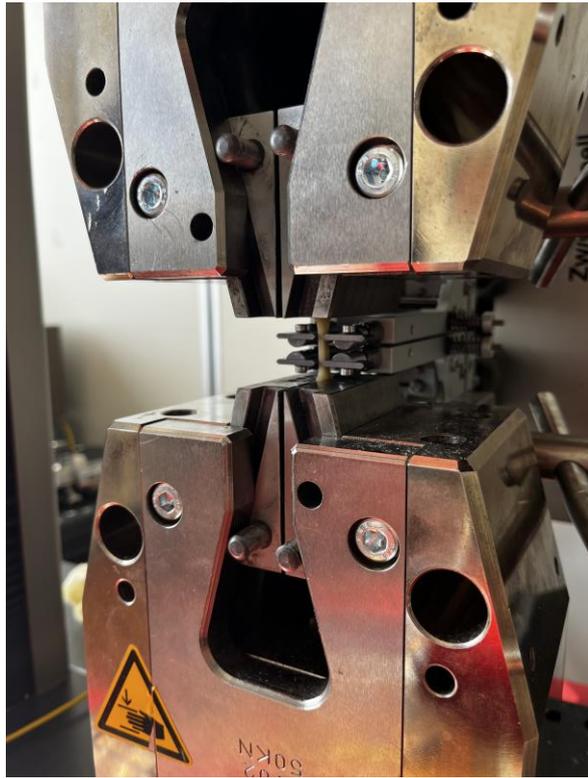


Figura 25. Esempio test a trazione su campione stampato.

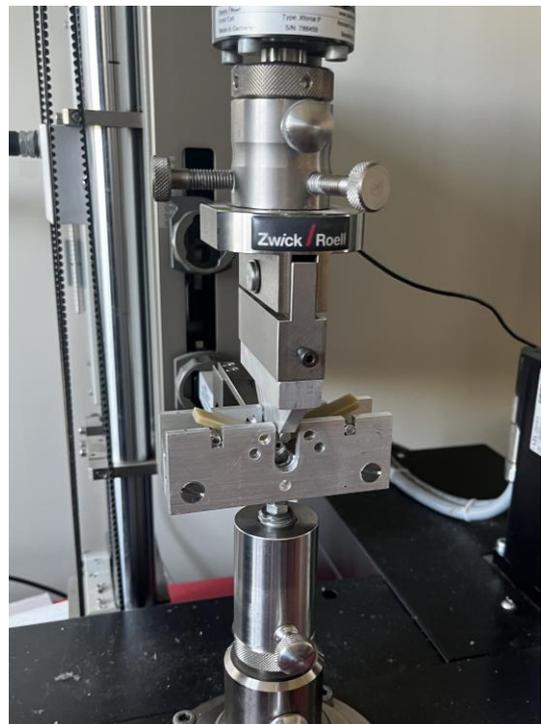
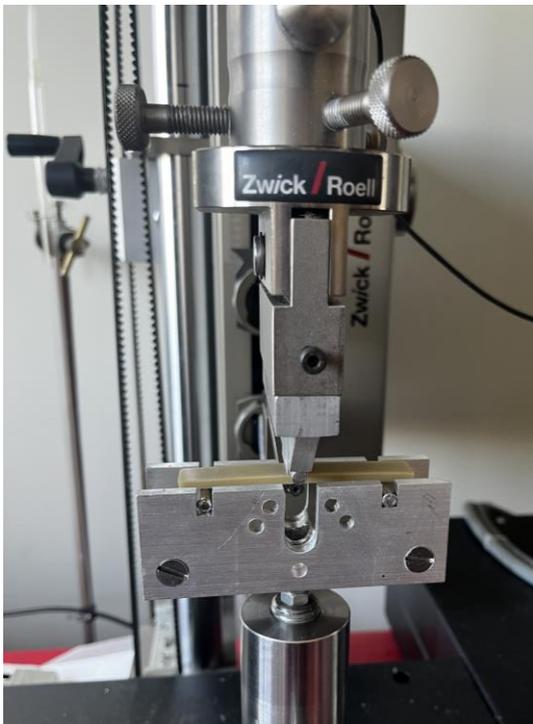


Figura 26. Esempio test a flessione su un campione stampato.

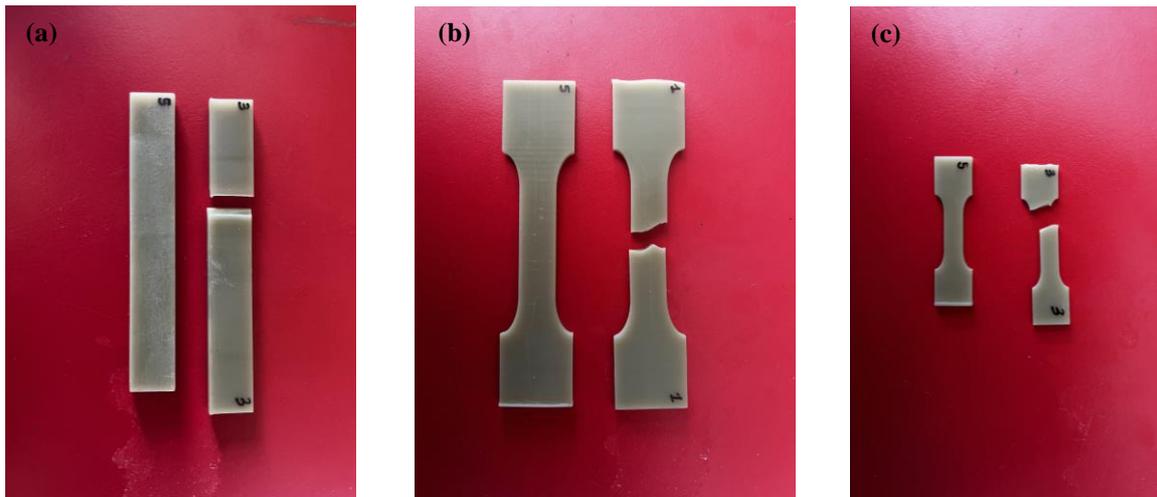


Figura 27. *Provini per test a flessione (a) e per test a trazione (b e c) prima e dopo i test meccanici.*

5.8. Metodi statistici

Per confrontare al meglio i dati raccolti durante i test a trazione e a flessione è stata infine condotta un'analisi statistica. I dati sono stati acquisiti e analizzati in ambiente software R v4.2.2.1.

Per verificare la normalità dei dati, è stato utilizzato il test di Shapiro-Wilk. Le variabili continue sono indicate come mediane con range interquartile [IR], mentre le variabili categoriche come numero e/o percentuale.

Per valutare le differenze tra i gruppi in termini di modulo elastico, carico massimo, allungamento e carico a rottura è stato utilizzato il test di Kruskal-Wallis. È stato utilizzato il test di Bonferroni per il confronto multiplo post hoc. Per valutare le differenze tra le temperature sperimentali nel comportamento di ciascun materiale è stato utilizzato il test U di Mann-Whitney. Le differenze con un valore di $p < 0,05$ sono state considerate significative.

6. Risultati e discussione

Dalle prove meccaniche è stato possibile ottenere curve sforzo-deformazione per ogni tipo di materiale prima a temperatura ambiente, circa 18°C, e poi a 37°C, utili per valutare le loro proprietà meccaniche. In particolare, nel caso dei test a trazione, sono state ricavate sia le curve relative alle prove effettuate sui provini grandi, sia quelle relative ai provini piccoli.

A partire da queste curve è stato possibile ottenere il valore relativo al modulo elastico a trazione (E_t) e a flessione (E_f) espresso in MPa, la tensione massima (σ_M) espressa in MPa e la rispettiva deformazione (ε_M) espressa in percentuale, la tensione a rottura (σ_B) espressa in MPa e la rispettiva deformazione a rottura (ε_B) espressa in percentuale.

La resistenza a trazione/flessione è rappresentata dal valore del carico massimo che il materiale può sopportare, quindi la deformazione a trazione/flessione è il valore della deformazione corrispondente al carico massimo. La tensione a rottura è invece il carico presente nel momento in cui il campione arriva a rottura.

Questi valori vengono restituiti dal software testXpert alla fine della prova. È importante sottolineare, però, che i valori relativi al modulo a trazione/flessione (E_t, E_f) o modulo di Young che vengono riportati nelle tabelle non sono quelli restituiti dalla macchina, ma sono stati ricalcolati a partire dalle curve sforzo-deformazione al fine di ottenere valori più precisi possibile. Per calcolare il modulo di Young è stata eseguita una regressione lineare tra le variabili di sforzo e deformazione ed è stato scelto il valore massimo.

Si analizzano i risultati confrontando i grafici relativi ai tre materiali testati e considerando la differenza tra le prove effettuate a temperatura ambiente con quelle effettuate a 37°C.

6.1. Risultati relativi alle prove effettuate a temperatura ambiente

6.1.1. Prove a trazione

- PETG

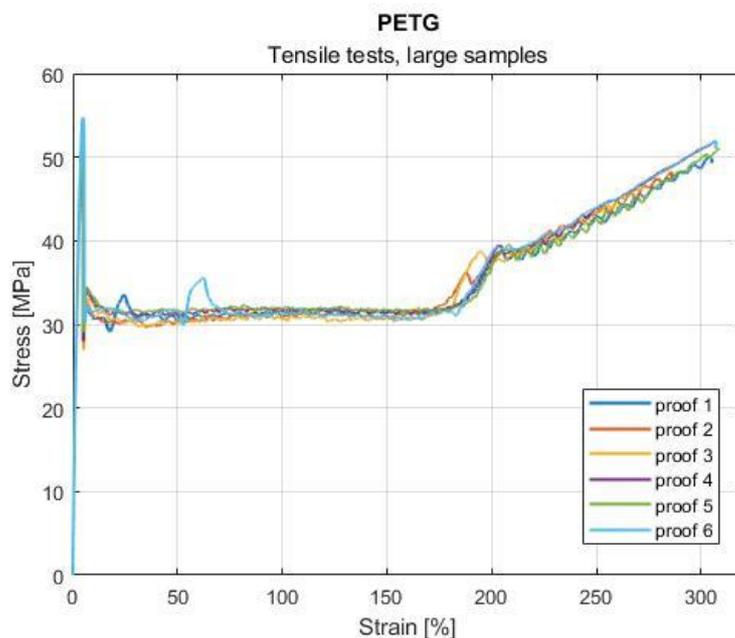


Figura 28. Curva sforzo-deformazione PETG, test a trazione a temperatura ambiente, provini grandi.

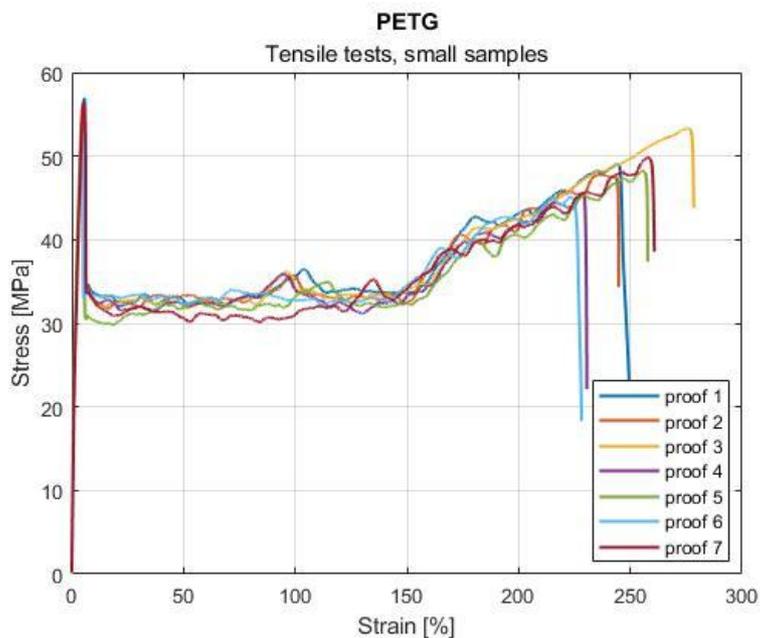


Figura 29. Curva sforzo-deformazione PETG, test a trazione a temperatura ambiente, provini piccoli.

Nella Tabella 9 e nella Tabella 10 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di PETG e i relativi valori medi.

Tabella 9. Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG grandi e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
PETG g1	2366,08	53,75	49,30	305,10
PETG g2	2319,72	53,45	47,28	285,96
PETG g3	2282,68	53,13	50,59	299,26
PETG g4	2253,62	53,44	51,84	306,33
PETG g5	2272,47	54,09	50,89	308,42
PETG g6	2337,97	54,77	51,06	306,97
Valori medi	2305,42	53,77	50,16	302,01

Tabella 10. Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG piccoli e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
PETG p1	2475,83	56,90	18,68	249,84
PETG p2	-	56,26	34,34	244,82
PETG p3	2248,09	55,34	43,81	278,37
PETG p4	2257,39	56,33	22,10	230,55
PETG p5	2940,92	55,22	37,35	257,74
PETG p6	2427,87	53,18	18,31	228,14
PETG p7	2270,27	56,44	38,55	260,75
Valori medi	2436,73	55,67	30,45	250,03

Osservando i grafici e le tabelle relative alle prove effettuate sui campioni di PETG è possibile notare che il materiale presenta una curva sforzo-deformazione tipica di un materiale duttile e tenace.

Le curve sono quelle tipiche di un materiale polimerico caratterizzate da una prima parte elastica, la cui pendenza restituisce il valore del modulo elastico, che termina con un picco, il punto di Yield (Yield stress o tensione di snervamento). Il PETG presenta un buon comportamento elastico fino circa al 5% della deformazione. I moduli di Young sono abbastanza elevati, dell'ordine dei 2.3-2.4 GPa, quindi si tratta di un materiale rigido. Il carico massimo è simile per tutti i campioni, circa 55 MPa, ed è abbastanza elevato. Questo vuol dire che il materiale presenta una buona resistenza a trazione.

Dopo il picco massimo di stress, lo sforzo si riduce e si forma il plateau plastico dove lo stress rimane circa costante ma la deformazione è notevole. In questa fase, quindi, il

materiale subisce una deformazione di tipo plastico. La deformazione plastica risulta essere piuttosto elevata, i provini presentano infatti una deformazione a rottura di circa 250-300 %. Questo significa che i campioni si deformano molto sotto sforzo costante prima di arrivare a rottura e questo è il comportamento tipico di un materiale duttile.

Subito dopo la zona di plateau la curva diminuisce istantaneamente e questo significa che il materiale è arrivato a rottura.

Sia per quanto riguarda i provini grandi che i provini piccoli, le curve sono simili e approssimativamente sovrapposte; questo indica una buona riproducibilità.

- PETG termoformato

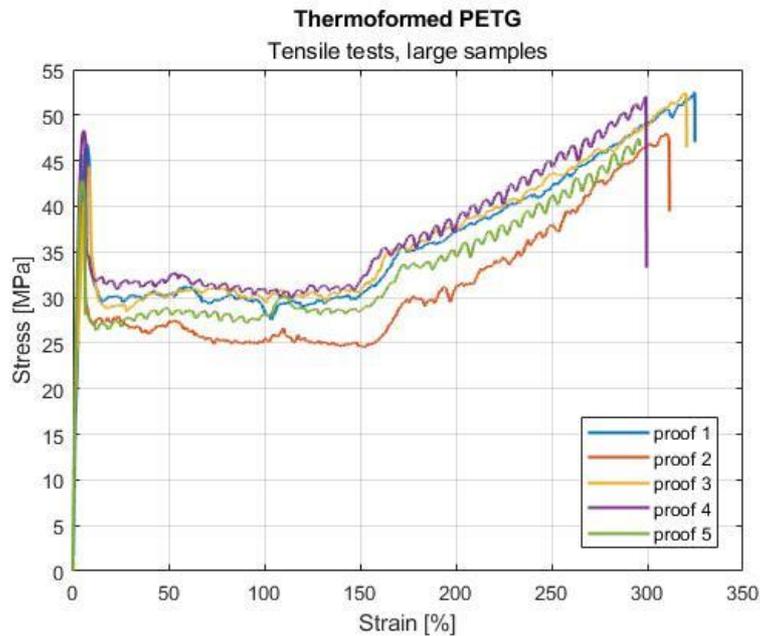


Figura 30. Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a trazione a temperatura ambiente, provini grandi.

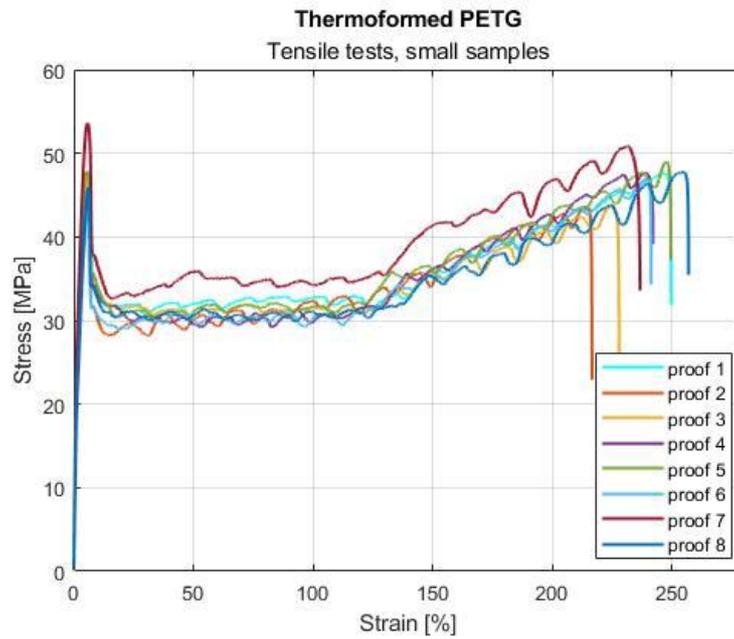


Figura 31. Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a trazione a temperatura ambiente, provini piccoli.

Nella Tabella 11 e nella Tabella 12 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di PETG termoformati e i relativi valori medi.

Tabella 11. Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG termoformato grandi e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
PETG TF g1	2075,57	52,53	47,04	324,82
PETG TF g2	2073,91	48,00	39,43	311,61
PETG TF g3	2495,69	52,42	46,45	320,56
PETG TF g4	2425,38	52,07	33,26	299,57
PETG TF g5	2351,41	47,41	46,64	295,96
Valori medi	2284,39	50,49	42,57	310,50

Tabella 12. Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG termoformato piccoli e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
PETG TF p1	2637,42	47,62	31,91	249,89
PETG TF p2	2343,71	46,55	22,91	216,77
PETG TF p3	1857,57	47,46	23,54	228,13
PETG TF p4	2327,95	47,67	39,12	242,21
PETG TF p5	-	48,99	37,22	249,71
PETG TF p6	2377,85	46,90	34,31	241,49
PETG TF p7	2440,54	53,63	33,6	236,83
PETG TF p8	2776,61	47,76	35,45	257,11
Valori medi	2394,52	48,32	32,26	240,27

Osservando i grafici e le tabelle relativi alle prove effettuate sui campioni di PETG termoformato è possibile notare un primo tratto ripido. I moduli di Young risultano essere leggermente inferiori ma comunque abbastanza elevati e piuttosto omogenei nelle varie prove, con un valore medio di circa 2.4 GPa. Questi valori di modulo elastico indicano che si tratta di un materiale abbastanza rigido.

Anche in questo caso è visibile un buon comportamento elastico fino a circa al 6% della deformazione, segue poi il punto di snervamento e la regione plastica. Il carico massimo risulta leggermente inferiore (50 MPa) ma comunque abbastanza elevato e simile per tutti i campioni. Il materiale, quindi, anche dopo il processo di termoformatura presenta comunque una buona resistenza a trazione. La deformazione non reversibile, caratterizzata dal plateau plastico, è sempre elevata e il provino raggiunge la rottura dopo circa il 250 % della deformazione. Quindi, anche dopo aver subito il processo di termoformatura, il materiale continua ad essere duttile.

Anche nel caso del PETG termoformato, sia per quanto riguarda i provini grandi che i provini piccoli, le curve risultano essere simili e approssimativamente sovrapposte e questo conferma nuovamente la buona riproducibilità dei test.

- TC-85DAC

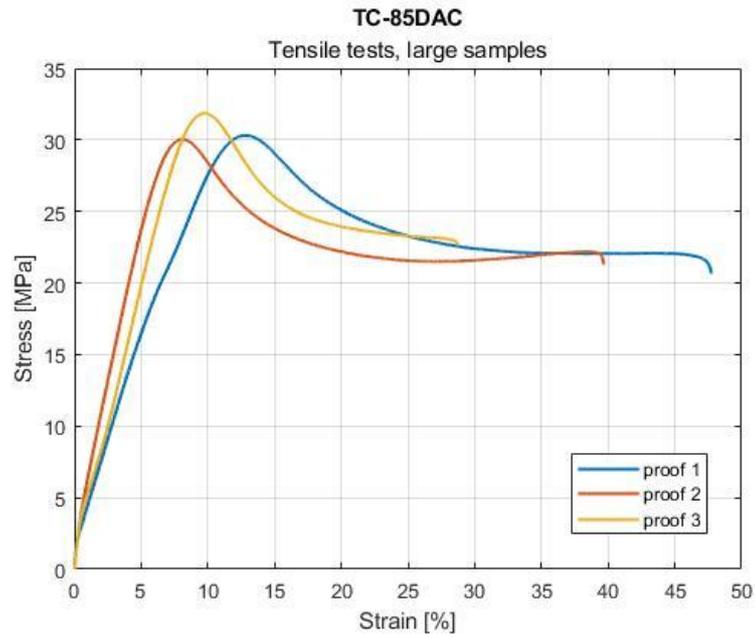


Figura 32. Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a trazione a temperatura ambiente, provini grandi.

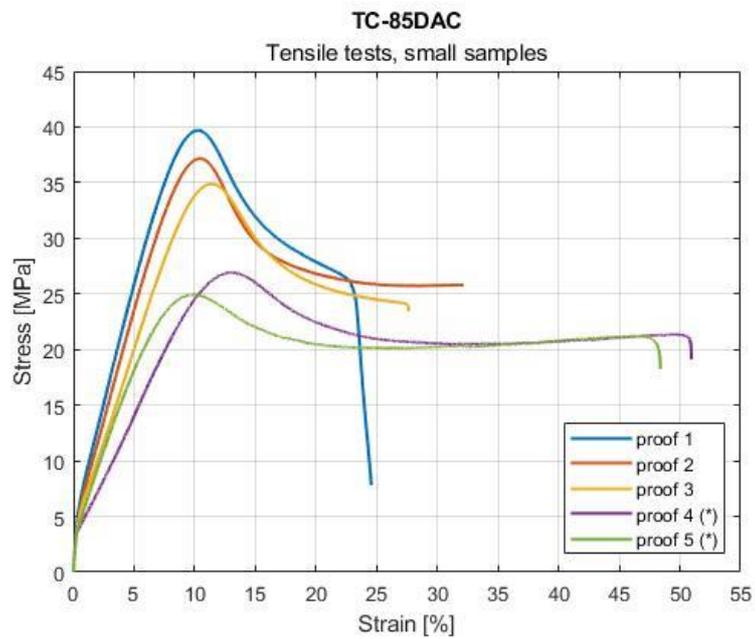


Figura 33. Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a trazione a temperatura ambiente, provini piccoli.

Nella Tabella 13 e nella Tabella 14 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di TC-85DAC e i relativi valori medi.

Tabella 13. Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di TC-85DAC grandi e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
TC-85DAC g1	1394,5	30,31	20,66	47,74
TC-85DAC g2	927,08	30,04	21,3	39,69
TC-85DAC g3	929,49	31,87	22,59	28,77
Valori medi	1083,69	30,74	21,52	38,74

Tabella 14. Risultati relativi ai test a trazione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di TC-85DAC piccoli e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
TC-85DAC p1	1774,01	39,7	7,81	24,56
TC-85DAC p2	1622,91	37,16	25,81	32,18
TC-85DAC p3	1578,04	34,88	23,43	27,63
TC-85DAC p4	1471,09	26,92	19,11	50,95
TC-85DAC p5	1440,32	24,93	18,24	48,37
Valori medi	1577,27	32,72	18,88	36,74

Le curve relative ai test effettuati sui provini grandi e piccoli di TC-85 risultano essere curve tipiche di un materiale polimerico. È quindi visibile un primo tratto lineare, la cui pendenza restituisce il valore di modulo di Young, che termina con un picco che corrisponde alla tensione massima. Segue poi il tratto a deformazione plastica.

Le prove condotte sui provini 4 e 5 hanno un andamento differente poiché il parametro velocità di prova è stato impostato a 1 mm/min invece di 10 mm/min.

I moduli elastici sono inferiori rispetto a quelli calcolati sui provini di PETG o PETG termoformato, soprattutto nel caso dei provini di dimensione maggiore. Questo significa che la resina TC-85 è un materiale molto meno rigido.

La curva relativa ai provini piccoli presenta un doppio andamento nel tratto elastico. Il grafico parte con una pendenza elevata ma dopo circa 0.2 % della deformazione la pendenza diminuisce pur restando sempre in campo elastico. Il modulo calcolato nel primo tratto risulta essere di circa 1500 MPa, mentre nel tratto successivo diminuisce fino ad arrivare a circa 300 MPa. Questa variazione di pendenza potrebbe essere dovuta al processo di polimerizzazione; il materiale potrebbe quindi essere più polimerizzato in superficie e meno nella parte interna. Questo potrebbe quindi creare uno strato superficiale più rigido che fa sì che il comportamento complessivo risulti simile a quello di un materiale formato

da due strati, quindi come se si verificasse una frattura fragile dello strato esterno e questo generasse la diminuzione del modulo elastico quindi della pendenza della curva.

Il tratto elastico termina circa dopo il 10 % della deformazione e il carico massimo medio (30 MPa) risulta inferiore rispetto ai risultati relativi al PETG e al PETG termoformato. Il materiale risulta quindi essere meno resistente a trazione. La zona relativa al plateau plastico è molto inferiore rispetto agli altri materiali; il TC-85 raggiunge la rottura dopo circa 40 % della deformazione, valore circa sei volte inferiore a quello calcolato per gli altri materiali.

I valori inferiori di deformazione plastica indicano che nel complesso il TC-85 è un materiale più fragile rispetto al PETG o al PETG termoformato.

6.1.2. Prove a flessione

- PETG

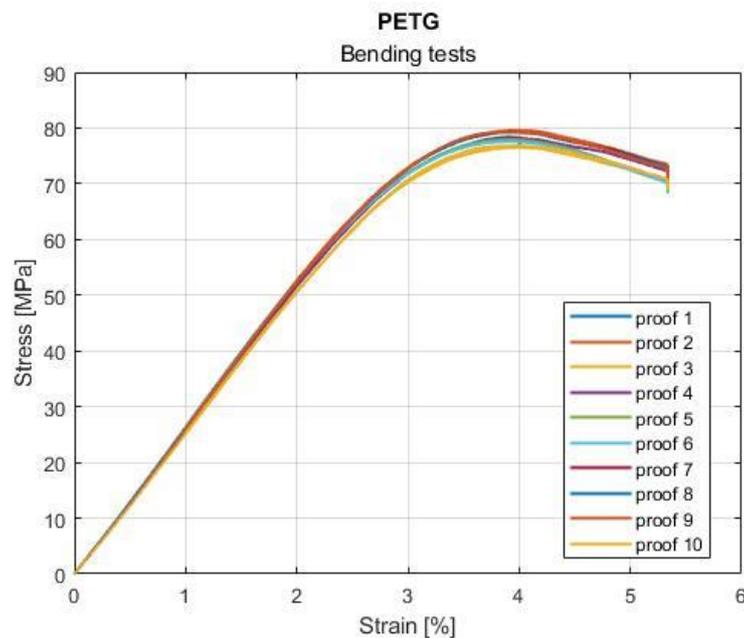


Figura 34. Curva sforzo-deformazione PETG, test a flessione a temperatura ambiente.

Tabella 15 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di PETG sottoposti a test a flessione e i relativi valori medi.

Tabella 15. Risultati relativi ai test a flessione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG e valori medi.

	E_f [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε_{fM} [%]
PETG n1	2691,46	78,37	3,92
PETG n2	2748,08	79,61	3,96
PETG n3	2615,69	76,50	4,01
PETG n4	2679,38	78,27	3,93
PETG n5	2742,73	77,93	3,89
PETG n6	2736,54	77,58	3,90
PETG n7	2732,73	79,27	3,95
PETG n8	2734,38	79,23	3,87
PETG n9	2733,27	79,21	3,85
PETG n10	2642,21	76,81	4,01
Valori medi	2705,65	78,28	3,93

I moduli di Young sono elevati, circa 2.7 GPa, e simili nei dieci campioni. Il modulo elevato indica che il materiale è rigido, poiché maggiore è il modulo di Young, maggiore è la rigidità. Il PETG ha un buon comportamento elastico fino al 3-4 % della deformazione, poi c'è il punto di snervamento e la regione plastica. Il carico massimo, simile per tutti e tre i campioni, è abbastanza elevato, circa 80 MPa, quindi il materiale avrà una buona resistenza alla flessione, come ipotizzato nella Tabella 5.

Durante queste prove il materiale non è arrivato a rottura ma è stata imposta una deformazione massima di 8 mm. Le curve relative ai vari provini sono molto simili e questo indica una buona riproducibilità.

- PETG termoformato

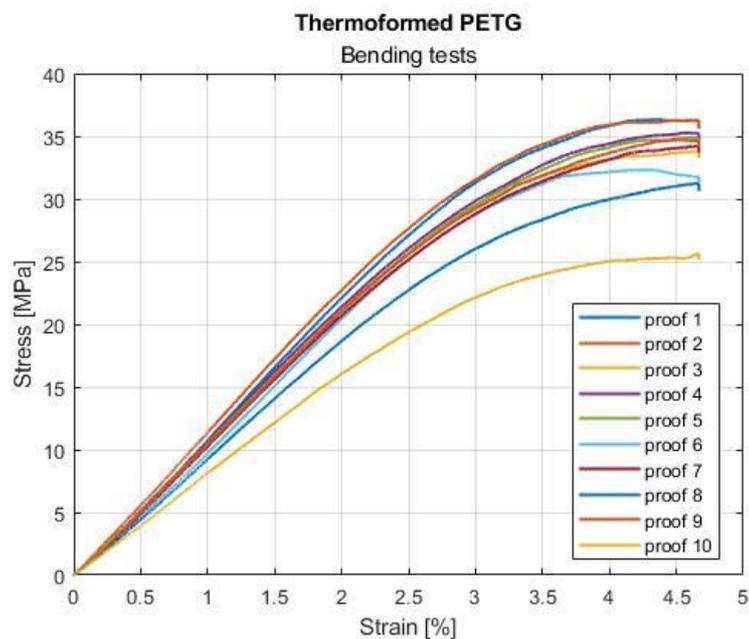


Figura 35. Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a flessione a temperatura ambiente.

Nella Tabella 16 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di PETG termoformato sottoposti a test a flessione e i relativi valori medi.

Tabella 16. Risultati relativi ai test a flessione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di PETG termoformato e valori medi.

	E_f [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε_{fM} [%]
PETG TF n1	1207,18	36,33	4,36
PETG TF n2	1250,82	36,27	4,48
PETG TF n3	1130,03	33,76	4,66
PETG TF n4	1152,56	35,27	4,59
PETG TF n5	1157,45	34,88	4,59
PETG TF n6	1083,49	32,30	4,20
PETG TF n7	1111,09	34,21	4,66
PETG TF n8	987,36	31,24	4,66
PETG TF n9	1133,11	34,70	4,53
PETG TF n10	881,54	25,63	4,67
Valori medi	1109,46	33,46	4,54

I moduli di Young sono simili per i vari campioni, a parte i campioni 8 e 10 che sono leggermente inferiori. Nel complesso il materiale è abbastanza rigido con una buona elasticità, anche se inferiore rispetto al PETG.

Anche il carico massimo risulta essere inferiore rispetto al PETG. I provini sembrano avere una resistenza alla flessione abbastanza uniforme ad eccezione del provino 10 che risulta essere meno resistente, ovvero si deforma di più. Anche in questo caso la prova è stata interrotta dal software al raggiungimento dei 7 mm di deformazione.

Nel complesso le curve hanno forme simili, ma ci sono alcune differenze descritte sopra che influenzano un po' la riproducibilità.

- TC-85DAC

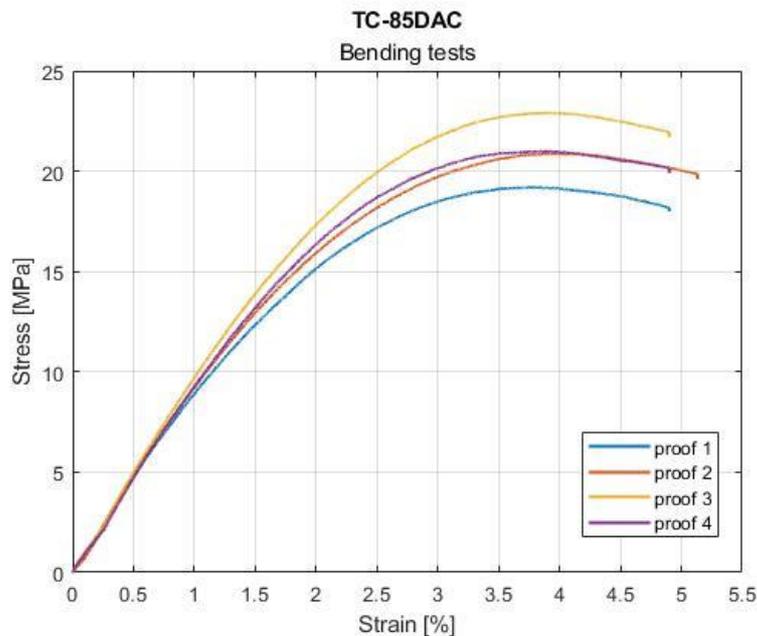


Figura 36. Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a flessione a temperatura ambiente.

Nella Tabella 17 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di TC-85DAC sottoposti a test a flessione e i relativi valori medi.

Tabella 17. Risultati relativi ai test a flessione a temperatura ambiente effettuati sui campioni di TC- 85DAC e valori medi.

	E_f [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε_{fM} [%]
TC-85DAC n1	1128,84	19,20	3,75
TC-85DAC n2	1127,56	20,87	3,91
TC-85DAC n3	1167,71	22,91	3,92
TC-85DAC n4	1108,33	20,99	3,89
Valori medi	1133,11	20,99	3,87

Osservando i risultati relativi alle prove a flessione effettuate sui campioni di TC-85 è possibile notare valori di modulo elastico molto inferiori rispetto al PETG ma abbastanza simili a quelli relativi al PETG termoformato. Anche in questo caso il materiale non è arrivato a rottura perché la prova è stata interrotta una volta raggiunta una deformazione di 7.5 mm. Il carico massimo è anche esso molto inferiore rispetto a quello ottenuto testando il PETG; il TC-85 risulta essere quasi quattro volte meno resistente a flessione del PETG. Le curve nel complesso risultano essere abbastanza riproducibili.

6.2. Risultati relativi alle prove effettuate a 37°C

6.2.1. Prove a trazione

- PETG

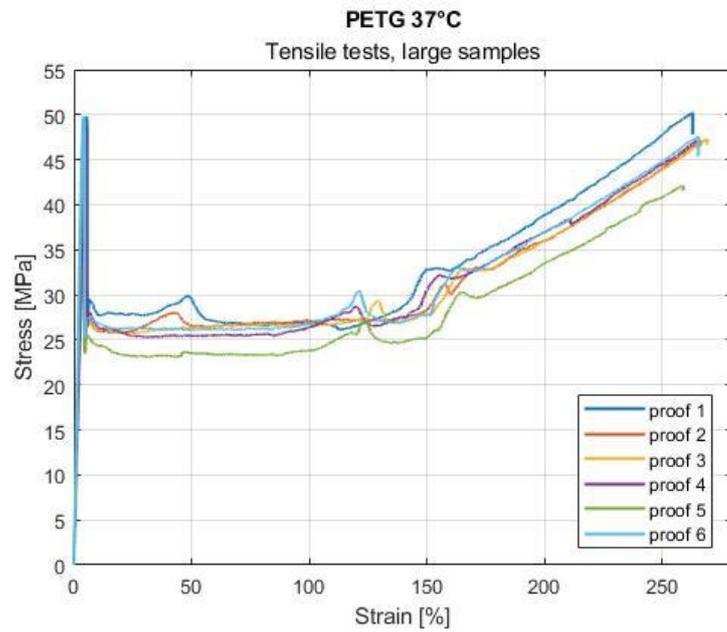


Figura 37. Curva sforzo-deformazione PETG, test a trazione a 37°C, provini grandi.

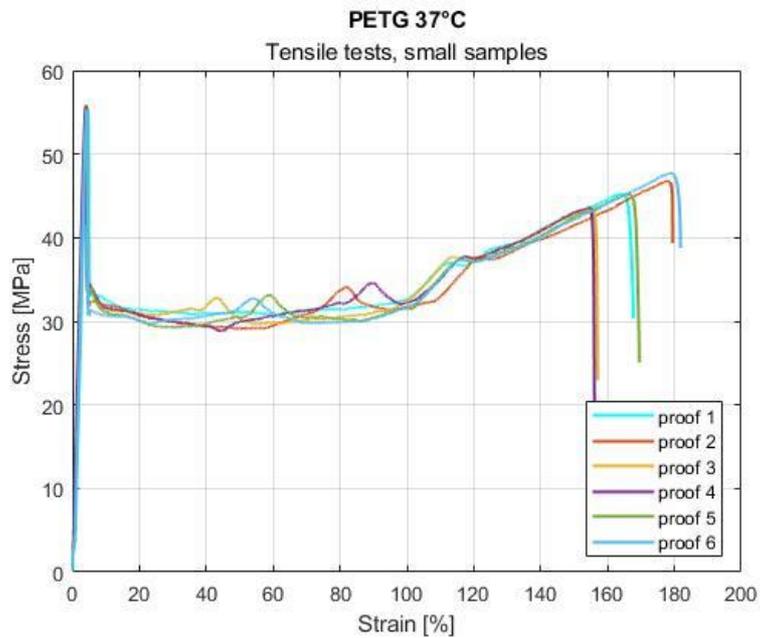


Figura 38. Curva sforzo-deformazione PETG, test a trazione a 37°C, provini piccoli.

Nella Tabella 18 e nella Tabella 19 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di PETG sottoposti al test di trazione ad una temperatura di 37°C e i relativi valori medi.

Tabella 18. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di PETG grandi e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
PETG g1	1790,5	50,21	47,81	263,08
PETG g2	1640,26	49,41	46,54	266,44
PETG g3	1904,21	48,87	46,71	269,31
PETG g4	1610,01	48,77	47,04	264,77
PETG g5	1611,6	47,01	41,56	259,03
PETG g6	1703,14	49,83	45,38	265,49
Valori medi	1709,95	49,02	45,84	264,69

Tabella 19. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di PETG piccoli e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
PETG p1	1824,65	55,3	30,31	167,68
PETG p2	1870,7	55,41	39,33	179,49
PETG p3	1945,45	55,93	22,95	157,07
PETG p4	1900,11	55,73	20,02	156,09
PETG p5	1893,79	55,47	25,05	169,49
PETG p6	1919,17	55,26	38,78	181,83
Valori medi	1892,31	55,52	29,41	168,61

- PETG termoformato

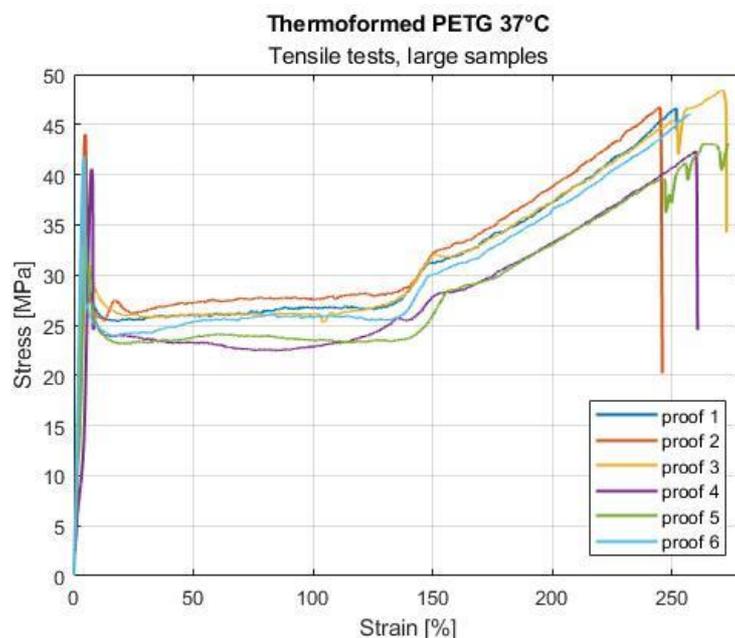


Figura 39. Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a trazione a 37°C, provini grandi.

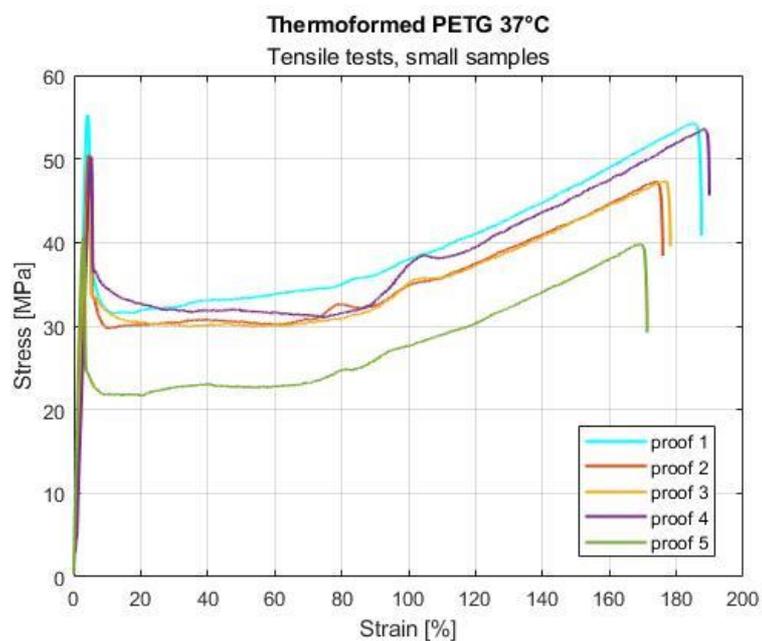


Figura 40. Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a trazione a 37°C, provini piccoli.

Nella Tabella 20 e nella Tabella 21 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di PETG termoformato sottoposti al test di trazione ad una temperatura di 37°C e i relativi valori medi.

Tabella 20. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di PETG termoformato grandi e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ε_B [%]
PETG TF g1	1153,60	46,61	44,48	252,03
PETG TF g2	1260,63	46,75	20,21	246,13
PETG TF g3	1086,62	48,40	34,24	273,01
PETG TF g4	1169,53	42,32	24,50	260,86
PETG TF g5	1057,69	43,14	43,13	274,13
PETG TF g6	1360,26	46,06	46,05	257,65
Valori medi	1181,39	45,55	35,44	260,63

Tabella 21. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di PETG termoformato piccoli e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ε_B [%]
PETG TF p1	2218,28	55,26	40,79	187,52
PETG TF p2	1780,65	50,51	38,39	175,94
PETG TF p3	1733,96	47,35	39,56	178,16
PETG TF p4	1498,25	53,56	45,61	189,85
PETG TF p5	2476,67	40,67	29,20	171,28
Valori medi	1941,56	49,47	38,71	180,55

- TC-85DAC

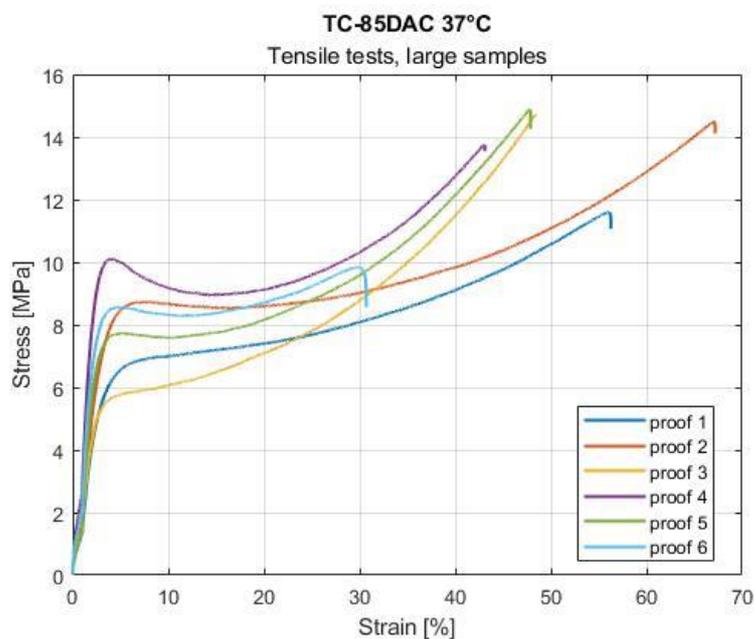


Figura 41. Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a trazione a 37°C, provini grandi.

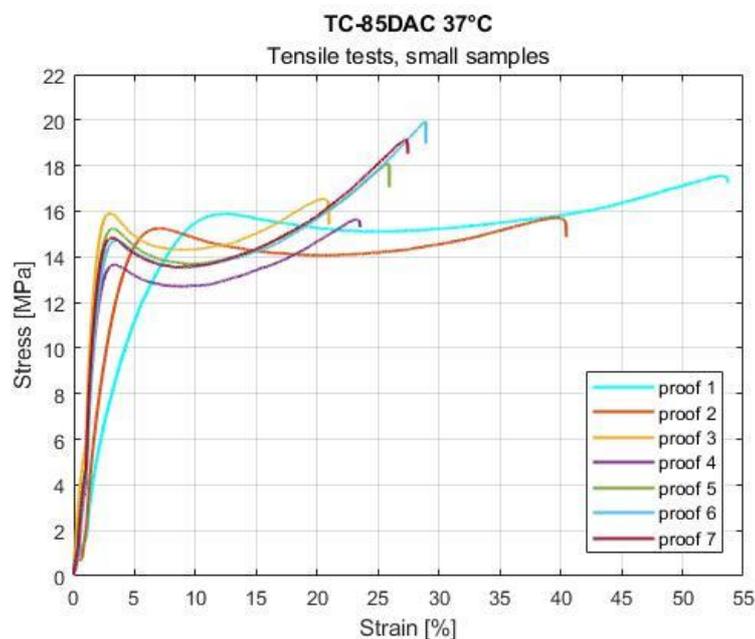


Figura 42. Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a trazione a 37°C, provini piccoli.

Nella Tabella 22 e nella Tabella 23 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di TC-85DAC sottoposti al test di trazione ad una temperatura di 37°C e i relativi valori medi.

Tabella 22. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di TC-85DAC grandi e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
TC-85DAC g1	338,52	11,59	11,07	56,27
TC-85DAC g2	435,87	14,49	14,11	67,17
TC-85DAC g3	418,81	14,71	14,70	48,48
TC-85DAC g4	692,88	13,75	13,55	43,12
TC-85DAC g5	530,32	14,89	14,26	47,87
TC-85DAC g6	591,97	9,84	8,56	30,70
Valori medi	501,40	13,21	12,71	48,93

Tabella 23. Risultati relativi ai test a trazione a 37°C effettuati sui campioni di TC-85DAC piccoli e valori medi.

	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
TC-85DAC p1	488,96	17,56	17,26	53,79
TC-85DAC p2	707,82	15,72	14,87	40,47
TC-85DAC p3	1367,32	16,54	15,41	20,97
TC-85DAC p4	1196,54	15,64	15,30	23,51
TC-85DAC p5	1254,16	18,09	17,06	25,92
TC-85DAC p6	1177,55	19,93	18,96	28,93
TC-85DAC p7	1294,19	19,15	18,53	27,44
Valori medi	1069,51	17,52	16,77	31,58

Per quanto riguarda i grafici relativi al PETG e al PETG termoformato si può notare che le curve relative alle prove a trazione effettuate a 37°C risultano essere abbastanza simili a quelle relative alle prove a temperatura ambiente. Le curve presentano forme simili ma i valori del modulo elastico sono diminuiti. In particolare, nel caso del PETG si è verificata una riduzione del modulo elastico a trazione di circa 500 MPa, ovvero circa un quarto del modulo a temperatura ambiente; stessa cosa per il PETG termoformato, dove la riduzione del modulo risulta essere anche maggiore. Questi valori di modulo elastico però indicano sempre che si tratta di un materiale abbastanza rigido. Anche a 37°C è visibile un buon comportamento elastico fino a circa al 6% della deformazione, segue poi il punto di snervamento e la regione plastica. Il carico massimo risulta paragonabile alle prove effettuate a temperatura ambiente e simile per tutti i campioni. La deformazione non reversibile, caratterizzata dal plateau plastico, è sempre elevata ma leggermente inferiore rispetto alle prove precedenti. Le curve risultano essere sempre abbastanza sovrapposte

quindi le prove sono riproducibili. PETG e PETG termoformato non sembrano quindi presentare importanti variazioni delle loro proprietà meccaniche a temperatura del cavo orale e i materiali continuano ad essere duttili anche se la duttilità è leggermente diminuita.

Per quanto riguarda i grafici relativi al TC-85 le curve presentano qualche differenza.

In particolare, le curve a 37°C presentano un primo tratto elastico inferiore. A temperatura ambiente è visibile un buon comportamento elastico fino circa al 10% che si riduce a poco meno del 5% a 37°C. Inoltre, il valore di tensione nel punto di snervamento risulta essere molto inferiore, da una media di 30-35 MPa si riduce a circa 10-15 MPa.

I valori di deformazione a rottura sono comparabili, per cui a 37°C si nota un aumento del plateau plastico, quindi della deformazione plastica.

6.2.2. Prove a flessione

- PETG

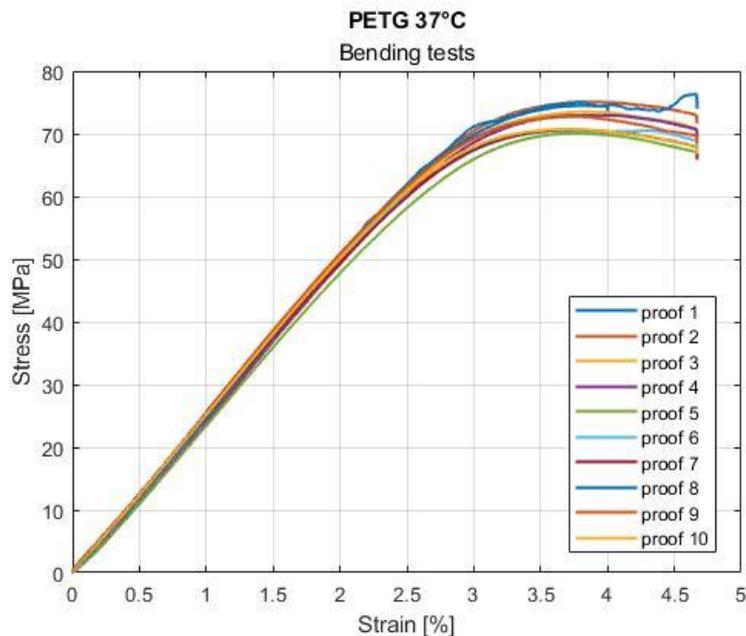


Figura 43. Curva sforzo-deformazione PETG, test a flessione a 37°C.

Tabella 24 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di PETG sottoposti a test a flessione e i relativi valori medi.

Tabella 24. Risultati relativi ai test a flessione a 37°C effettuati sui campioni di PETG e valori medi.

	E_f [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε_{fM} [%]
PETG n1	2664,85	74,49	3,81
PETG n2	2692,28	75,09	3,84
PETG n3	2634,07	73,52	3,79
PETG n4	2661,44	72,95	3,83
PETG n5	2543,82	70,06	3,77
PETG n6	2619,01	70,52	3,66
PETG n7	2600,60	70,67	3,70
PETG n8	2661,32	76,31	4,65
PETG n9	2665,76	72,76	3,78
PETG n10	2617,73	70,78	3,70
Valori medi	2636,09	72,72	3,85

- PETG termoformato

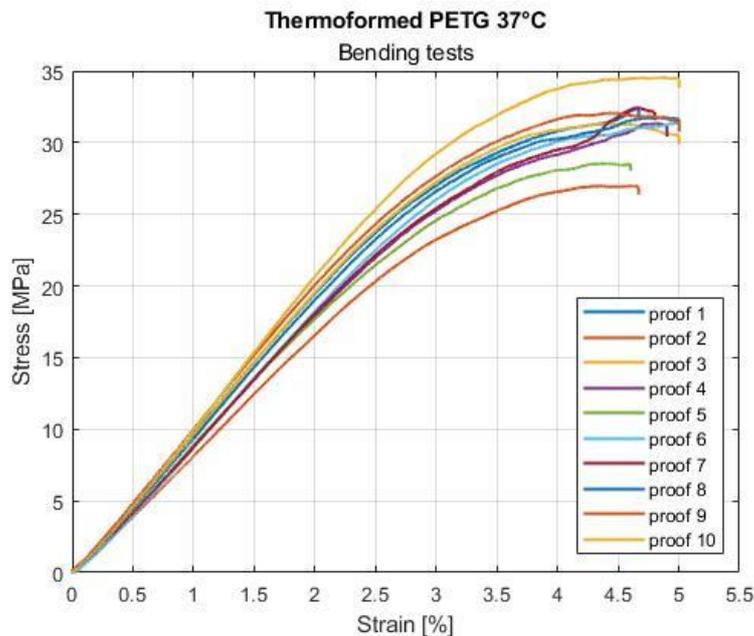


Figura 44. Curva sforzo-deformazione PETG termoformato, test a flessione a 37°C.

Nella Tabella 25 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di PETG termoformato sottoposti a test a flessione e i relativi valori medi.

Tabella 25. Risultati relativi ai test a flessione a 37°C effettuati sui campioni di PETG termoformato e valori medi.

	E_f [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε_{fM} [%]
PETG TF n1	1017,52	32,43	4,66
PETG TF n2	866,94	26,99	4,61
PETG TF n3	1040,41	31,31	4,45
PETG TF n4	965,91	31,33	4,83
PETG TF n5	944,32	28,54	4,35
PETG TF n6	984,88	31,41	5,00
PETG TF n7	945,34	32,42	4,66
PETG TF n8	1013,00	31,76	4,86
PETG TF n9	1047,66	32,06	4,44
PETG TF n10	1102,65	34,55	4,86
Valori medi	992,86	31,28	4,67

- TC-85DAC

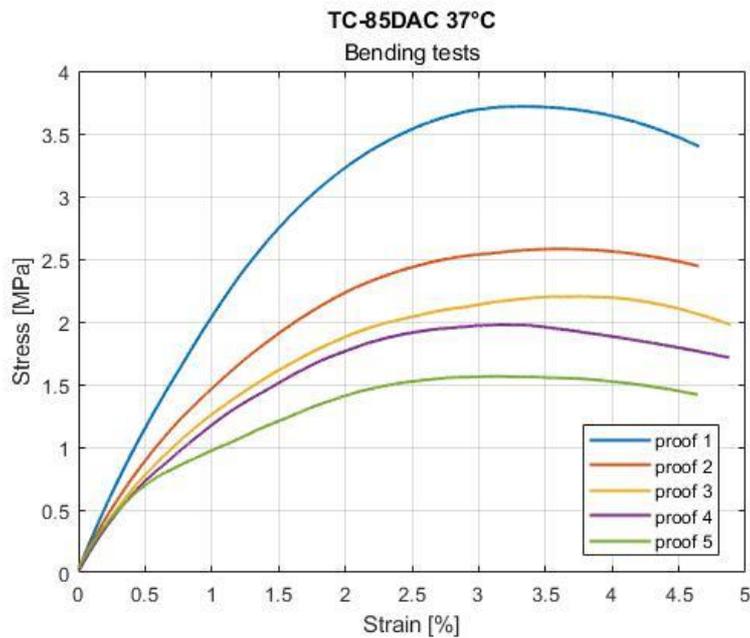


Figura 45. Curva sforzo-deformazione TC-85DAC, test a flessione a 37°C.

Nella Tabella 26 sono riassunte le grandezze ricavate dalle curve sforzo-deformazione dei provini di TC-85DAC sottoposti a test a flessione e i relativi valori medi.

Tabella 26. Risultati relativi ai test a flessione a 37°C effettuati sui campioni di TC-85DAC e valori medi.

	E_f [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ε_{fM} [%]
TC-85DAC n1	319,62	3,72	3,37
TC-85DAC n2	285,81	2,58	3,67
TC-85DAC n3	172,47	2,20	3,75
TC-85DAC n4	194,47	1,98	3,17
TC-85DAC n5	213,50	1,56	3,14
Valori medi	237,17	2,41	3,42

Anche per quanto riguarda le prove a flessione svolte a 37°C il materiale non è arrivato a rottura ma è stata imposta una deformazione massima di 7 mm.

Anche nel caso delle prove a flessione, per quanto riguarda i grafici relativi al PETG e al PETG termoformato si può notare che le curve relative alle prove effettuate a 37°C risultano essere abbastanza simili a quelle relative alle prove effettuate a temperatura ambiente. Le curve presentano forme simili anche se i valori del modulo elastico sono leggermente diminuiti. Anche i valori di carico massimo risultano leggermente inferiori e questo indica una diminuzione della resistenza a flessione. Le curve per entrambi i materiali risultano essere simili e questo continua ad indicare una buona riproducibilità.

Per quanto riguarda i grafici relativi al TC-85 le curve ottenute a temperatura ambiente e a 37°C presentano delle differenze. I valori di modulo elastico a flessione sono diminuiti, passando da 1.1 GPa a circa 240 MPa, e questo significa che il materiale è molto meno rigido. Il carico massimo è diminuito notevolmente, passando da valori di circa 20 MPa a circa 2 MPa, la resistenza a flessione è quindi notevolmente diminuita.

6.3. Statistica test a trazione e a flessione

Un totale di 24 campioni di PETG, 23 di PETG termoformato e 21 di TC-85 sono stati sottoposti all'analisi di trazione. 32 campioni sono stati analizzati a temperatura ambiente (18°C) e 36 a 37°C. È stata riscontrata una differenza significativa tra i gruppi nel modulo elastico a temperatura ambiente ($p < 0,001$), che si è mantenuta anche nelle analisi separate (campioni grandi e piccoli) ($p = 0,006$ e $0,035$ rispettivamente). In particolare, il TC-85 ha mostrato una differenza significativa rispetto a ciascuno degli altri due gruppi ($p < 0,001$), mentre il PETG e il PETG termoformato non hanno mostrato alcuna differenza significativa tra loro. Lo stesso schema di differenze tra i gruppi è stato osservato a 37°C. Ogni sottogruppo ha mostrato una differenza significativa nel modulo elastico quando si sono confrontate le prestazioni a diverse temperature. In particolare, il TC-85 ha mostrato un modulo elastico mediano di 1455,70 MPa (IR= [1278,25, 1589,22]) a 18°C e di 692,88 (IR= [488,96, 1196,54]) a 37°C. La Tabella 27 riporta la descrizione completa del modulo elastico in base ai sottogruppi e alle temperature.

I valori del carico massimo, dell'allungamento a rottura e del carico di rottura a trazione sono riportati rispettivamente nella Tabella 28, nella Tabella 29 e nella Tabella 30, dove si può notare che anche per questi parametri sono state riscontrate differenze significative tra i gruppi.

Tuttavia, confrontando il comportamento meccanico alle diverse temperature, solo la tensione massima e la tensione a rottura del TC-85 hanno mostrato alcune differenze, risultando significativamente inferiori a 37°C (rispettivamente $p < 0,001$ e $p = 0,006$).

Un totale di 20 campioni di PETG, 20 di PETG termoformato e 9 di TC-85 sono stati sottoposti all'analisi del test di flessione. È stata riscontrata una differenza significativa tra i gruppi nel modulo elastico a temperatura ambiente ($p < 0,001$). In particolare, il TC-85 ha mostrato una differenza significativa con il PETG ($p = 0,006$) ma non con il PETG termoformato, mentre il PETG e il PETG termoformato hanno mostrato una differenza significativa tra loro ($p < 0,001$). A 37 °C il modulo elastico del TC-85 ha mostrato un valore inferiore, che è risultato significativamente diverso da quello degli altri due materiali. La Tabella 31 riporta la descrizione completa del modulo elastico in base ai sottogruppi e alle temperature.

I valori della resistenza a trazione e della resistenza alla deformazione massima sono riportati nelle righe successive della stessa tabella, dove si può notare che anche per questi parametri sono state riscontrate differenze significative tra i gruppi. Confrontando il comportamento meccanico alle diverse temperature, tutti i parametri hanno mostrato differenze, risultando significativamente più bassi a 37°C ($p < 0,05$), ad eccezione della resistenza alla deformazione massima del PETG termoformato.

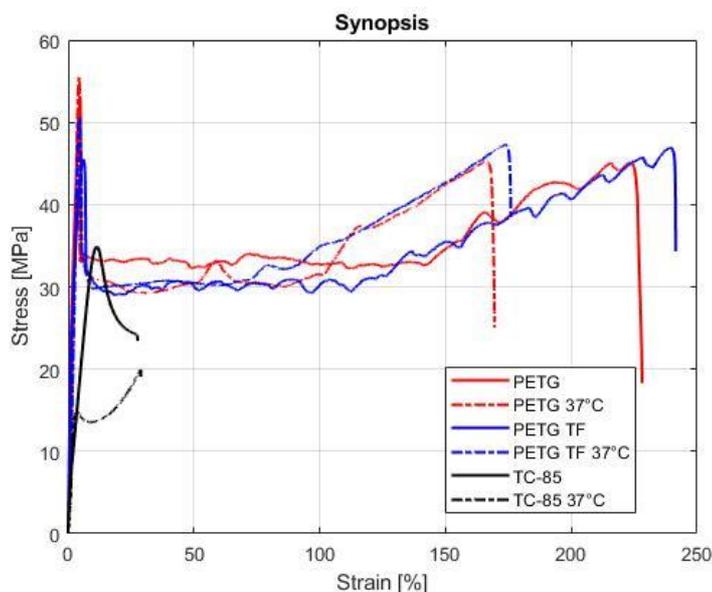


Figura 46. Curva sforzo-deformazione di TC-85, PETG e PETG termoformato a diverse temperature.

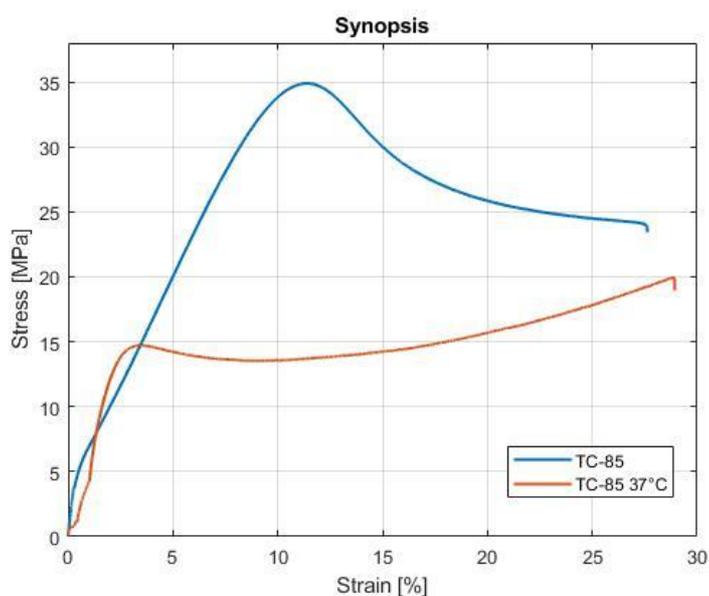


Figura 47. Curva sforzo-deformazione di TC-85 a diverse temperature.

Tabella 27.. Statistiche descrittive del modulo elastico di trazione misurato. I risultati sono espressi come mediana [intervallo interquartile]. Valore P intergruppo: valore P del test di Kruskal-Wallis. Valore P intra-gruppo: valore P del Test U di Mann-Whitney.

	TC-85	PETG	PETG-TF	Intergroup p-value
Elastic modulus 18°C				
	N = 8	N = 12	N = 12	
Overall [MPa]	1455.70 [1278.25, 1589.22]	2301.20 [2267.05, 2381.53]	2364.63 [2264.86, 2454.33]	<0.001* TC-85 vs PETG <0.001* TC-85 vs PETG-TF <0.001* PETG vs PETG-TF 1.000
Small samples [MPa]	1578.00 [1471.10, 1622.90]	2349.07 [2260.61, 2463.84]	2377.85 [2335.83, 2538.98]	0.006*
Large samples [MPa]	929.49 [928.29, 1161.99]	2301.20 [2275.02, 2333.41]	2351.41 [2075.57, 2425.38]	0.035*
Elastic modulus 37°C				
	N = 13	N = 12	N = 11	
Overall [MPa]	692.88 [488.96, 1196.54]	1847.68 [1687.42, 1901.13]	1360.26 [1161.57, 1757.31]	<0.001* TC-85 vs PETG <0.001* TC-85 vs PETG-TF 0.012* PETG vs PETG-TF 0.112
Small samples [MPa]	1196.54 [942.68, 1274.18]	1896.95 [1876.47, 1914.40]	1780.65 [1733.96, 2218.28]	0.002*
Large samples [MPa]	483.10 [423.08, 576.56]	1671.70 [1618.76, 1768.66]	1161.57 [1103.36, 1237.86]	0.001*
Intragroup p-value (overall)	0.001*	<0.001*	<0.001*	

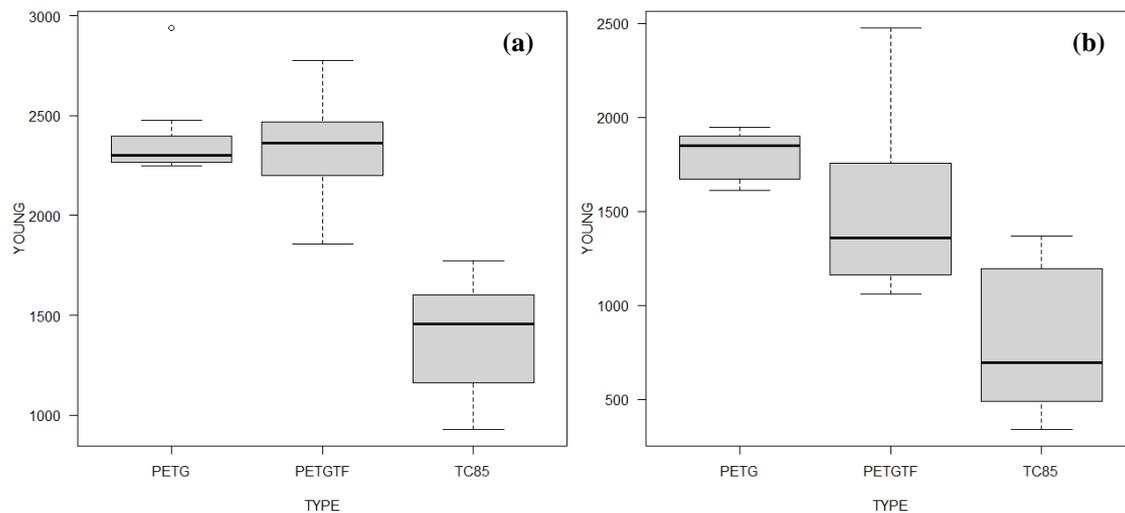


Figura 48. Modulo elastico a temperatura ambiente (a) e a 37°C (b).

Tabella 28. Statistiche descrittive del carico massimo misurato. I risultati sono espressi come mediana [intervallo interquartile]. Valore P intergruppo: valore P del test di Kruskal-Wallis. Valore P intra-gruppo: valore P del Test U di Mann-Whitney.

	TC-85	PETG	PETG-TF	Intergroup p-value
Ultimate tensile strength 18°C				
	N = 8	N = 12	N = 12	
Overall [MPa]	31.09 [29.26, 35.45]	54.77 [53.45, 56.26]	47.76 [47.46, 52.07]	<0.001* TC-85 vs PETG <0.001* TC-85 vs PETG-TF <0.001* PETG vs PETG-TF
Small samples [MPa]	34.88 [26.92, 37.16]	56.26 [55.28, 56.38]	47.64 [47.32, 48.07]	<0.001*
Large samples [MPa]	30.31 [30.17, 31.09]	53.60 [53.44, 54.01]	52.07 [48.00, 52.42]	0.003*
Ultimate tensile strength 37°C				
	N = 13	N = 12	N = 11	
Overall [MPa]	15.64 [14.49, 17.56]	52.74 [49.27, 55.42]	46.75 [44.60, 49.45]	<0.001* TC-85 vs PETG <0.001* TC-85 vs PETG-TF <0.001* PETG vs PETG-TF 0.017

Small samples [MPa]	17.56 [16.13, 18.62]	55.44 [55.33, 55.66]	50.51 [47.35, 53.56]	0.001*
Large samples [MPa]	14.12 [12.13, 14.66]	49.14 [48.80, 49.73]	46.34 [43.87, 46.72]	0.001*
Intragroup p-value (overall)	<0.001*	0.168	0.15	

Tabella 29. Statistiche descrittive dell'allungamento a rottura. I risultati sono espressi come mediana [intervallo interquartile]. Valore P intergruppo: valore P del test di Kruskal-Wallis. Valore P intra-gruppo: valore P del Test U di Mann-Whitney.

	TC-85	PETG	PETG-TF	Intergroup p-value
Fracture elongation 18°C				
	N = 8	N = 12	N = 12	
Overall [%]	35.94 [28.48, 47.90]	278.37 [249.84, 305.10]	249.89 [241.49, 299.57]	<0.001* TC-85 vs PETG <0.001* TC-85 vs PETG-TF <0.001* PETG vs PETG-TF 1.000
Small samples [%]	32.18 [27.63, 48.37]	249.84 [237.68, 259.24]	241.85 [234.66, 249.76]	0.003*
Large samples [%]	39.69 [34.23, 43.72]	305.72 [300.72, 306.81]	311.61 [299.57, 320.56]	0.025*
Fracture elongation 37°C				
	N = 13	N = 12	N = 11	
Overall [%]	40.47 [27.44, 48.48]	220.43 [169.04, 264.95]	246.13 [182.84, 259.26]	<0.001* TC-85 vs PETG <0.001* TC-85 vs PETG-TF TF<0.001* PETG vs PETG-TF 1.000
Small samples [%]	27.44 [24.72, 34.70]	168.58 [159.72, 176.99]	178.16 [175.94, 187.52]	0.001*
Large samples [%]	48.17 [44.31, 54.32]	265.13 [263.50, 266.20]	259.26 [253.44, 269.97]	0.003*
Intragroup p-value (overall)	0.86	0.019*	0.119	

Tabella 30. *Statistiche descrittive della tensione a rottura. I risultati sono espressi come mediana [intervallo interquartile]. Valore P intergruppo: valore P del test di Kruskal-Wallis. Valore P intra-gruppo: valore P del Test U di Mann-Whitney.*

	TC-85	PETG	PETG-TF	Intergroup p-value
Fracture tensile strength 18°C				
	N = 8	N = 12	N = 12	
Overall [MPa]	20.98 [18.89, 22.80]	43.81 [34.34, 50.59]	35.45 [33.26, 39.43]	0.002* TC-85 vs PETG 0.018 TC-85 vs PETG-TF <0.001* PETG vs PETG-TF 0.612
Small samples [MPa]	19.11 [18.24, 23.43]	34.34 [20.39, 37.95]	33.95 [29.82, 35.89]	0.065
Large samples [MPa]	21.30 [20.98, 21.94]	50.74 [49.62, 51.02]	46.45 [39.43, 46.64]	0.003*
Fracture tensile strength 37°C				
	N = 13	N = 12	N = 11	
Overall [MPa]	14.87 [14.11, 17.06]	40.44 [28.99, 46.58]	39.56 [31.72, 43.80]	<0.001* TC-85 vs PETG <0.001* TC-85 vs PETG-TF <0.001* PETG vs PETG-TF 1.000
Small samples [MPa]	17.06 [15.36, 17.90]	27.68 [23.47, 36.66]	39.56 [38.39, 40.79]	0.001*
Large samples [MPa]	13.83 [11.69, 14.22]	46.62 [45.67, 46.96]	38.69 [26.94, 44.14]	0.001*
Intragroup p-value (overall)	0.006*	0.503	0.776	

Tabella 31. Statistiche descrittive dei risultati dei test di flessione. I risultati sono espressi come mediana [intervallo interquartile]. Valore P intergruppo: valore P del test di Kruskal-Wallis. Valore P intra-gruppo: valore P del Test U di Mann-Whitney.

	TC-85	PETG	PETG-TF	Intergroup p-value
18°C				
Elastic modulus [MPa]	N = 4	N = 10	N = 10	
	1128.20 [1122.75, 1138.56]	2733.00 [2682.40, 2736.00]	1131.57 [1090.39, 1156.23]	<0.001* TC-85 vs PETG <0.006 TC-85 vs PETG-TF <1.000 PETG vs PETG-TF <0.001*
Ultimate tensile strength [MPa]	20.93 [20.45, 21.47]	78.32 [77.67, 79.22]	34.45 [32.66, 35.17]	<0.001*
Maximal deformation strength [%]	3.90 [3.86, 3.91]	3.92 [3.89, 3.96]	4.59 [4.49, 4.66]	<0.001*
37°C				
Elastic modulus [MPa]	N = 5	N = 10	N = 10	
	213.50 [194.47, 285.81]	2647.70 [2618.05, 2664.00]	998.94 [950.48, 1034.69]	<0.001* TC-85 vs PETG <0.002 TC-85 vs PETG-TF <0.002 PETG vs PETG-TF <0.001*
Ultimate tensile strength [MPa]	2.20 [1.98, 2.58]	72.86 [70.70, 74.25]	31.59 [31.31, 32.33]	<0.001*
Maximal deformation strength [%]	3.37 [3.17, 3.67]	3.79 [3.72, 3.83]	4.66 [4.49, 4.85]	<0.001*
Intragroup p-value				
Elastic modulus	0.016*	0.007*	0.007*	
Ultimate tensile strength	0.016*	<0.001*	0.043*	
Maximal deformation strength	0.027*	0.002*	0.237	

6.4. Risultati test di creep

- PETG

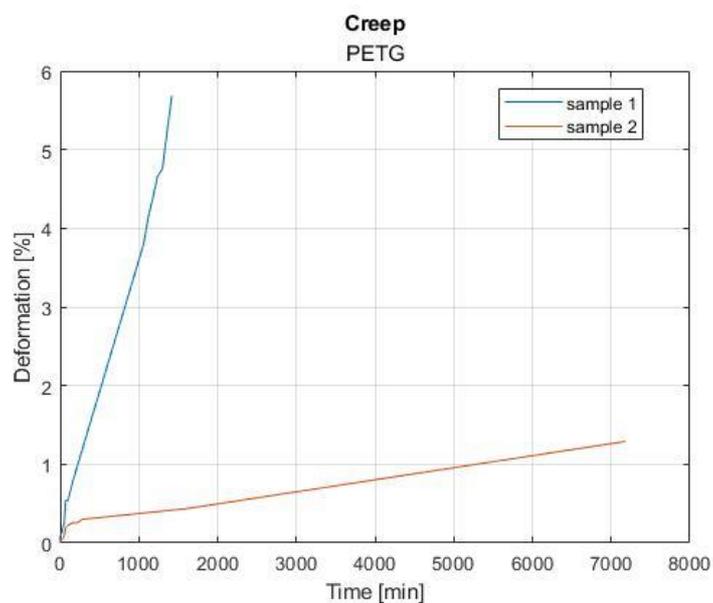


Figura 49. Grafici test di creep PETG.

- PETG termoformato

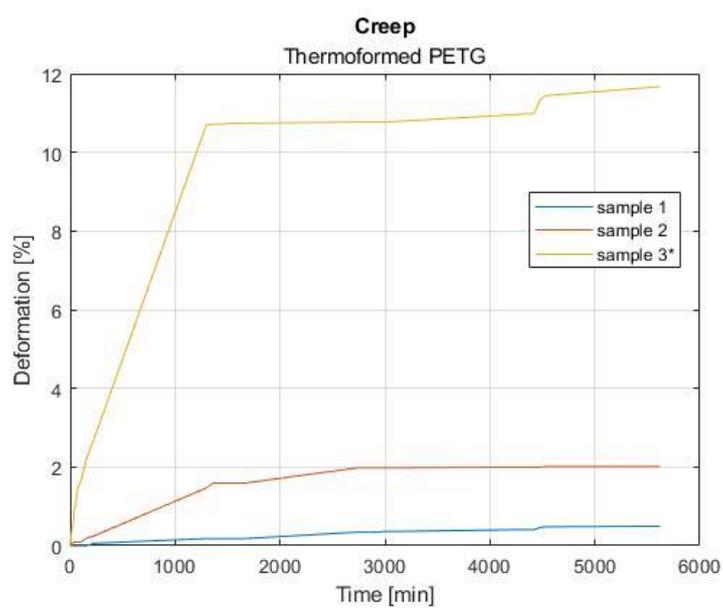


Figura 50. Grafici test di creep PETG termoformato.

- TC-85DAC

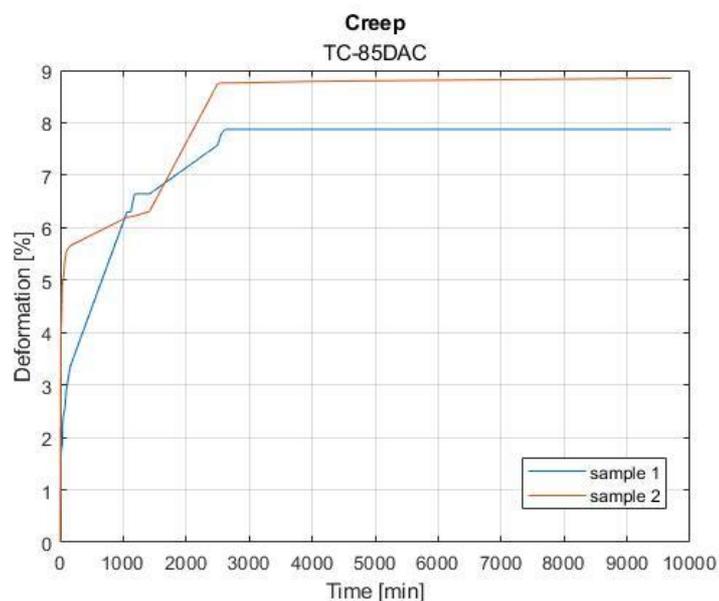


Figura 51. Grafici test di creep TC-85DAC.

Le prove di creep sono state effettuate per osservare il comportamento del materiale dopo un certo tempo di utilizzo.

Nonostante i test effettuati siano da considerare come test preliminari a causa del numero limitato di campioni e della tecnica utilizzata non troppo standardizzata, globalmente è possibile fare alcune considerazioni.

I grafici relativi al TC-85 sono entrambi relativi al comportamento del materiale sottoposto ad uno stress di 1 N poiché l'80% del carico massimo di questo materiale coincide con il carico che si ottiene durante il trattamento ortodontico. Osservando i due grafici è possibile notare che è presente una prima deformazione e poi il grafico si assesta e raggiunge una stabilità, ovvero è presente un plateau e non c'è una parte continua. Questo comportamento del materiale è riconducibile al modello del solido standard, ovvero un modello in cui non è presente lo smorzatore da solo, quindi la componente viscosa da sola.

I grafici relativi al PETG sono entrambi relativi al comportamento del materiale sottoposto ad uno stress di circa 16 N, ovvero l'80% del carico massimo. Osservando i grafici relativi al PETG si nota una grande differenza nell'andamento della curva; in particolare, quest'ultima non si assesta ma continua a crescere e questo significa che il PETG ha una componente viscosa più predominante. Questo comportamento del materiale è

riconducibile al modello di Burger, ovvero un comportamento in cui prosegue il creep ed è infatti presente un tratto con una pendenza costante. In questo modello è infatti presente uno smorzatore in serie.

Due dei grafici relativi al PETG termoformato sono invece relativi al comportamento del materiale sottoposto ad uno stress di circa 1 N, mentre l'ultimo è relativo a un carico corrispondente all'80% del carico massimo, ovvero 6 N. Osservando i grafici relativi al PETG termoformato si possono notare delle differenze. È presente una variabilità di test a causa della quale sarebbe necessario effettuare ulteriori analisi sperimentali. In particolare, il primo campione sembra andare avanti nella deformazione e questo potrebbe portare a ipotizzare la presenza di un creep lungo, come si vede nel caso del PETG prima del trattamento termico.

Se osserviamo i grafici relativi al TC-85DAC e al PETG termoformato è possibile notare una deformazione maggiore del primo a parità di stress. Nell'ambito dell'applicazione ortodontica questo implica che, a parità di deformazione, un allineatore TC-85DAC trasmette al dente tensioni meno elevate di un allineatore PETG e che per imprimere forze maggiori potrebbe essere necessario quindi aumentare lo spessore.

6.5. Risultati analisi termica

- PETG

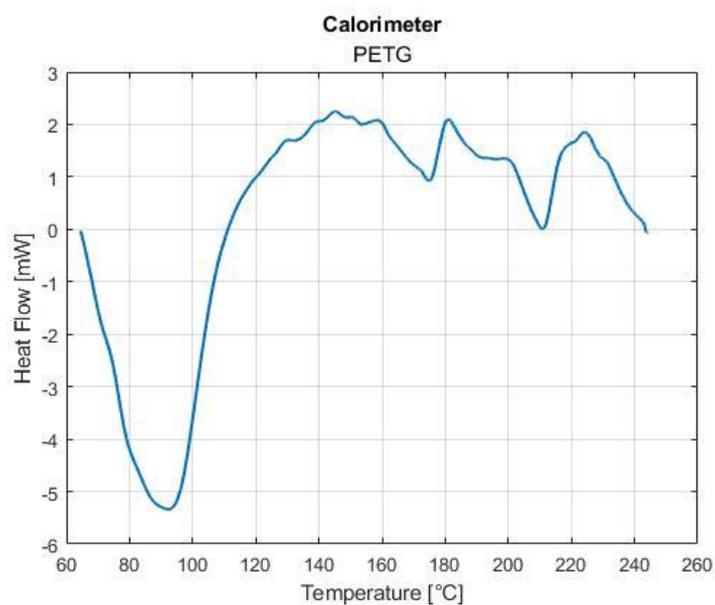


Figura 52. Grafico calorimetro PETG.

- PETG termoformato

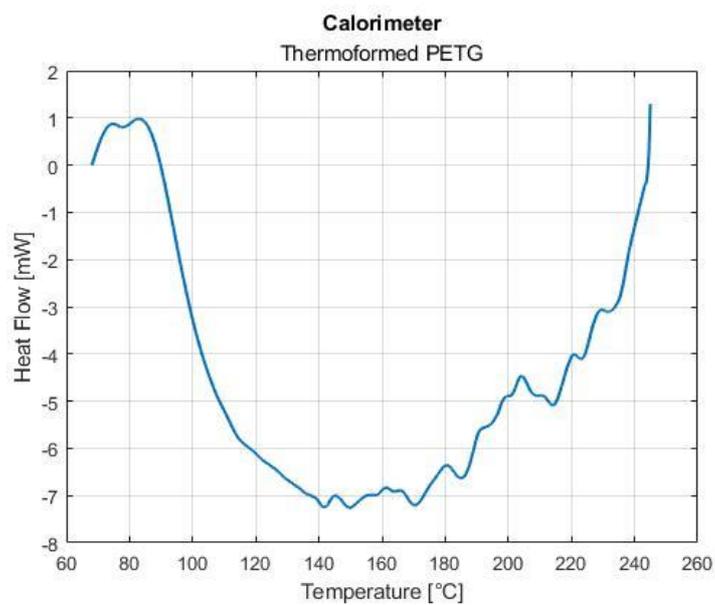


Figura 53. Grafico calorimetro PETG termoformato.

- TC-85DAC

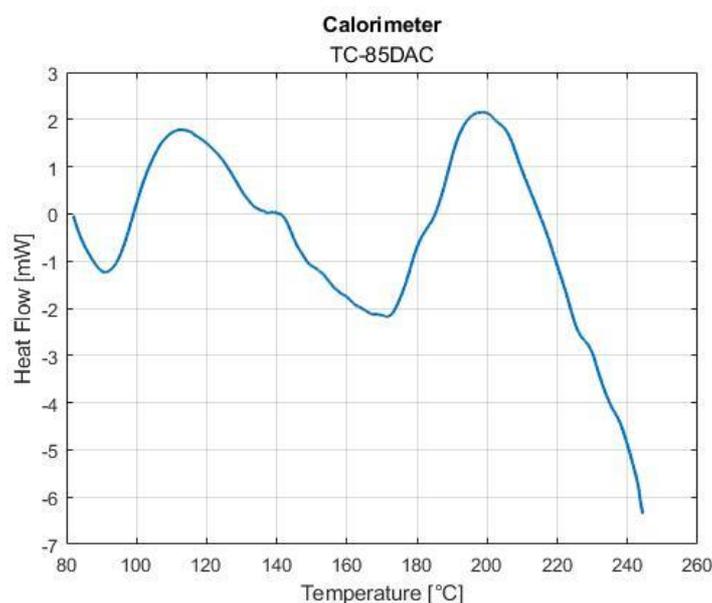


Figura 54. Grafico calorimetro TC-85.

È stata riscontrata una certa difficoltà di analisi in quanto le prove sono state svolte molto lentamente a causa dell'inerzia termica del calorimetro. La struttura fa variare molto lentamente la temperatura e questo comporta un aumento della durata delle prove.

Il segnale risulta quindi essere poco significativo ma globalmente è possibile arrivare ad alcune conclusioni.

Le curve ottenute sono state inoltre elaborate attraverso l'utilizzo del software Matlab. I dati ricavati in uscita dal software SETSOFT sono rappresentativi della curva di riscaldamento e di raffreddamento del materiale; è stato scelto però di eliminare la seconda in quanto non significativa.

In particolare, osservando la curva relativa al PETG, è possibile osservare due picchi, ovvero due transizioni vetrose, rispettivamente a 175°C e a 210°C. Nel primo tratto, invece, è possibile notare un picco endotermico che potrebbe essere dovuto alla perdita di una sostanza volatile o all'umidità, quindi il materiale assorbe umidità e poi evapora.

Osservando il grafico relativo al PETG termoformato non si notano invece transizioni vetrose, non vi sono salienti variazioni nell'andamento e il dato sembra essere quasi rumore.

La curva del TC-85 è invece tipica di un materiale fortemente amorfo. Questo si può notare dal fatto che non è presente un picco evidente ma è visibile, invece, un abbassamento dolce della curva con un picco a 170°C, e questo è dovuto a un rammollimento del materiale. A 140°C è visibile una probabile transizione vetrosa, data dalla discontinuità della curva. La fusione potrebbe essere a 170°C.

La differenza sostanziale tra il comportamento del PETG e del TC-85 è che il primo, a parte le discontinuità, è abbastanza dritto, nell'altro, invece, si può facilmente notare un rigonfiamento, una sorta di pancia, proprio dovuta al rammollimento del materiale.

7. Conclusioni e possibili sviluppi futuri

Il lavoro di tesi si è concentrato principalmente sulla caratterizzazione meccanica e microstrutturale di tre materiali al fine di poter analizzare le differenze e quindi i potenziali vantaggi di una nuova resina a memoria di forma, ovvero il TC-85.

I risultati hanno evidenziato materiali con buone proprietà meccaniche. In particolare, a partire dai test meccanici a trazione effettuati non sono emerse grandi differenze tra il PETG e il PETG termoformato. Sembra quindi che il processo di termoformatura non crei alterazioni significative nelle proprietà meccaniche del materiale. È possibile notare però che a flessione il modulo del PETG termoformato risulta essere inferiore; sembra quindi che il trattamento termico renda il materiale meno rigido ma questo non si nota nei test a trazione. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che la trazione è una prova pura mentre la flessione è una combinazione tra trazione e compressione.

Sono emerse, invece, alcune differenze con il TC-85, in particolare questo materiale risulta avere un modulo elastico abbastanza elevato ma comunque inferiore rispetto al PETG. Il materiale è quindi un po' meno rigido del polimero termoplastico ma questo potrebbe essere un fattore positivo legato all'applicazione ortodontica in quanto potrebbe far sì che la mascherina si adatti al meglio.

Dai risultati relativi al test di creep è emerso che nel TC-85 è predominante la componente elastica perché l'andamento si assesta e non continua a deformarsi in modo costante. Nel PETG, invece, è presente una componente viscosa che fa sì che il materiale continui a deformarsi nel tempo in modo costante. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che il primo materiale ha memoria di forma. Questa caratteristica del PETG sarebbe uno svantaggio nell'applicazione ortodontica poiché vorrebbe dire che il materiale si rilassa dopo un certo tempo e quindi perde in termini di efficienza.

I risultati relativi al PETG termoformato sono soggetti a una grande variabilità dovuta anche al trattamento termico e dipendente, quindi, da come viene effettuata la termoformatura soprattutto nel nostro caso dato che è stata effettuata in laboratorio e non a livello industriale dove la procedura risulta maggiormente standardizzata.

La deformazione maggiore del TC-85 rispetto al PETG termoformato a parità di stress potrebbe essere un vantaggio poiché vuol dire che non crea sovratensioni a livello della struttura del dente.

Complessivamente il TC-85 sembra essere un materiale che permette di riprodurre le caratteristiche meccaniche di una mascherina tradizionale termostampata. A parità di spessore non sembrano esserci grandi differenze nelle proprietà meccaniche, anche se la questione sarebbe da esplorare ulteriormente. Un grande vantaggio è però quello che questo materiale e la tecnologia della stampa 3D possono rendere autonomo l'odontoiatra nel processo di produzione, stampa e gestione del caso, senza dover dipendere dalle grandi case produttrici.

In futuro sarà utile effettuare ulteriori test di creep al fine di avere un numero maggiore di campioni e sufficienti al fine di ottenere dati statistici.

Un ulteriore interessante studio sarebbe effettuare un modello agli elementi finiti per valutare le forze localizzate sull'allineatore e verificare anche l'influenza degli spessori dell'allineatore sulla forza esercitata.

8. Bibliografia

- [1] C. Nanni e A. Fini, *Fisiopatologia dell'apparato stomatognatico; Implantoprotesi, Ortognatodonzia*, Milano: Franco Lucisano, 1996.
- [2] C. Nanni e A. Fini, *Biomeccanica dell'apparato stomatognatico; Protesi, Ortognatodonzia*, Milano: Franco Lucisano, 1999.
- [3] I. Tafala, F. Bourzgui, M. B. Othmani e M. Azmi, «Automatic Classification of Malocclusion,» *Procedia Computer Science*, vol. 210, pp. 301-304, 2022.
- [4] J. Baskaradoss, A. Geevarghese, W. Alsaadi, A. H. Alemam, A. Alghaihab, A. S. Almutairi e A. Almthen, «The impact of malocclusion on the oral health related quality of life of 11–14-year-old children,» *BMC Pediatr*, vol. 22, n. 91, 2022.
- [5] H. Panchez e L. Bondemark, «The bite-type malocclusion classification – An extended Angle-method. Is the new classification reliable?,» *APOS Trends Orthod*, vol. 11, n. 2, pp. 100-105, 2021.
- [6] A. De Benedetto, A. Buttieri e L. Galli, *Manuale di laboratorio odontotecnico*, Milano: Franco Lucisano, 2009.
- [7] P. H., «The bite type-an extended angle classification. Presentation of a new method.,» *Kieferorthopädie*, vol. 32, pp. 31-6, 2018.
- [8] G. L. Granja, V. M. M. Bernardino, L. C. M. Lima, L. J. S. Araújo, M. J. A. L. L. A. Arruda, F. M. Ferreira, S. M. Paiva e A. F. Granville-Garcia, «Orofacial dysfunction, nonnutritive sucking habits, and dental caries influence malocclusion in children aged 8-10 years,» *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 162, n. 4, pp. 502-509, 2022.
- [9] N. Cenzato, A. Nobili e C. Maspero, «Prevalence of Dental Malocclusions in Different Geographical Areas: Scoping Review,» *Dent J (Basel)*, vol. 9, n. 117, 2021.
- [10] G. Lombardo, F. Vena, P. Negri, S. Pagano, C. Barilotti, L. Paglia, S. Colombo, M. Orso e S. Cianetti, «Worldwide prevalence of malocclusion in the different stages of dentition: A systematic review and meta-analysis,» *European Journal of Paediatric Dentistry*, vol. 21, n. 2, pp. 115-122, 2020.

- [11] [Online]. Available: <https://www.dentistapenengo.it/cura-dei-denti/malocclusione-dentale-conseguenze-tipologie-e-come-intervenire>.
- [12] C. Bellot-Arcís, J. M. Montiel-Company e J. M. Almerich-Silla, «Psychosocial impact of malocclusion in Spanish adolescents.,» *Korean J Orthod*, vol. 43, pp. 193-200, 2013.
- [13] I. O. Akpasa, T. A. Yemitan, B. O. Ogunbanjo e A. Oyapero, «Impact of severity of malocclusion and self-perceived smile and dental aesthetics on self-esteem among adolescents,» *Journal of the World Federation of Orthodontists*, vol. 11, n. 4, pp. 120-124, 2022.
- [14] C. Casavola, G. Pappalettera, C. Pappalettere, M. Patronelli, G. Renna, M. Laurenziello e D. Ciavarella, «A full-field DIC analysis of the mechanical-deformation behavior of polyethylene terephthalate glycol (PET-G) aligners,» *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 134, 2022.
- [15] H. G. Jeremiah, D. Bister e J. T. Newton, «Social perceptions of adults wearing orthodontic appliances: a cross-sectional study,» *European Journal of Orthodontics*, vol. 33, n. 5, pp. 476-482, 2011.
- [16] M. Macrì, G. Murmura, G. Varvara, T. Traini e F. Festa, «Clinical Performances and Biological Features of Clear Aligners Materials in Orthodontics,» *Frontiers in Materials*, vol. 9, 2022.
- [17] Y. M. Bichu, A. Alwafi, X. Liu, J. Andrews, B. Ludwig, A. Y. Bichu e B. Zou, «Advances in orthodontic clear aligner materials,» *Bioactive Materials*, vol. 22, n. 2023, pp. 384-403, 2022.
- [18] J. Hartshorne e M. B. Wertheimer, «Emerging insights and new developments in clear aligner therapy: A review of the literature,» *AJO-DO Clinical Companion*, vol. 2, n. 4, pp. 311-324, 2022.
- [19] T. Krastev, M. Payer, Z. Krastev, J. F. P. Cardelles, A. Vegh, D. Banyai, Z. Geczi e D. Vegh, «The Utilisation of CAD/CAM Technology Amongst Australian Dentists: A Pilot Study,» *Interantional Dental Journal*, 2022.
- [20] X. Yu, G. Li, Z. Y, J. Gao, Y. Fu, Q. Wang, L. Huang, X. Pan e J. Ding, «‘Invisible’ orthodontics by polymeric ‘clear’ aligners molded on 3D-printed personalized dental models,» *Regenerative Biomaterials*, vol. 9, 2022.

- [21] P. Jindal, M. Juneja, F. L. Siena, D. Bajaj e P. Breedon, «Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners,» *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 156, n. 5, pp. 694-701, 2019.
- [22] G. M. Tartaglia, A. Mapelli, C. Maspero, T. Santaniello, M. Serafin, M. Farronato e A. Caprioglio, «Direct 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Current State and Future Possibilities.,» *Materials (Basel)*, vol. 14, n. 7, 2021.
- [23] N. Panayi, J. Y. Cha e K. B. Kim, «3D Printed Aligners: Material Science, Workflow and Clinical Applications,» *Seminars in Orthodontics*, vol. 29, n. 1, pp. 25-33, 2023.
- [24] N. Koenig, J. Y. Choi, J. McCray, A. Hayes, P. Schneider e K. B. Kim, «Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners,» *Korean J Orthod*, vol. 52, n. 4, pp. 249-257, 2022.
- [25] S. Zinelis, N. Panayi, G. Polychronis, S. N. Papageorgiou e T. Eliades, «Comparative analysis of mechanical properties of orthodontic aligners produced by different contemporary 3D printers,» *Orthodontics & Craniofacial Research*, vol. 25, n. 3, pp. 336-341, 2021.
- [26] L. Lombardo, E. Martines, V. Mazzanti, A. Arreghini, F. Mollica e G. Siciliani, «Stress relaxation properties of four orthodontic aligner materials: A 24-hour in vitro study,» *Angle Orthodontist*, vol. 87, n. 1, pp. 11-18, 2017.
- [27] I. Pratto, M. C. A. Busato e P. R. S. Bittencourt, «Thermal and mechanical characterization of thermoplastic orthodontic aligners discs after molding process,» *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 126, 2022.
- [28] D. J. Krzyppow e C. M. Rimnac, «Cyclic steady state stress–strain behavior of UHMW polyethylene,» *Biomaterials*, vol. 21, n. 20, pp. 2081-2087, 2000.
- [29] [Online]. Available: <https://www.materieplastiche.eu/arnite.html>.
- [30] [Online]. Available: https://www.materie-plastiche.com/documenti-pdf/allegati/8.%20PETG_DEFINITIVO.PDF.
- [31] [Online]. Available: <https://www.materieplastiche.eu/images/documenti/schede-tecniche-polipropilene-pp.pdf>.
- [32] [Online]. Available: https://www.plasting.biz/images/prodpdf/en/note_tecniche_pc_en.pdf.

- [33] R. B. Dupaix e M. C. Boyce, «Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG),» *Polymer*, vol. 46, n. 13, pp. 4827-4838, 2005.
- [34] S. Y. Lee, H. Kim, H. J. Kim, C. J. Chung, Y. J. Choi, S. J. Kim e J. Y. Cha, «Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners,» *Scientific Reports*, vol. 12, n. 6246, 2022.
- [35] [Online]. Available: <https://yenco.it/wp-content/uploads/2022/03/scheda-tecnica-TeraHarz-TC-85DAC-REV02.pdf>.
- [36] L. Sun, W. M. Huang, Z. Ding, Y. Zhao, C. C. Wang, H. Purnawali e C. Tang, «Stimulus-responsive shape memory materials: A review,» *Materials & Design*, vol. 33, pp. 577-640, 2012.
- [37] X. Wu, W. M. Huang, Y. Zhao, Z. Ding, C. Tang e J. Zhang, «Mechanisms of the Shape Memory Effect in Polymeric Materials,» *Polymers*, vol. 5, n. 1169-1202, 2013.