



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

**VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITA' AMBIENTALE E  
DELLE PRESTAZIONI MECCANICHE DI UN PROCESSO DI  
MANIFATTURA AVANZATA**

EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY AND  
MECHANICAL PERFORMANCE OF AN ADVANCED MANUFACTURING  
PROCESS

Tesi Sperimentale

Relatore

Prof. Alessio Vita

Studente

Luca Ferranti

A.A 2021/2022

# INDICE

Lista Figure.....	3
Lista Tabelle.....	5
INTRODUZIONE.....	7
CAPITOLO 1 STAMPA 3D.....	7
1.1 Applicazioni.....	8
1.2 Modellazione a deposizione fusa (FDM).....	8
1.3 Trattamento di ricottura nella stampa 3D.....	9
CAPITOLO 2 MATERIALI COMPOSITI.....	11
2.1 Materiali compositi definizione e applicazione.....	11
2.2 Carbon-peek definizione, uso e applicazione.....	11
2.2.1 Caratteristiche principali.....	12
CAPITOLO 3 ANALISI LCA.....	13
3.1 Life-cycle assesment: definizione.....	13
3.2 Metodi e vantaggi.....	13
3.3 Passaggi.....	14
CAPITOLO 4 ANALISI LCC.....	14
4.1 Analisi dei costi del ciclo di vita (Life-cycle costing).....	14
CAPITOLO 5 TEST DI TRAZIONE.....	15
5.1 Test di trazione uniassiale.....	15
5.2 Parametri Test di trazione.....	15
CAPITOLO 6 METODOLOGIE.....	16
6.1 Stampante utilizzata.....	16
6.2 Parametri di processo.....	17
6.3 Procedura Stampaggio provino.....	18
6.4 Prove di trazione.....	21
6.4.1 Procedura.....	22
6.4.2 Modellazione risultati prove di trazione.....	23
6.4.3 Risultati grafici delle prove di trazione.....	24
6.4.3.1 Provini senza ricottura.....	24
6.4.3.2 Provini con ricottura in macchina a 380°C.....	32
6.4.3.3 Provini con ricottura in forno a 200°C.....	39
6.5 Valutazione dell’impatto ambientale.....	45
6.5.1 SimaPro.....	45
6.5.2 Scenari.....	47
6.5.3 Unità funzionale.....	47

6.5.4 Fasi considerate.....	47
6.5.5 Life-cycle Inventory.....	47
6.6 Valutazione dell'impatto Economico.....	53
6.6.1 Costo unitario in base al volume di produzione.....	56
CAPITOLO 7 RISULTATI.....	57
7.1 Risultati prove di trazione.....	57
7.2 Risultati LCA.....	60
7.3 Risultati LCC.....	62
7.4 Risultati totali in valore percentuale.....	63
CAPITOLO 8 CONCLUSIONI.....	64
BIBLIOGRAFIA.....	65
RINGRAZIAMENTI.....	65

## LISTA FIGURE

Figura 1. Pezzo prima della ricottura.....	10
Figura 2. Pezzo dopo la ricottura.....	10
Figura 3. Provino per test di trazione carbon-peek .....	12
Figura 4. Filamento carbon-peek.....	12
Figura 5. Stampante 3D CreatBot Peek-300 laboratorio FermoTech.....	17
Figura 6. Provino in carbon-peek con forma "a osso di cane".....	18
Figura 7. Parte laterale della stampante dove viene inserito il filamento di materiale.....	19
Figura 8. Colla "Magigoo Pro Ht".....	19
Figura 9. Stampa provino vista lateralmente.....	20
Figura 10. Stampa provino vista dall'alto.....	20
Figura 11. Ricottura di 3 provini in forno a 200°C.....	20
Figura 12. Strumento di misurazione di potenza elettrica.....	21
Figura 13. Macchina per prova universale di trazione.....	21
Figura 14. Misurazione provino con Micrometro.....	22
Figura 15. Provino durante il test di trazione; al centro si può notare il punto di rottura.....	22
Figura 16. Estensometro.....	23
Figura 17. Grafico modulo di Young provino nr1.....	25
Figura 18. Grafico Sigma snervamento provino nr1.....	25
Figura 19. Grafico curva Tensione provino nr1.....	26
Figura 20. Rottura provino nr1 in seguito al test di trazione.....	26
Figura 21. Grafico modulo di Young provino nr2.....	28
Figura 22. Grafico Sigma snervamento provino nr2.....	28
Figura 23. Grafico curva Tensione provino nr2.....	28
Figura 24. Rottura provino nr2 in seguito al test di trazione.....	29

Figura 25. Grafico modulo di Young provino nr3.....	30
Figura 26. Grafico Sigma snervamento provino nr3.....	30
Figura 27. Grafico curva tensione provino nr3.....	31
Figura 28. Rottura provino nr1 in seguito al test di trazione.....	31
Figura 29. Grafico modulo di Young provino ricmac1.....	33
Figura 30. Grafico Sigma snervamento provino ricmac1.....	33
Figura 31. Grafico curva tensione provino ricmac1.....	33
Figura 32. Rottura provino ricmac1 in seguito al test di trazione.....	34
Figura 33. Grafico modulo di Young provino ricmac2.....	35
Figura 34. Grafico Sigma snervamento provino ricmac2.....	35
Figura 35. Grafico curva tensione provino ricmac2.....	35
Figura 36. Rottura provino ricmac2 in seguito al test di trazione.....	36
Figura 37. Grafico modulo di Young provino ricmac3.....	37
Figura 38. Grafico Sigma snervamento provino ricmac3.....	37
Figura 39. Grafico curva tensione provino ricmac3.....	38
Figura 40. Rottura provino ricmac3 in seguito al test di trazione.....	38
Figura 41. Grafico modulo di Young provino ricforno1.....	40
Figura 42. Grafico Sigma snervamento provino ricforno1.....	40
Figura 43. Grafico curva tensione provino ricforno1.....	40
Figura 44. Rottura provino ricforno1 in seguito al test di trazione.....	41
Figura 45. Grafico modulo di Young provino ricforno2.....	42
Figura 46. Grafico Sigma snervamento provino ricforno2.....	42
Figura 47. Grafico curva tensione provino ricforno2.....	42
Figura 48. Rottura provino ricforno2 in seguito al test di trazione.....	43
Figura 49. Grafico modulo di Young provino ricforno3.....	44
Figura 50. Grafico Sigma snervamento provino ricforno3.....	44
Figura 51. Grafico curva tensione provino ricforno3.....	45
Figura 52. Rottura provino ricforno3 in seguito al test di trazione.....	45
Figura 53. Diagramma ad albero processo di stampa provino senza ricottura. SimaPro.....	48
Figura 54. Diagramma ad albero stampa con ricottura in macchina. SimaPro.....	49
Figura 55. Diagramma ad albero stampa con ricottura in forno. Simapro.....	49
Figura 56. Valore trasporto carbon-peek per la stampa di 1 provino.....	50
Figura 57. Valore trasporto colla per la stampa di 1 provino.....	50
Figura 58. Andamento del costo unitario in base al volume di produzione.....	57
Figura 59. Punto di rottura dei diversi provini a seguito del test di trazione.....	58
Figura 60. Istogramma Modulo di Young Medio.....	58
Figura 61. Istogramma Sigma max medio.....	59
Figura 62. Istogramma sigma snervamento medio.....	59

Figura 63. Istogramma Parametri in valore percentuale resistenza meccanica.....	60
Figura 64. Istogramma contributo GWP100 dei diversi processi aggregati.....	61
Figura 65. Istogramma contributo CED dei diversi processi aggregati.....	62
Figura 66. Istogramma costi energia.....	62
Figura 67. Istogramma costi totali.....	63

## LISTA TABELLE

Tabella 1. Consumi energetici stampante 3D.....	18
Tabella 2. Valori snervamento provino no ricottura 2.....	23
Tabella 3. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino nr1.....	24
Tabella 4. Valori deformazione e tensione di snervamento provino nr1.....	25
Tabella 5. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino nr1.....	26
Tabella 6. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino nr2.....	27
Tabella 7. Valori deformazione e tensione di snervamento provino nr2.....	27
Tabella 8. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino nr2.....	29
Tabella 9. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino nr3.....	29
Tabella 10. Valori deformazione e tensione di snervamento provino nr3.....	30
Tabella 11. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino nr3.....	31
Tabella 12. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricmac1.....	32
Tabella 13. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricmac1.....	32
Tabella 14. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino ricmac1.....	34
Tabella 15. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricmac2.....	34
Tabella 16. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricmac2.....	35
Tabella 17. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino ricmac2.....	36
Tabella 18. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricmac3.....	36
Tabella 19. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricmac3.....	37
Tabella 20. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino ricmac3.....	38
Tabella 21. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricforno1.....	39
Tabella 22. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricforno1.....	39
Tabella 23. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e sigma massima provino ricfrorno1.....	40
Tabella 24. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricforno2.....	41

Tabella 25. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricorno2.....	42
Tabella 26. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e sigma massima provino ricorno2.....	43
Tabella 27. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricorno3.....	43
Tabella 28. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricorno3.....	44
Tabella 29. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e sigma massima provino ricorno3.....	45
Tabella 30. GWP100 stampa con e senza ricottura + colla.....	51
Tabella 31. CED stampa con e senza ricottura + colla.....	51
Tabella 32. GWP100 trasporto Carbon-peek.....	51
Tabella 33. CED trasporto Carbon-peek.....	51
Tabella 34. GWP100 trasporto colla.....	51
Tabella 35. CED trasporto colla.....	52
Tabella 36. CED Stampa con ricottura in forno.....	52
Tabella 37. GWP100 Stampa con ricottura in forno.....	52
Tabella 38. Valori Intensità energetica per produrre 1 kg di CF e Peek presi da letteratura scientifica [1].....	52
Tabella 39. Peso di ciascun materiale per la stampa di 1 provino.....	53
Tabella 40. Calcolo E <sub>i</sub> peek e CF.....	53
Tabella 41. CED per la produzione di 1 kg di CF.....	53
Tabella 42. GWP100 Peek e CF per la produzione di 1 provino.....	53
Tabella 43. CED Peek e CF per la produzione di 1 provino.....	53
Tabella 44. Dati e costi per la prova sperimentale.....	54
Tabella 45. Costi di utilizzo della macchina.....	55
Tabella 46. Costi totali di produzione.....	55
Tabella 47. Volume di produzione in relazione ai costi.....	56
Tabella 48. Risultati prove di trazione.....	48
Tabella 49. Valori medi dei parametri del test di trazione.....	58
Tabella 50. Valori (E, sigma s, sigma max) messi a confronto con quello massimo.....	59
Tabella 51. Provini con maggiori prestazioni meccaniche.....	60
Tabella 52. Provini con maggiori prestazioni meccanica espressi in valori percentuali.....	60
Tabella 53. Risultati GWP100 dei tre diversi provini.....	60
Tabella 54. Risultati CED dei tre diversi provini.....	61
Tabella 55. Valori aggregati GWP100.....	61
Tabella 56. Valori aggregati CED.....	62
Tabella 57. Tabella dei costi totali.....	62
Tabella 58. Tabella contributi percentuali LCA, LCC e Prove di trazione.....	63

# INTRODUZIONE

Il processo di manifattura avanzata da me trattato è la stampa tridimensionale di un determinato materiale composito, il carbon-peek. Nel corso delle procedure sperimentali ho avuto modo di studiare molto accuratamente il materiale per capirne le caratteristiche e le proprietà fondamentali. Una volta assimilate le caratteristiche tecniche e le proprietà chimiche di questo materiale ho contestualizzato il suo utilizzo tramite il processo di stampa 3D, ho stampato diversi provini per andare a valutare la sostenibilità ambientale tramite il metodo LCA (lifecycle assesment) e la sostenibilità economica tramite il metodo LCC (Lifecycle cost). Dopodiché mi sono concentrato nello studio delle proprietà meccaniche del materiale tramite delle prove di trazione.

Una volta conosciute sia le caratteristiche ambientali, economiche e meccaniche le ho messe a confronto separando 3 diversi casi di studio: provino stampato senza il processo di ricottura, provino stampato con ricottura in macchina a 380°C e provino stampato con ricottura in un forno esterno a 200 °C.

Una volta arrivato ai risultati finali ho potuto trarre le mie conclusioni su questo processo sperimentale

## CAPITOLO 1

### STAMPA 3D

La stampa 3D prevede la produzione di oggetti tridimensionali mediante il processo di manifattura additiva: tecnica che consiste nell'aggiunta di uno strato sopra l'altro fino ad arrivare all'oggetto desiderato; il tutto partendo da un modello 3D digitale sviluppato con degli appositi software dedicati. Il macchinario che svolge l'operazione di stampaggio 3D è detto: stampante 3D.

Esistono diverse tecnologie per la stampa 3D e la loro principale differenza ha a che fare con il modo in cui vengono stampati i diversi strati. Alcuni metodi, come la sinterizzazione laser selettiva (SLS) e la modellazione a deposizione fusa (FDM), utilizzano il calore per fondere, sinterizzare o ammorbidire i materiali (solitamente prodotti da una sorgente di radiazione elettromagnetica o da un raggio di elettroni) per creare strati, mentre altri stabiliscono materiale liquido indurito con diverse tecniche. Nel caso dei sistemi di laminazione, ci sono strati sottili che vengono tagliati a seconda della forma e uniti tra loro.

Ogni metodo ha i suoi vantaggi e svantaggi, quindi alcune aziende offrono una scelta tra polveri e polimeri come materiale con cui sono realizzati gli oggetti. Tipicamente, i principali fattori considerati sono la velocità, il costo di stampa del prototipo, il costo della stampante 3D, la scelta dei materiali, i colori disponibili.

### **1.1 Applicazioni**

La stampa 3D è comunemente utilizzata per la visualizzazione di modelli, la prototipazione CAD, la fusione di metalli, l'architettura, l'istruzione, l'ingegneria geospaziale, l'assistenza sanitaria e l'intrattenimento al dettaglio. Altre applicazioni includono la ricostruzione di fossili in paleontologia, la replica di antichi manufatti inestimabili in archeologia, la ricostruzione di ossa e parti del corpo in medicina legale e la ricostruzione di prove gravemente danneggiate ottenute dalle indagini sulla scena del crimine. Utilizzando speciali processi di scansione e stampa 3D, è possibile riprodurre anche beni di patrimonio culturale. Recentemente, è stato suggerito di utilizzare la tecnologia di stampa 3D per l'espressione artistica. Gli artisti utilizzano le stampanti 3D in vari modi.

Le aziende e le accademie biotecnologiche stanno attualmente ricercando la tecnologia di stampa 3D per costruire organi e parti del corpo (protesi) utilizzando la tecnologia a getto d'inchiostro nelle applicazioni di ingegneria dei tessuti. Strati di cellule viventi si depositano sul mezzo gelatinoso, accumulandosi lentamente per formare strutture tridimensionali. Vari termini sono stati usati per riferirsi a questo campo di studio: stampa organica, bioprinting e ingegneria dei tessuti assistita da computer, tra gli altri. La stampa 3D consente sostituzioni dell'anca personalizzate in un solo passaggio, con la porzione sferica dell'articolazione posizionata permanentemente nella cavità articolare e, anche con le attuali risoluzioni di stampa, l'unità non richiede la lucidatura.

Esistono anche stampanti 3D in grado di utilizzare materiali additivi. Stampanti di questo tipo aiutano l'ecologia del nostro pianeta perché consentono di produrre cibo in completa autonomia, eliminando le emissioni di carbonio del trasporto alimentare.

Per quanto riguarda il campo della farmacologia, vengono implementate soluzioni che consentono la creazione di farmaci personalizzati. Infatti, un gruppo di ricercatori di Preston (Regno Unito) ha creato una stampante 3D in grado non solo di stampare le stesse pillole di altre pillole esistenti, ma anche di creare medicine personalizzate per ogni paziente.

### **1.2 Modellazione a deposizione fusa (FDM)**

La modellazione a deposizione fusa, FFF o FDM in breve, è una tecnica di produzione additiva comunemente utilizzata per applicazioni di modellazione, prototipazione e produzione da file CAD.



FDM realizza il principio di "addizione" rilasciando il materiale in strati. Il filamento termoplastico viene svolto da una bobina che fornisce il materiale ad un ugello di estrusione, consentendo il controllo del flusso. L'ugello è riscaldato per poter fondere il materiale e può essere guidato orizzontalmente e verticalmente da un meccanismo CNC, cioè seguendo un percorso tracciato dal software di slicing, inviato alla macchina sotto forma di G-code. Per facilitare l'adesione di determinati materiali al piano di stampa, si ricorre spesso all'utilizzo di superfici riscaldate o di additivi per contrastare la compressione provocata dal raffreddamento del materiale. Alcune macchine consentono di stampare materiali compositi, ad esempio depositando insieme al polimero classico anche Fibra di Carbonio o altri materiali. Con la tecnologia FDM è possibile lavorare una varietà di polimeri termoplastici, i più comuni dei quali sono PLA, ABS, NYLON o PET. Il TPU ha proprietà elastiche e può stampare parti flessibili. È possibile stampare anche polimeri di qualità tecnica come PEEK e PEI. È possibile utilizzare materiali di supporto solubili in acqua come il PVA. Esistono dei filamenti compositi, costituiti da una matrice polimerica e caricati con fibre, filamenti caricati di metallo che stampano come materiali normali e richiedono un processo di post-sinterizzazione in cui la matrice termoplastica evapora, lasciando una parte completamente metallica.

Questi materiali sono generalmente venduti in bobine di filamento (diametri standard di 1,75 mm o 2,85 mm). Alcune macchine, soprattutto quelle più grandi, utilizzano polimeri in pellet, che sono molto più economici e in alcuni casi provengono dal riciclo della plastica.

### **1.3 Trattamento di ricottura nella stampa 3D**

È noto che la stampa 3D può produrre un'ampia gamma di parti con forme, dimensioni e proprietà complesse. Tuttavia, il trattamento di ricottura ad alta temperatura (HTA) è uno dei passaggi più importanti nel processo di stampa 3D per la produzione di parti affidabili e durevoli.

Il trattamento di ricottura è un processo utilizzato in diversi settori allo scopo di migliorare le proprietà fisiche di un materiale. Viene anche indicato come trattamento termico, riscaldamento, tempra o rinvenimento. Il trattamento di ricottura è spesso utilizzato nella produzione e lavorazione di metalli, leghe e materie plastiche. Il processo aumenta la tenacità, la flessibilità e l'elasticità del materiale alterando la struttura cristallina della microstruttura.

Ci sono una serie di vantaggi nell'utilizzo del trattamento di ricottura nella stampa 3D. Il processo può essere utilizzato per migliorare la stabilità dimensionale della stampa, aumentare la resistenza

e la rigidità del materiale e aumentare la resistenza all'usura. Inoltre, il trattamento di ricottura può essere utilizzato per migliorare il colore e la finitura della stampa.

Ci sono, ovviamente, anche una serie di svantaggi nell'utilizzo del trattamento di ricottura nella stampa 3D. Il processo può richiedere molto tempo e può richiedere attrezzature speciali. Inoltre, le temperature richieste per ottenere i risultati desiderati possono essere estreme e danneggiare la stampante o il materiale in lavorazione con consumi energetici maggiori.

La decisione di utilizzare il trattamento di ricottura nella stampa 3D è in definitiva una decisione basata sulle esigenze specifiche del materiale in lavorazione. Nella maggior parte dei casi, tuttavia, il trattamento di ricottura fornirà vantaggi che superano gli svantaggi.

Usato per:

- Ottimizzazione della cristallinità;
- Sollievo dallo stress residuo dovuto al ritiro del pezzo da qualsiasi lavorazione;
- Migliore stabilità dimensionale a temperature elevate.

Le prestazioni delle parti in PEEK stampate con la tecnologia FFF 3D possono essere ulteriormente migliorate con le stesse procedure di ricottura consigliate per le parti stampate a iniezione, tra cui:

- Riscaldare l'assieme fino a raggiungere una temperatura di equilibrio di 200 °C;
- Tenere l'elemento ad una temperatura di ricottura di 200°C (il tempo di mantenimento dell'elemento dipende dallo spessore della parete);
- Tenere il pezzo a 200°C per 1 ora per mm di spessore della parete;
- Lasciare raffreddare il pezzo a 140°C a una velocità di 10°C all'ora (il raffreddamento lento è fondamentale per ridurre al minimo lo stress residuo nel materiale); Spegnere il forno e lasciate raffreddare i componenti a temperatura ambiente.



Figura 1. Pezzo prima della ricottura

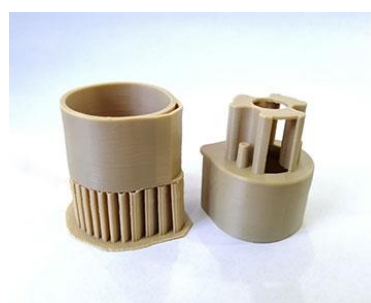


Figura 2. Pezzo dopo la ricottura

# CAPITOLO 2

## MATERIALI COMPOSITI

### **2.1 Materiali compositi definizione e applicazione**

I materiali compositi sono un gruppo di materiali che sono stati combinati da due o più sostanze diverse per formare un unico materiale. I materiali compositi più comuni sono plastici e compositi, che costituiscono la maggior parte delle costruzioni moderne; sono utilizzati in diverse varietà di applicazioni come aerospaziale, automobilistico, macchinari e dispositivi medici.

Possono essere creati con vari mezzi, tra cui plastica rinforzata con carta, compositi a matrice metallica e plastica rinforzata con fibra di carbonio, utilizzati in una varietà di applicazioni grazie alle loro proprietà uniche. Queste proprietà includono resistenza, rigidità e resistenza termica; sono spesso utilizzati in applicazioni che richiedono un elevato livello di resistenza e rigidità, sono anche utilizzati in automobili e aerei per la loro resistenza al fuoco e agli urti come in altre applicazioni in cui è richiesto un elevato livello di rigidità, ad esempio dispositivi medici e materiali da costruzione.

### **2.2 Carbon-Peek definizione, uso e applicazione**

I materiali compositi peek in fibra di carbonio sono un tipo di materiale costituito da più tipi di fibre e altri materiali. Questi materiali hanno molte applicazioni diverse, tra cui aerospaziale, automobilistico, articoli sportivi, dispositivi medici processi di manifattura avanzata. I materiali compositi peek-fibra di carbonio sono molto resistenti e leggeri, il che li rende perfetti per varie applicazioni, implicano l'uso di filati, fibre e lastre in fibra di carbonio in combinazione con il peek che creano un materiale quasi indistruttibile.

Possono essere utilizzati per una serie di motivi. Sono spesso più resistenti e meno fragili di altri materiali, il che li rende ideali per applicazioni in cui la durata è importante. Hanno anche meno probabilità di arrugginarsi o corrodersi, il che li rende ideali per applicazioni che coinvolgono acqua o altri ambienti corrosivi.

I vantaggi dell'utilizzo di materiali compositi peek-fibra di carbonio includono il fatto che sono altamente resistenti ai danni. Questo li rende ideali per applicazioni in cui la durata è una priorità assoluta. Hanno anche un peso ridotto, il che li rende ideali per applicazioni in cui la portabilità è un requisito; sono uno strumento potente che può essere utilizzato per risolvere una varietà di problemi.

Il Carbon PEEK è un materiale composito rinforzato con fibre di carbonio che possiede straordinarie proprietà in termini di resistenza meccanica, termica e chimica.

Da un punto di vista meccanico, l'aggiunta di fibra di carbonio rende il materiale più resistente, permettendo di andare oltre nella sostituzione dei metalli anche nei campi industriali più estremi. Il Carbon-PEEK può essere utilizzato in un'ampia gamma di settori. Viene utilizzato in aree molto specifiche in cui sono richieste proprietà meccaniche aggiuntive rispetto al PEEK per prestazioni straordinarie.

### 2.2.1 Caratteristiche principali

- Resistenza chimica: Chimicamente, la matrice polimerica PEEK rende le parti stampate chimicamente resistenti alla maggior parte dei solventi organici, acidi e basi, anche a temperature elevate, rendendo il Carbon PEEK un ottimo candidato per la sostituzione del metallo negli ambienti di lavoro più esigenti.
- Resistenza meccanica: Il Carbon PEEK è rinforzato con fibre di carbonio. L'aggiunta di fibre di carbonio aumenta la resistenza meccanica della matrice PEEK, garantendo la funzione strutturale fino a 280°C
- Resistenza termica (bassa infiammabilità): La conducibilità termica delle fibre di carbonio facilita una distribuzione del calore più uniforme. Infatti, il ridotto coefficiente di dilatazione termica del carbonio PEEK si traduce in una maggiore stabilità dimensionale alle alte temperature.
- Scarsa emissione di fumi e gas tossici



Figura 3. Provino per test di trazione carbon-PEEK



Figura 4. Filamento carbon-PEEK

# CAPITOLO 3

## ANALISI LCA

### **3.1 Life-cycle assesment: definizione**

La valutazione del ciclo di vita (LCA) in inglese Life cycle assesment è un approccio sistemico integrato allo studio dell'intero ciclo di vita, che include sia l'uso delle risorse naturali che gli effetti ambientali. L'LCA è emerso come uno strumento utile per il processo decisionale in molti campi, tra cui la gestione delle risorse, la gestione dei rifiuti, il risanamento ambientale e la valutazione della sostenibilità. L'LCA è una valutazione ambientale completa che valuta gli impatti ambientali di un prodotto o processo "dalla culla al cancello". Questa valutazione può essere utilizzata per aiutare a identificare potenziali rischi ambientali e prendere decisioni in merito alla progettazione e produzione del prodotto, alla gestione dei rifiuti e altro ancora.

### **3.2 Metodi e vantaggi**

I metodi e le fasi per condurre una valutazione del ciclo di vita possono variare a seconda del tipo di prodotto o processo in esame. Tuttavia, la maggior parte dei metodi di valutazione del ciclo di vita in genere implica l'esecuzione di una scansione ambientale del prodotto o processo, la generazione di dati sugli impatti ambientali e quindi l'analisi dei dati per trarre conclusioni sugli impatti ambientali del prodotto o processo.

I vantaggi di condurre una valutazione del ciclo di vita vanno dall'aiutare le aziende a prendere decisioni informate sulla progettazione e produzione dei loro prodotti, all'aiutare le agenzie governative e le ONG a comprendere meglio l'impatto ambientale dei loro prodotti e delle loro politiche. La valutazione del ciclo di vita è quindi uno strumento prezioso non solo per le aziende, ma anche per i governi, le ONG e il pubblico in generale.

L'LCA è diventato uno strumento importante per aiutare le organizzazioni a comprendere la propria impronta ambientale, misurare i progressi compiuti sugli obiettivi di sostenibilità, identificare opportunità di miglioramento, prendere decisioni informate sulla progettazione dei prodotti e sulle scelte di approvvigionamento, valutare le prestazioni nel tempo e comunicare efficacemente queste informazioni alle parti interessate.

Un'analisi del ciclo di vita (LCA) è un tipo di valutazione economica che può aiutare i manager a prendere decisioni informate sull'impatto dei loro prodotti e servizi sull'ambiente, sulle persone e sull'economia.

Per condurre una LCA, è necessario raccogliere dati dettagliati sul ciclo di vita dei prodotti o servizi oggetto di valutazione. Ciò può includere informazioni sui materiali che compongono il prodotto, il processo di fabbricazione, la spedizione e lo smaltimento del prodotto e l'uso delle risorse naturali. I vantaggi di condurre un LCA sono molteplici. Ad esempio, un LCA ben eseguito può aiutare i manager a comprendere le implicazioni ambientali dei loro prodotti e le strategie per ridurre tali impatti. Può anche aiutare i manager a comprendere le implicazioni economiche dei loro prodotti, ad esempio in che modo la domanda dei consumatori per determinati prodotti influisce sul prezzo e sulla disponibilità. Infine, un LCA può aiutare a valutare la progettazione di prodotti e servizi, identificare opportunità di risparmio sui costi e migliorare la selezione e la progettazione dei prodotti.

### **3.3 Passaggi**

L'analisi del ciclo di vita è un processo iterativo costituito da quattro fasi principali: [2]

- Definizione degli obiettivi e delle aree di applicazione
- Analisi dell'inventario (LCI, Life Cycle Inventory in inglese)
- Valutazione dell'impatto (LCIA, Life Cycle Impact Assessment in inglese)
- Interpretazione

Durante l'analisi, fornire gradualmente informazioni al fine di affinare e, se necessario, modificare ogni fase che la caratterizza

## **CAPITOLO 4**

### **ANALISI LCC**

#### **4.1 Analisi dei costi del ciclo di vita (Life-cycle costing)**

L'analisi dei costi del ciclo di vita in inglese life cycle costing è uno strumento importante utilizzato nel processo decisionale. Aiuta i manager a identificare i costi e i benefici associati alle varie decisioni aziendali. Lo scopo di un'analisi dei costi del ciclo di vita è aiutare a prendere decisioni informate e razionali che miglioreranno la redditività e la posizione competitiva di un'organizzazione a lungo termine.

L'analisi dei costi del ciclo di vita è uno strumento utilizzato per analizzare i vari costi associati a un prodotto o servizio dalla fase di ideazione fino allo smaltimento o alla distruzione del prodotto. Questo viene fatto per scoprire quanti soldi sono stati spesi per il prodotto e cosa è stato realizzato

in termini di ricavi e profitti. Il costo del prodotto comprende non solo i costi diretti associati alla produzione del prodotto, ma anche i costi indiretti che vengono sostenuti durante l'intero ciclo di vita del prodotto.

In genere, i costi del ciclo di vita sono suddivisi in tre fasi: pre-produzione, produzione e post-produzione. La pre-produzione include attività come ricerca e sviluppo, progettazione e pianificazione. La produzione implica la produzione effettiva del prodotto, compreso l'assemblaggio, l'imballaggio, la spedizione e la commercializzazione. La post-produzione comporta lo smaltimento o la distruzione del prodotto, come il riciclaggio, lo smaltimento in terra e lo smaltimento in mare. Ogni fase del ciclo di vita ha i propri costi e responsabilità che devono essere presi in considerazione.

L'LCC può portare a notevoli vantaggi finanziari. Ad esempio, può aiutare a identificare dove si possono realizzare profitti, quali prodotti dovrebbero essere prodotti e come dovrebbe essere fissato il prezzo. Può anche aiutare a identificare dove si stanno verificando spese inutili e identificare modi per ridurre tali costi. Nel complesso, l'LCC è uno strumento prezioso che può aiutare a migliorare l'efficienza e la redditività di un'azienda.

## CAPITOLO 5

### TEST DI TRAZIONE

#### 5.1 Test di trazione uniassiale

Il test di trazione uniassiale è un tipo di esperimento scientifico che misura le proprietà di elasticità, duttilità e resistenza dei materiali. La prova di trazione uniassiale di solito utilizza una macchina di tensione per applicare lo stress in una sola direzione. Viene utilizzato per misurare varie proprietà fisiche come rigidità, limite di snervamento, allungamento a rottura e punti di intercettazione (modulo elastico); è un tipo di prova di misurazione della sollecitazione utilizzata per testare la resistenza alla trazione finale dei materiali.

La prova viene eseguita allungando un provino lungo uno dei suoi tre assi principali.

I tre assi tipicamente selezionati per il test sono gli assi x, y e z.

La prova di trazione uniassiale è un tipo di Test meccanico che viene utilizzato per determinare la resistenza alla trazione finale dei materiali.

#### 5.2 Parametri Test di trazione

Per valutare i risultati di un test di trazione uniassiale vengono presi in considerazione 3 parametri principali:

- Modulo di Young: Detto anche modulo elastico, è una grandezza il cui valore dipende dal materiale in esame ed esprime la tendenza del materiale ad allungarsi o ad accorciarsi per l'azione di una forza di carico.
- Snervamento: Lo snervamento o limite di snervamento di un materiale duttile è definito nella scienza dei materiali come il valore di sollecitazione al quale il materiale inizia a deformarsi plasticamente e il passaggio dal comportamento elastico reversibile al comportamento plastico caratterizzato dallo sviluppo di deformazioni irreversibili rientra nell'ambito di nessun motivo richiesto. Nel caso di uno stato di sollecitazione multi-assiale, il limite di snervamento rappresenta la combinazione di componenti di sollecitazione che determinano la condizione di snervamento del materiale: Nello spazio di sollecitazione, il limite di snervamento infinito descrive, chiamata superficie di snervamento.
- Tensione massima: descrive la massima tensione raggiunta dal provino nel test di trazione

## CAPITOLO 6

### METODOLOGIE

#### 6.1 Stampante utilizzata

CreatBot PEEK-300 (Figura 5) è una stampante 3D di livello industriale, incentrata su materiali ad alte prestazioni come PEEK, PEKK, PEI e altri materiali. È progettata per un'elevata affidabilità ed una stampa 3D economica di materiali funzionali ad alte prestazioni. Questa stampante è progettata per eseguire il processo di ricottura direttamente in macchina, dando la possibilità di scegliere la temperatura di ricottura (annealing) da 0 a 400 °C; Direct Annealing System (DAS), Il processo di ricottura è controllabile istantaneamente durante la stampa. Mira a fornire parti della migliore qualità in una volta senza deformazioni e crepe nella stampa di materiali funzionali di grandi dimensioni. (La tecnologia è protetta da brevetto e disponibile solo da CreatBot).





Figura 5. Stampante 3D CreatBot Peek-300 laboratorio FermoTech.

Per effettuare le prove sperimentali di stampa dei provini ci siamo appoggiati al laboratorio FermoTech di Fermo dove è presente la stampante 3D CreatBot Peek-300.

Abbiamo predisposto la forma del modello 3D digitalmente tramite un software CAD e poi inserito la chiavetta contenente il file nella porta usb della stampante.

## 6.2 Parametri di processo

- Provini trazione. Materiale provino: Carbon-Peek → Peek (80%) rinforzato con fibra di carbonio (carbon fiber 20%)
- Support con peek.
- Peso materiale utilizzato: 19.52 g
- Peso provino: 18.31 g.
- Peso supporto che da stabilità al provino 1.21 g
- Temperatura camera 130-140 °C.
- Temperatura estrusione 480 °C
- Temperatura del piano 150 °C
- Misurazioni divise in due:
  1. Consumo energetico macchina
  2. Consumo energetico riscaldamento camera
- Due fasi: preriscaldamento e stampa effettiva

	Preriscaldamento (kWh)~15 minuti	Stampa (kWh)~1h 53 min
Misura 1 (macchina)	0.19	0.70
Misura 2 (preriscaldamento camera)	0.35	2.40
Con ricottura in macchina (380°C)		
Misura 1 (macchina)	0.22	0.80

Tabella 1. Consumi energetici stampante 3D

Dato che la stampante ha 2 prese di corrente (una per il preriscaldamento della camera e una per la macchina) abbiamo preso 2 misure riguardo i consumi energetici. Abbiamo deciso di stampare 3 provini per tipo: 3 senza ricottura, 3 con ricottura in macchina a 380°C e 3 con ricottura in un forno esterno a 200°C.

Nella scelta della forma del provino abbiamo optato per quella ad “osso di cane” (Figura 6) tipica dei provini che andranno sottoposti a test di trazione come nel nostro caso.



Figura 6. Provino in carbon-peek con forma “a osso di cane”.

### 6.3 Procedura Stampaggio provino

- Predisposizione modello 3D digitale: una volta scelto il design del provino, nella predisposizione del modello 3D deve essere anche aggiunto del materiale per il “sostegno”.
- Caricamento filamento carbon-peek: predisposto il modello 3D e inserita la chiavetta alla stampante andrà inserito da un operatore il filamento di materiale nell’apposita fessura (Figura 7).



Figura 7. Parte laterale della stampante dove viene inserito il filamento di materiale.

- Applicazione colla: Per evitare che il materiale resti incollato al piano di stampa va applicata una colla specifica per alte temperature. Nel nostro caso abbiamo usato la “Magigoo Pro Ht” (Figura 8).



Figura 8. Colla “Magigoo Pro Ht”.

- Stampa provino: il filamento viene espulso tramite un estrusore che andrà uno strato dopo l’altro a creare il nostro oggetto 3D desiderato (Figura 9-10).  
Nel caso di studio del provino senza ricottura il nostro procedimento si ferma qui con l’espulsione del provino pronto e stampato dalla macchina.



Figura 9. Stampa provino vista lateralmente



Figura 10. Stampa provino vista dall'alto

- Ricottura provino in macchina: una volta rimosso il provino dalla stampante abbiamo predisposto la macchina per il processo di ricottura a 380°C
- Ricottura provino in forno: Invece, per quanto riguarda il forno esterno abbiamo portato i 3 provini da analizzare ai laboratori di ingegneria in Ancona dove è presente l'apposito forno per effettuare la ricottura dei provini a 200°C (Figura 11)



Figura 11. Ricottura di 3 provini in forno a 200°C.

Durante queste procedure sperimentali abbiamo preso traccia dei consumi energetici tramite uno strumento di misurazione della potenza elettrica erogata dalla macchina e dal forno collegandoli direttamente alla presa di corrente (Figura 12).



Figura 12. Strumento di misurazione di potenza elettrica.

#### 6.4 Prove di trazione

Per effettuare le prove di trazione ci siamo affidati al laboratorio del dipartimento di ingegneria dell'UNIVPM situato in Ancona, in questo laboratorio è presente la macchina per prova universale di trazione (Figura 13).



Figura 13. Macchina per prova universale di trazione

#### 6.4.1 Procedura:

- Misurazione provini (spessore e larghezza) → Micrometro (Figura 14)

Ho misurato ogni provino prendendo 3 misure di spessore e larghezza, in alto, al centro e in basso attraverso il Micrometro, facendo poi la media delle 3 misure trovate per avere un valore più preciso.



Figura 14. Misurazione provino con Micrometro.

- Inserimento dati nel software informatico: una volta prese tutte le misure riguardanti il provino abbiamo inserito i dati trovati nel software.
- Fissaggio provino al macchinario
- Test di trazione. Una volta fissato il provino al macchinario, è stato applicato uno strumento di misura chiamato Estensometro (Figura 16), quest'ultimo serve per andare a studiare tutte le deformazioni del provino, tra cui anche la tensione di rottura.



Figura 15. Provino durante il test di trazione; al centro si può notare il punto di rottura.



Figura 16. Estensometro.

#### 6.4.2 Modellazione risultati prove di trazione

Alla fine della prova di trazione ho modellato i dati che sono usciti fuori nel seguente modo:

1. Nel file Excel dei risultati delle prove di trazione ho considerato i valori della deformazione, tensione e deformazione esterna solo dal momento in cui la forza iniziava ad aumentare, tutti quelli prima non li ho considerati.
2. Una volta giunto a questi valori ho tracciato una retta dove nelle ascisse sono presenti i valori della deformazione esterna, mentre nelle ordinate sono presenti i valori della tensione. Questa retta ha la sua equazione corrispondente  $y = mx + q$ , dove  $m$  corrisponde al Modulo di Young
3. Dopodiché ho trovato i valori di deformazione e tensione corrispondenti allo snervamento, come nell'esempio (Tabella 2):

Snervamento	
def	tens
0	-20,776
0,002	0
0,01	83,104

Tabella 2. Valori snervamento provino no ricottura 2.

4. Una volta trovati i valori dello snervamento ho tracciato la retta dove nelle ascisse sono presenti i valori di deformazione dello snervamento mentre nelle ordinate sono presenti i valori di tensione dello snervamento.

5. Così mi sono ritrovato con 2 rette, la prima corrispondente al Modulo di Young, la seconda corrispondente allo snervamento, mettendo a sistema le due rette ho trovato il punto di intersezione che corrisponde al sigma di snervamento.
6. Infine, mi sono trovato la tensione massima, che corrisponde a sigma max.

Questo procedimento è stato seguito per tutti e 9 i provini, dove “nr” sta per no ricottura, “ricforno” sta per ricottura in forno e “ricmac” sta per ricottura in macchina.

### 6.4.3 Risultati grafici delle prove di trazione

#### 6.4.3.1 Provini senza ricottura

1. Nr1

Tens	Def est
0	0
0,581237	0,000063
1,25921	0,00013
1,895098	0,000194
2,472451	0,000251
3,096001	0,000317
3,736778	0,000383
4,316325	0,00044
4,949288	0,000504
5,564659	0,000567
6,148501	0,000624
6,77461	0,000688
7,38098	0,000749
7,966009	0,000808
8,589605	0,000871
9,143334	0,000924
9,734395	0,000986
10,38134	0,00105
10,97245	0,001108
11,58841	0,00117

Tabella 3. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino nr1



Snervamento	
def	tens
0	-19,8776
0,002	0
0,01	79,5104

Tabella 4. Valori deformazione e tensione di snervamento provino nr1

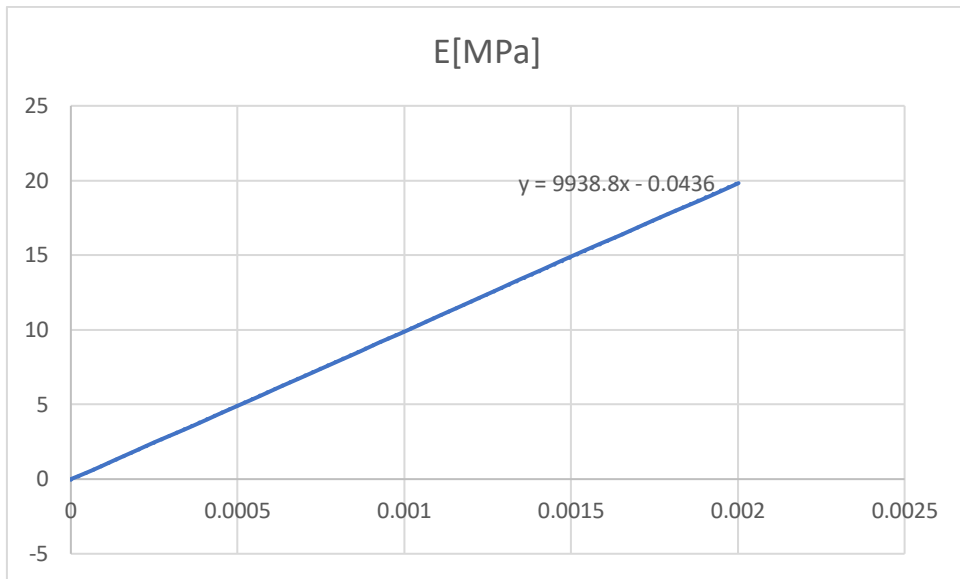


Figura 17. Grafico modulo di Young provino nr1

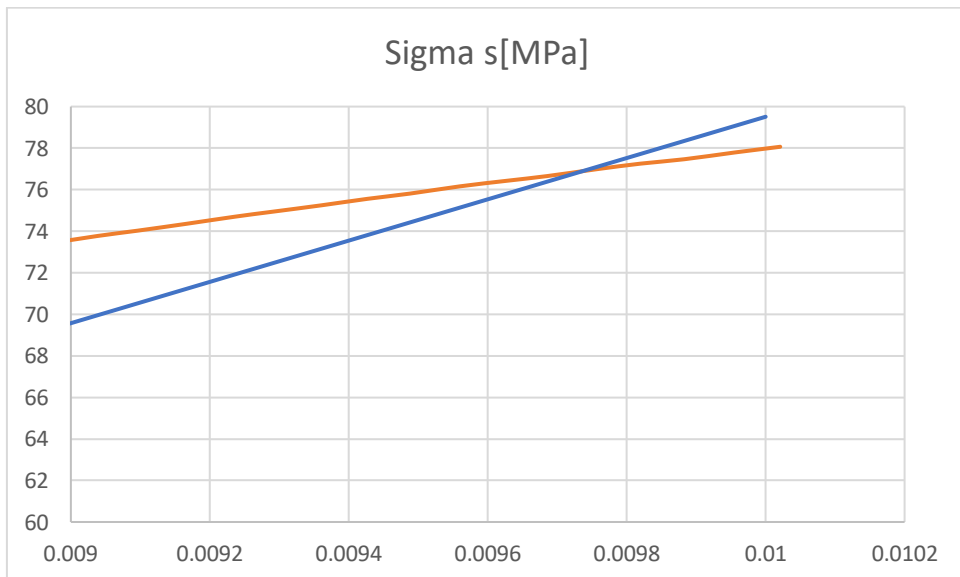


Figura 18. Grafico Sigma snervamento provino nr1

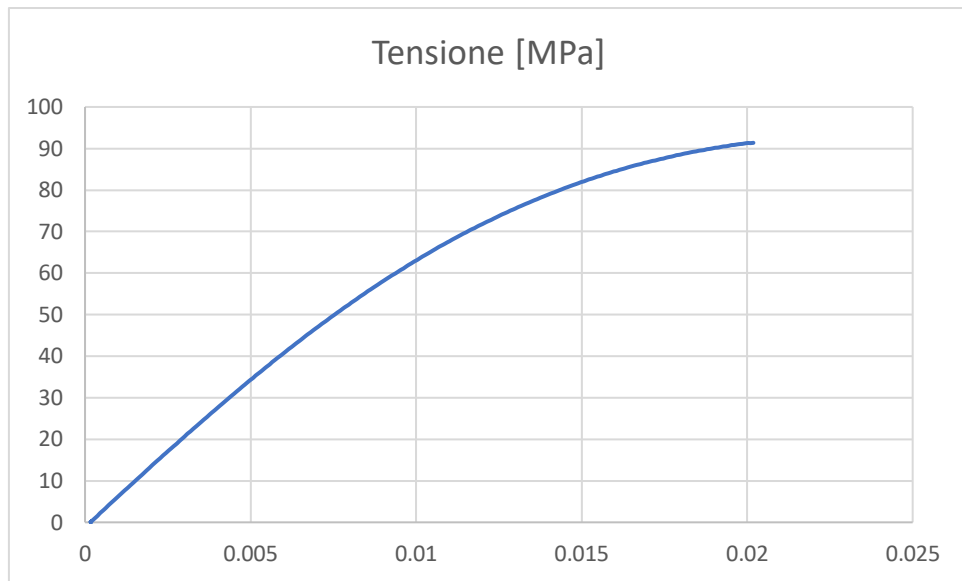


Figura 19. Grafico curva Tensione provino nr1.

E	Sigma max	sigma s	Unità
9938,8	91,033489	77	Mpa

Tabella 5. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino nr1



Figura 20. Rottura provino nr1 in seguito al test di trazione.

2. Nr2

Tens	Def est
0	0
0,253039	0,000023
0,470503	0,000045
0,682092	0,000067
0,899975	0,000086
1,092634	0,000103
1,325811	0,000128
1,546772	0,000146
1,752439	0,000164
1,967758	0,000185
2,228258	0,000208
2,427211	0,000225
2,664864	0,000247
2,890907	0,000271
3,216404	0,000304
3,471402	0,000328
3,689705	0,000344
3,929036	0,000368
4,161607	0,00039
4,34191	0,000405
4,553219	0,000426

Tabella 6. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino nr2

Snervamento	
def	tens
0	-20,776
0,002	0
0,01	83,104

Tabella 7. Valori deformazione e tensione di snervamento provino nr2

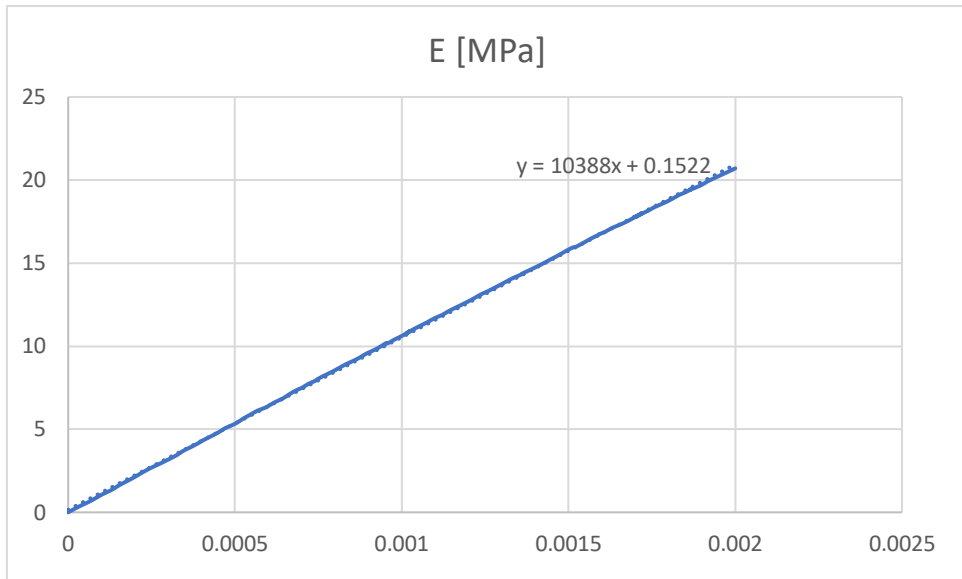


Figura 21. Grafico modulo di Young provino nr2

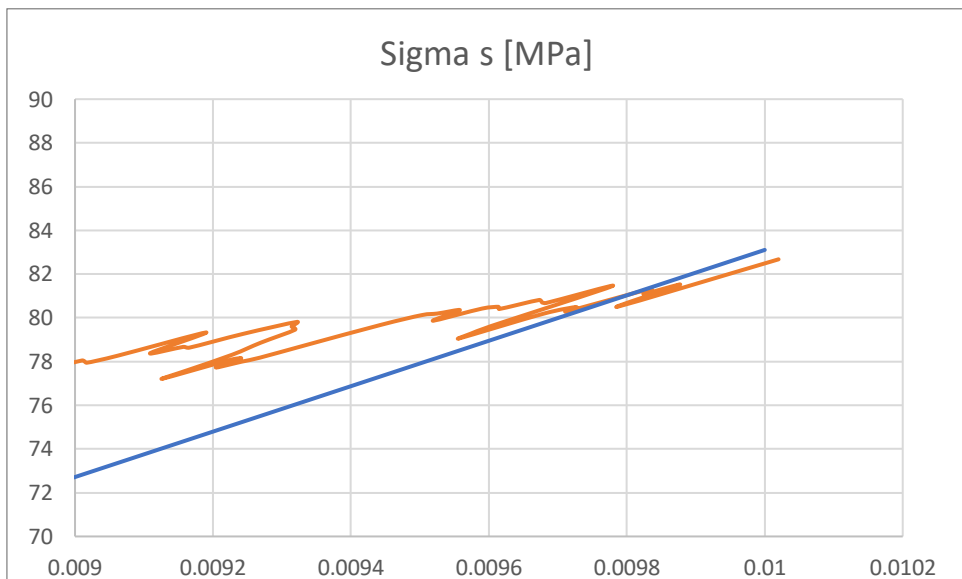


Figura 22. Grafico Sigma snervamento provino nr2

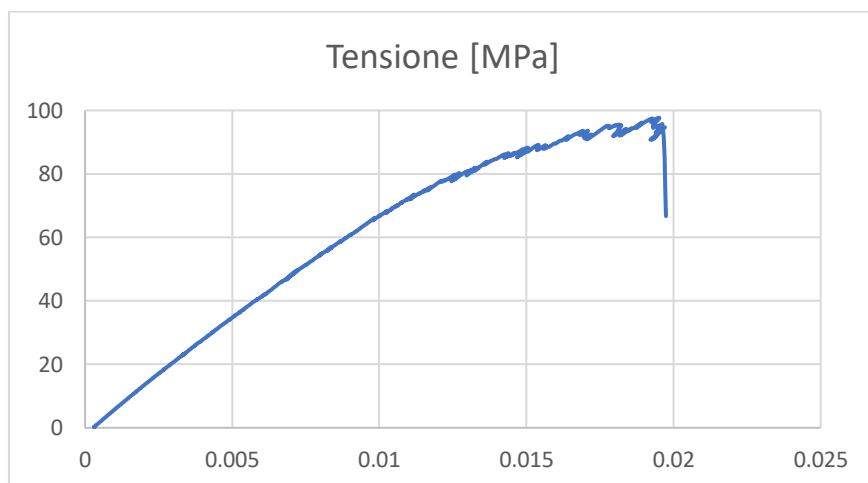


Figura 23. Grafico curva Tensione provino nr2

E	Sigma max	Sigma s	Unità
10388	97,20099	80,5	Mpa

Tabella 8. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino nr2



Figura 24. Rottura provino nr2 in seguito al test di trazione.

### 3. Nr3

Tens	DEF est
0	0
0,594179	0,000065
1,181537	0,000128
1,778939	0,000194
2,349851	0,000258
2,929033	0,000321
3,51027	0,000378
4,066139	0,000443
4,654758	0,000511
5,258607	0,000575
5,841713	0,000636
6,39889	0,000701
7,010355	0,000768
7,58678	0,000834
8,164747	0,000894
8,726502	0,000954
9,290266	0,00102
9,876876	0,001084
10,45802	0,001142
11,019121	0,001207
11,593023	0,001273

Tabella 9. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino nr3

Snervamento	
def	tens
0	-18,0328
0,002	0
0,01	72,1312

Tabella 10. Valori deformazione e tensione di snervamento provino nr3

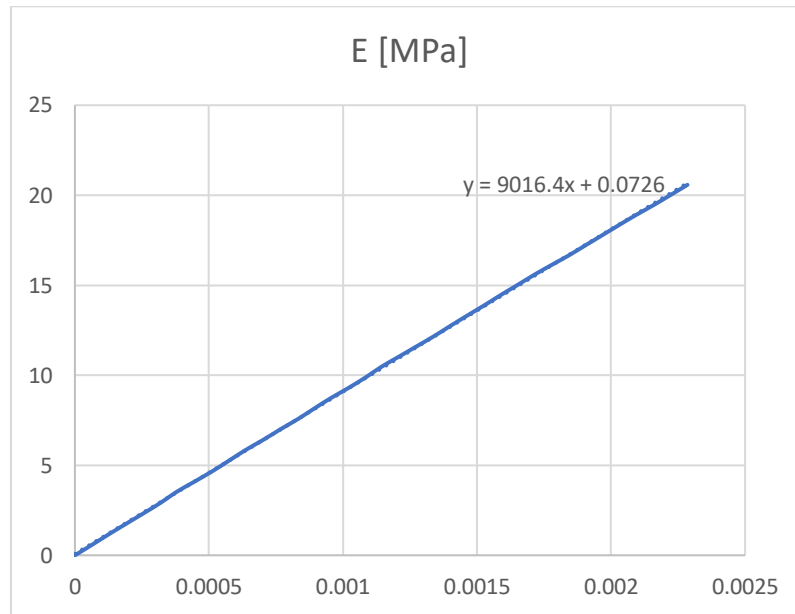


Figura 25. Grafico modulo di Young provino nr3

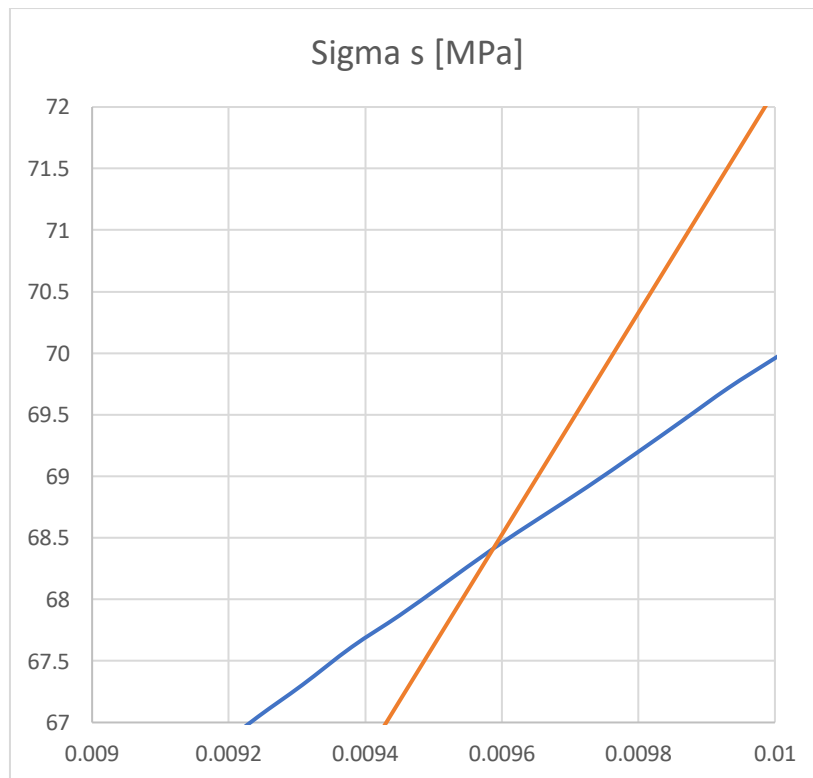


Figura 26. Grafico Sigma snervamento provino nr3

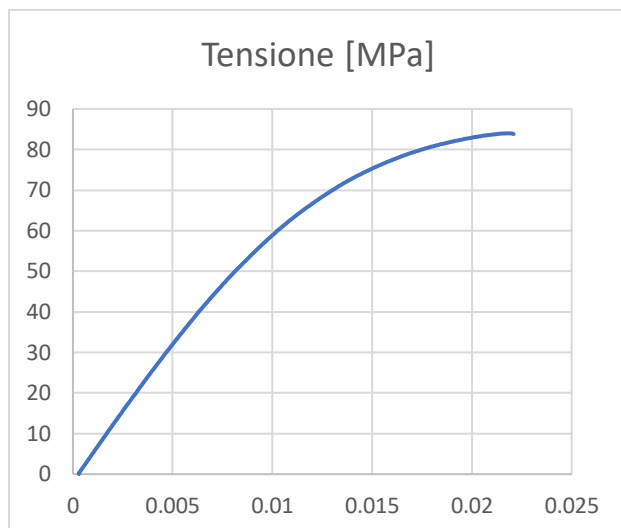


Figura 27. Grafico curva tensione provino nr3

E		Sigma max		sigma s	
9016,4	MPa	83,70493	MPa	68,5	MPa

Tabella 11. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino nr3



Figura 28. Rottura provino nr1 in seguito al test di trazione.

### 6.4.3.2 Provini con ricottura in macchina a 380°C

#### 1. Ricmac1

Tens	DEF est
0	0
0,694692	0,000061
1,391379	0,000121
2,125733	0,000187
2,808883	0,000248
3,503195	0,000312
4,243582	0,000377
4,902601	0,000436
5,632111	0,0005
6,348178	0,000563
7,0138	0,000625
7,725449	0,000686
8,421471	0,00075
9,048855	0,000808
9,789812	0,000875
10,50521	0,00094
11,17877	0,000999
11,89626	0,001065
12,58687	0,001126
13,24726	0,001189
13,93374	0,001251

Tabella 12. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricmac1

Snervamento	
def	tens
0	-21,998
0,002	0
0,01	87,992

Tabella 13. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricmac1



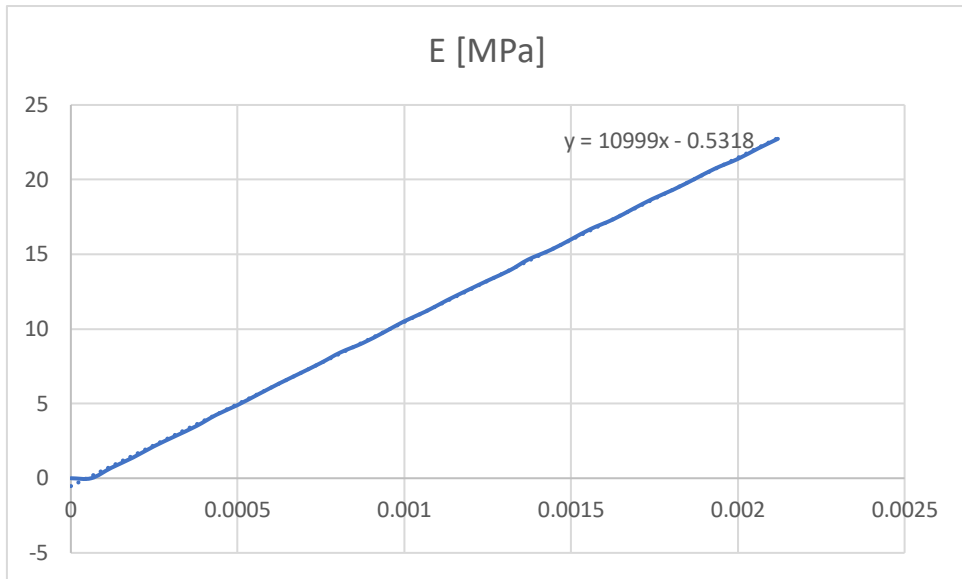


Figura 29. Grafico modulo di Young provino ricmac1

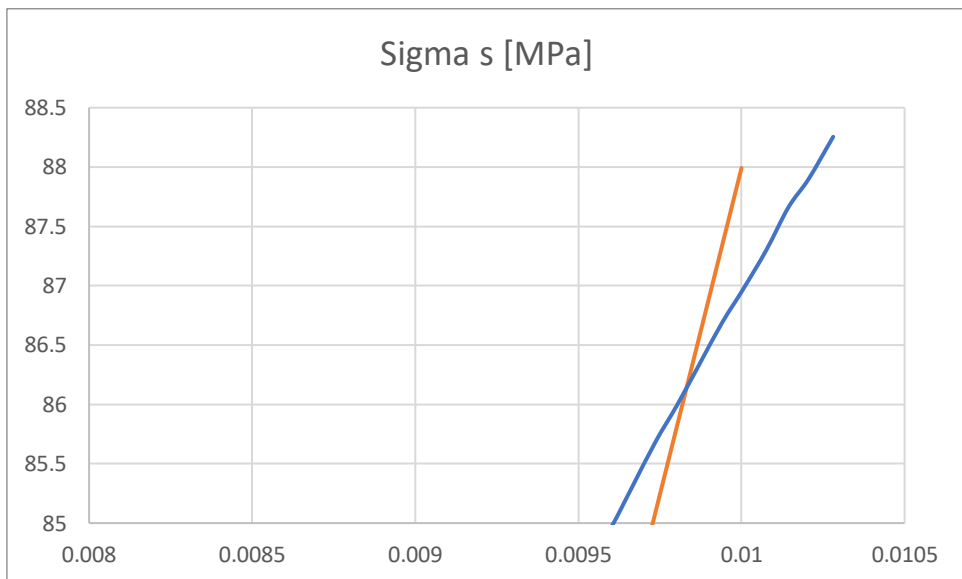


Figura 30. Grafico Sigma snervamento provino ricmac1

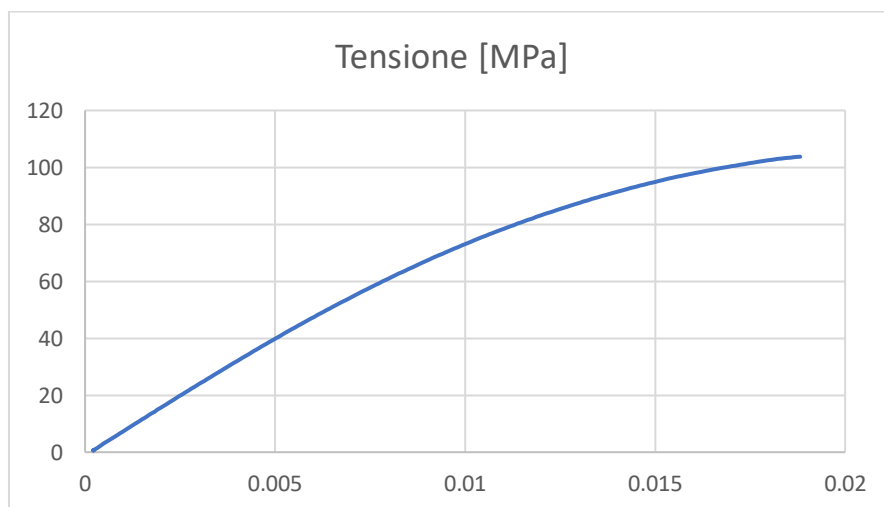


Figura 31. Grafico curva tensione provino ricmac1

E	Sigma max	Sigma s	Unità
10999	101,38551	86,2	MPa

Tabella 14. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino ricmac1



Figura 32. Rottura provino ricmac1 in seguito al test di trazione.

## 2. Ricmac2

Tens	DEF est
0	0
0,562295	0,000069
1,126961	0,00013
1,626856	0,000193
2,201845	0,000262
2,761118	0,000326
3,296025	0,00039
3,846649	0,000453
4,422382	0,000519
4,923905	0,000581
5,486804	0,000649
6,027291	0,000708
6,5602	0,000772
7,120495	0,000843
7,662331	0,000904
8,160878	0,000965
8,739493	0,00103
9,289141	0,001096
9,787083	0,001154
10,34292	0,001219
10,88954	0,001284

Tabella 15. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricmac2

Snervamento	
def	tens
0	-16,8342
0,002	0
0,01	67,3368

Tabella 16. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricmac2

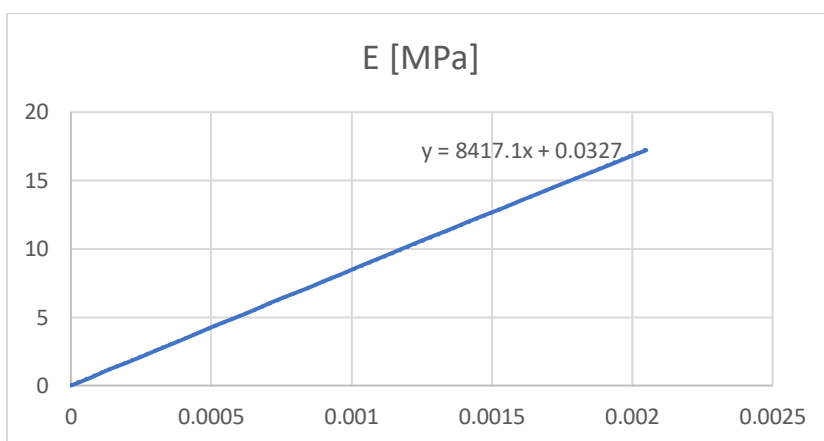


Figura 33. Grafico modulo di Young provino ricmac2

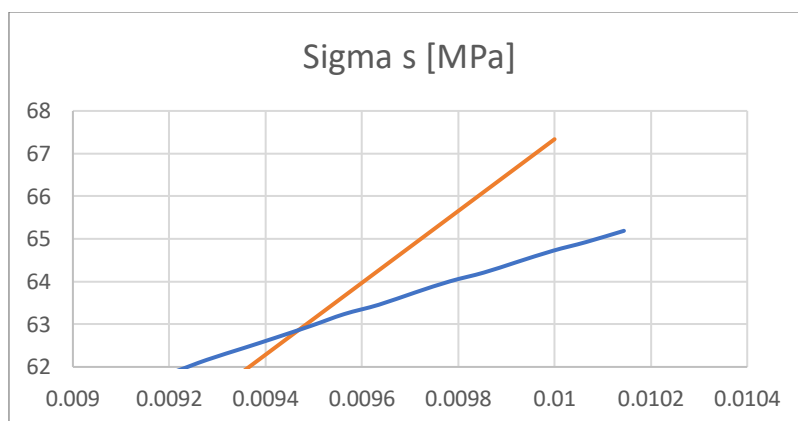


Figura 34. Grafico Sigma snervamento provino ricmac2

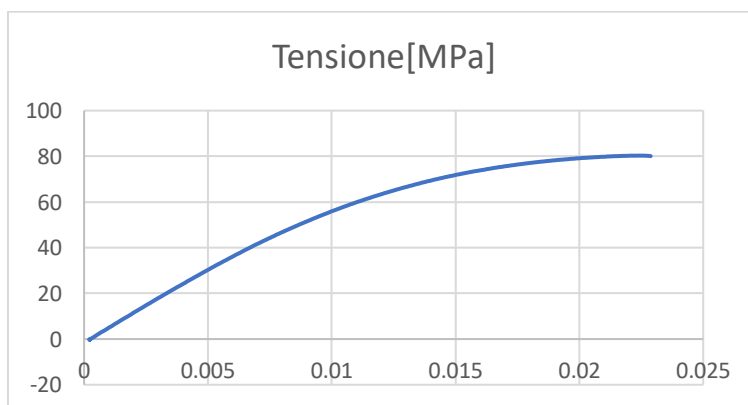


Figura 35. Grafico curva tensione provino ricmac2

E	Sigma max	Sigma s	Unità
8417,1	78,014096	63	MPa

Tabella 17. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino ricmac2



Figura 36. Rottura provino ricmac2 in seguito al test di trazione

### 3. Ricmac3

Tens	DEF est
0	0
0,651047	0,000059
1,362669	0,000123
2,069848	0,000191
2,717981	0,000249
3,426593	0,000317
4,146289	0,000379
4,822464	0,000444
5,513448	0,000505
6,232475	0,00057
6,877454	0,000636
7,563996	0,000696
8,260426	0,000759
8,949261	0,000821
9,637904	0,000886
10,33371	0,00095
10,99584	0,001009
11,69915	0,001075
12,38393	0,001139
13,03779	0,001199
13,75562	0,001265

Tabella 18. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricmac3

Snervamento	
def	tens
0	-21,654
0,002	0
0,01	86,616

Tabella 19. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricmac3

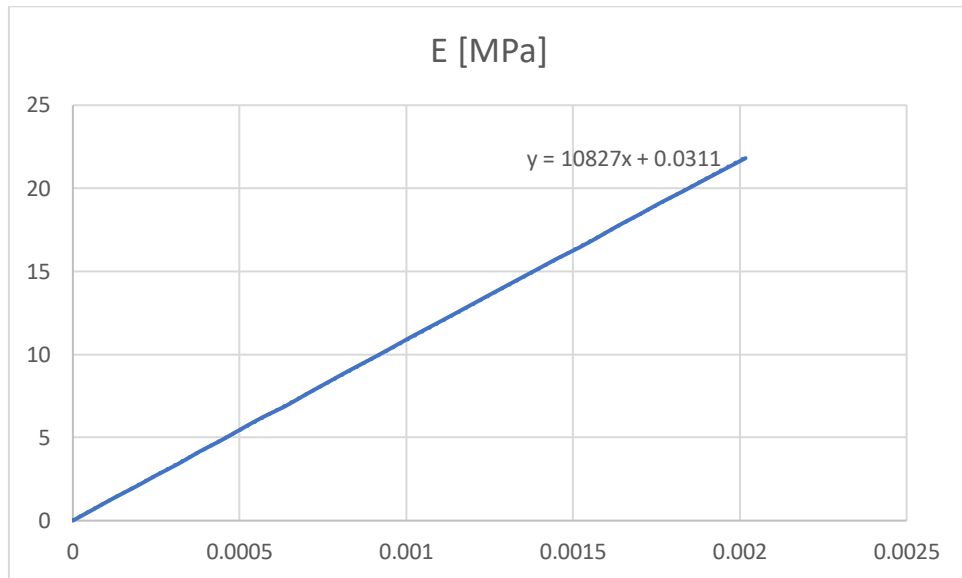


Figura 37. Grafico modulo di Young provino ricmac3

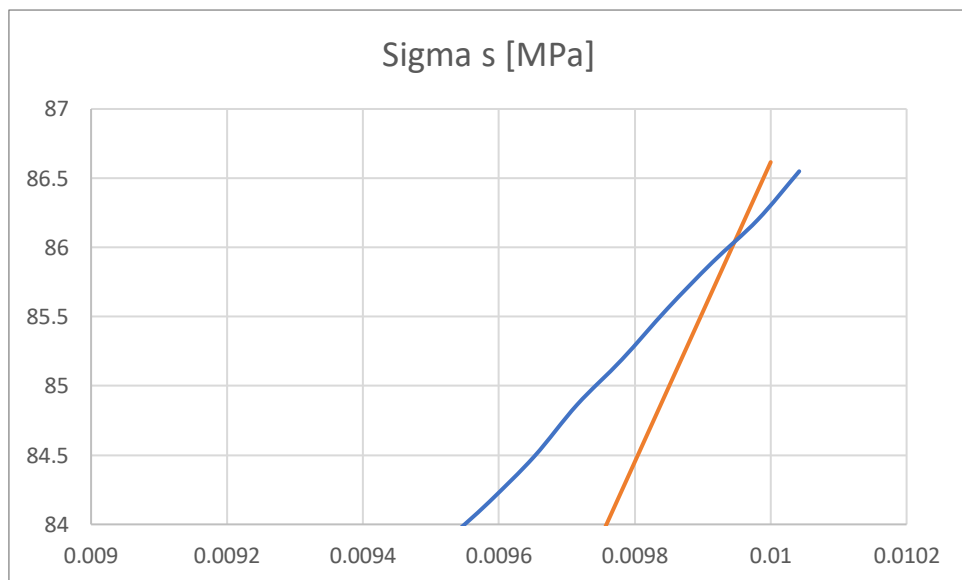


Figura 38. Grafico Sigma snervamento provino ricmac3

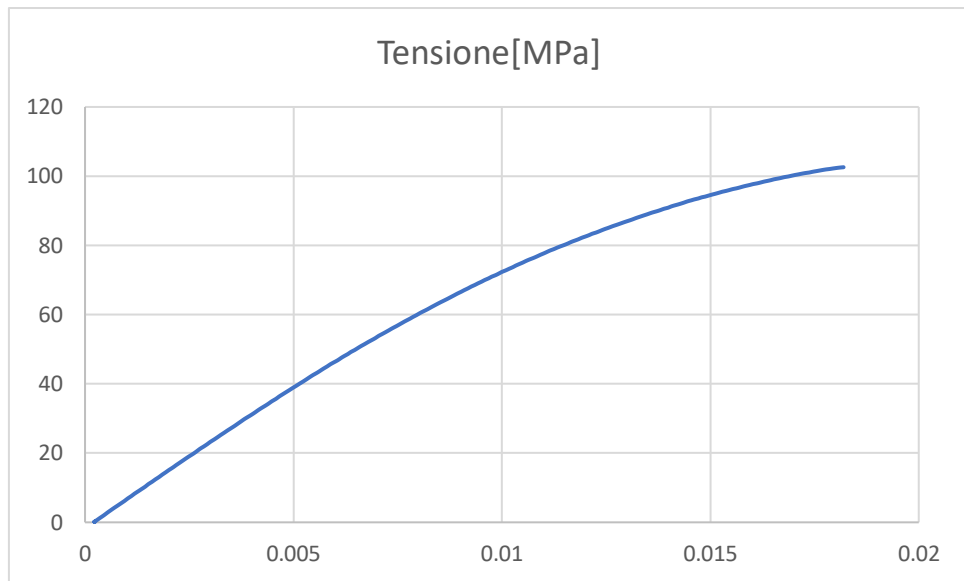


Figura 39. Grafico curva tensione provino ricmac3

E	Sigma max	Sigma s	Unità
10827	99,812572	86,2	MPa

Tabella 20. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e tensione massima provino ricmac3



Figura 40. Rottura provino ricmac3 in seguito al test di trazione

### 6.4.3.3 Provini con ricottura in forno a 200°C

#### 1. Ricforno1

Tens	DEF est
0	0
0,758695	0,000062
1,505335	0,000117
2,220683	0,000171
2,972097	0,000229
3,709432	0,000284
4,404336	0,000339
5,185018	0,000397
5,921533	0,000452
6,620439	0,000505
7,360232	0,000563
8,102148	0,000619
8,792037	0,000671
9,505552	0,000725
10,20981	0,000782
10,92665	0,000835
11,66447	0,000894
12,40962	0,00095
13,12434	0,001006
13,842	0,001061
14,57041	0,001115

Tabella 21. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricforno1

	Snervamento
def	tens
0	-25,942
0,002	0
0,01	103,768

Tabella 22. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricforno1

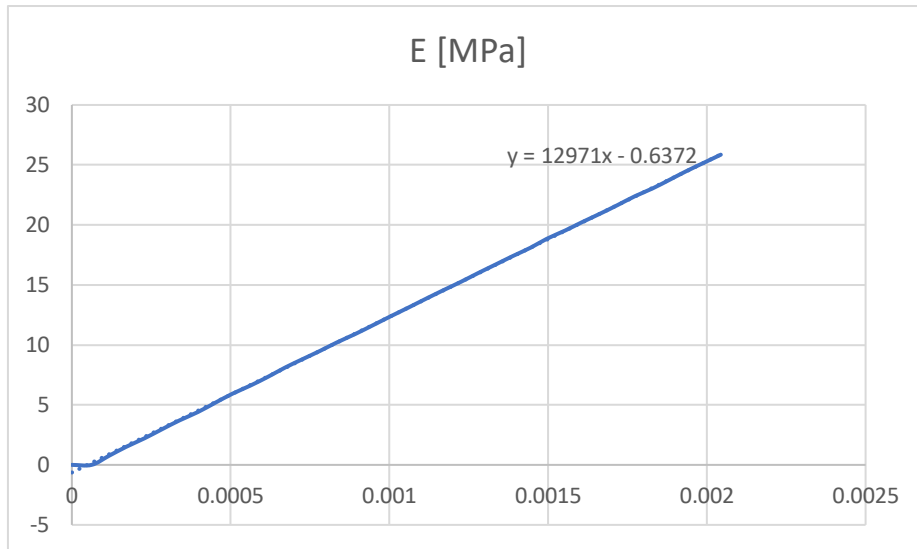


Figura 41. Grafico modulo di Young provino ricorno1

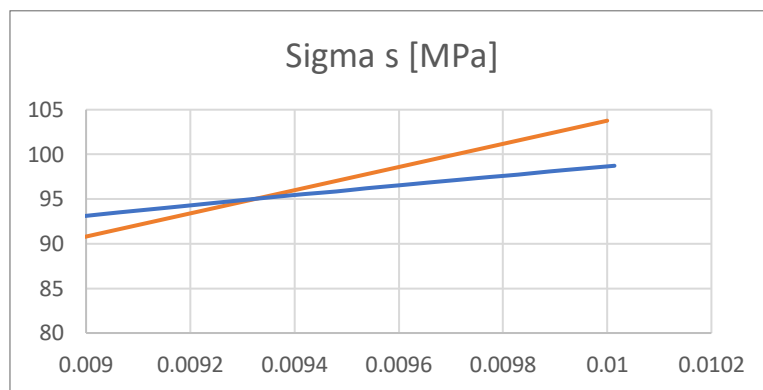


Figura 42. Grafico Sigma snervamento provino ricorno1

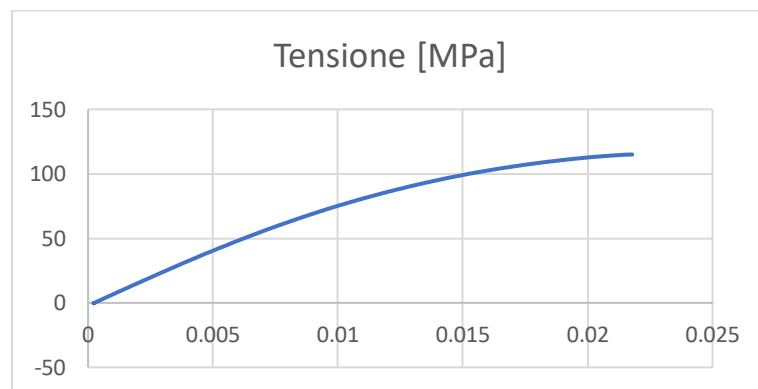


Figura 43. Grafico curva tensione provino ricorno1

E	Sigma max	Sigma s	Unità
12971	114,24247	95	MPa

Tabella 23. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e sigma massima provino ricorno1





Figura 44. Rottura provino ricforno1 in seguito al test di trazione

## 2. Ricforno2

Tens	DEF est
0	0
0,585339	0,000067
1,169327	0,000135
1,745954	0,000198
2,312611	0,000265
2,892918	0,000333
3,464514	0,000399
4,0137	0,000462
4,586693	0,000527
5,196212	0,000598
5,728999	0,000661
6,31131	0,000729
6,891943	0,000797
7,447792	0,000855
7,994369	0,000925
8,56848	0,00099
9,117201	0,001053
9,718426	0,001121
10,29147	0,001191
10,81759	0,001248
11,39007	0,001313

Tabella 24. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricforno2

Snervamento	
def	tens
0	-17,2874
0,002	0
0,01	69,1496
0,02	155,5866

Tabella 25. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricorno2

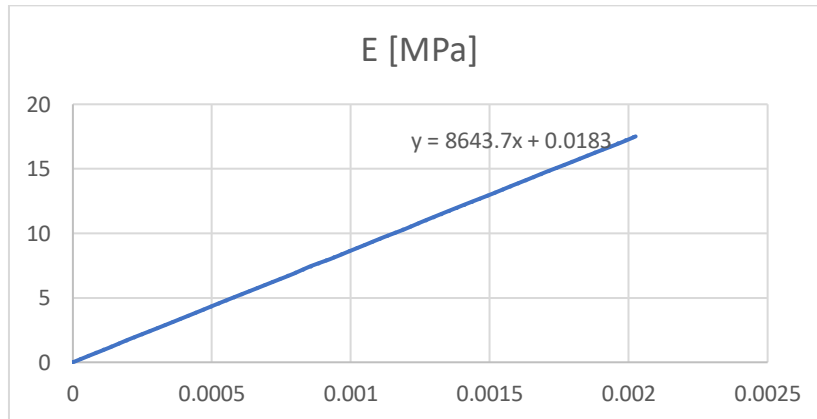


Figura 45. Grafico modulo di Young provino ricorno2

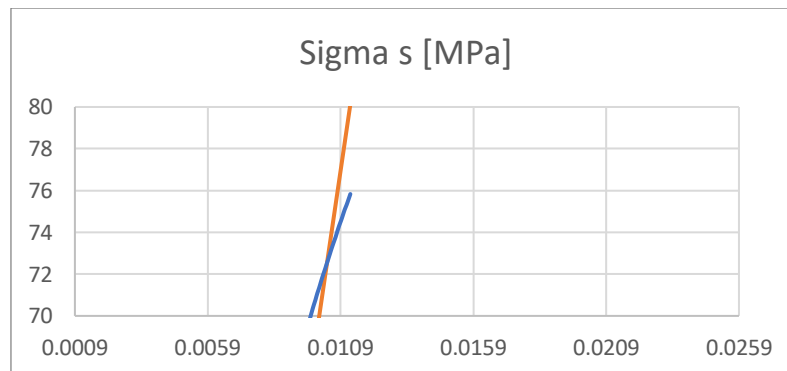


Figura 46. Grafico Sigma snervamento provino ricorno2

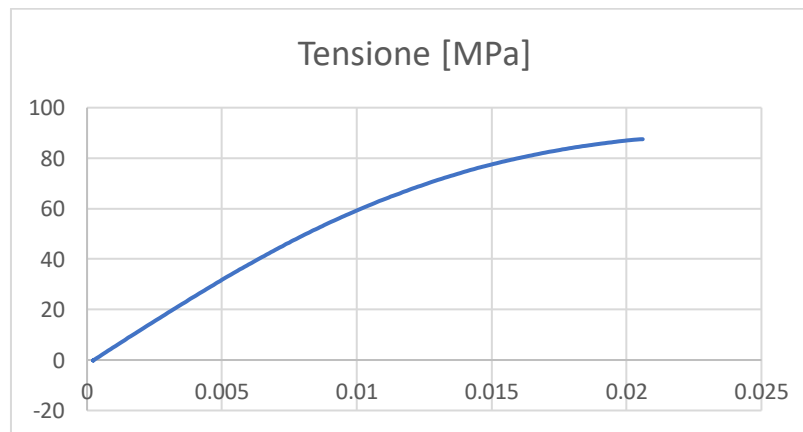


Figura 47. Grafico curva tensione provino ricorno2

E	Sigma max	Sigma s	Unità
8643,7	87,202504	72,5	MPa

Tabella 26. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e sigma massima provino ricorno2



Figura 48. Rottura provino ricorno2 in seguito al test di trazione

### 3. Ricorno3

Tens	DEF est
0	0
0,69172	0,000063
1,390106	0,000124
2,054353	0,000188
2,742025	0,000246
3,462218	0,000313
4,122798	0,000375
4,805281	0,000437
5,489811	0,000499
6,195244	0,000568
6,888439	0,000625
7,554686	0,00069
8,211363	0,000754
8,914128	0,00082
9,592421	0,000882
10,258	0,000943
10,94467	0,001006
11,58573	0,001065
12,24603	0,001127
12,92951	0,001192
13,60176	0,001253

Tabella 27. Primi 20 valori tensione e deformazione esterna provino ricorno3

Snervamento	
def	tens
0	-21,518
0,002	0
0,01	86,072
0,02	193,662

Tabella 28. Valori deformazione e tensione di snervamento provino ricorno3

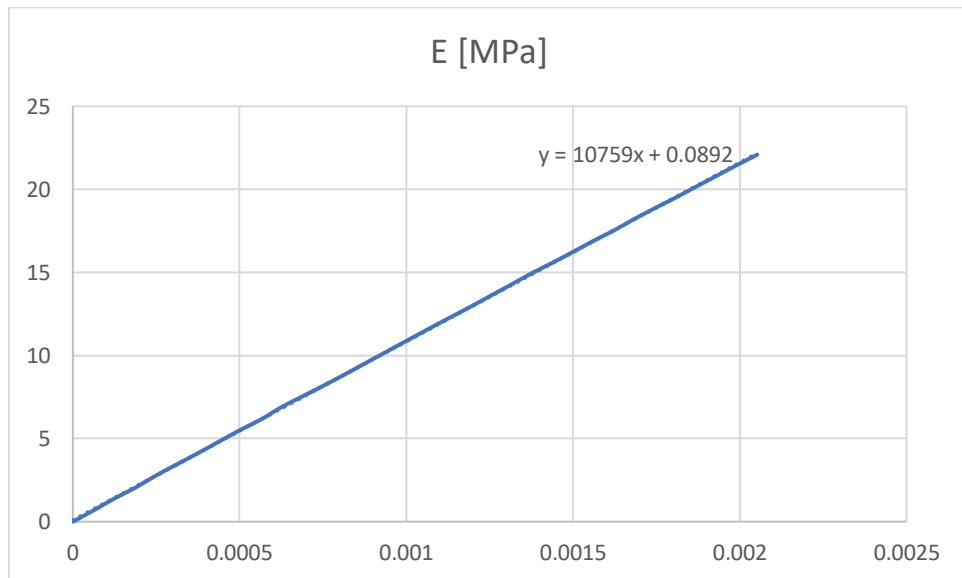


Figura 49. Grafico modulo di Young provino ricorno3

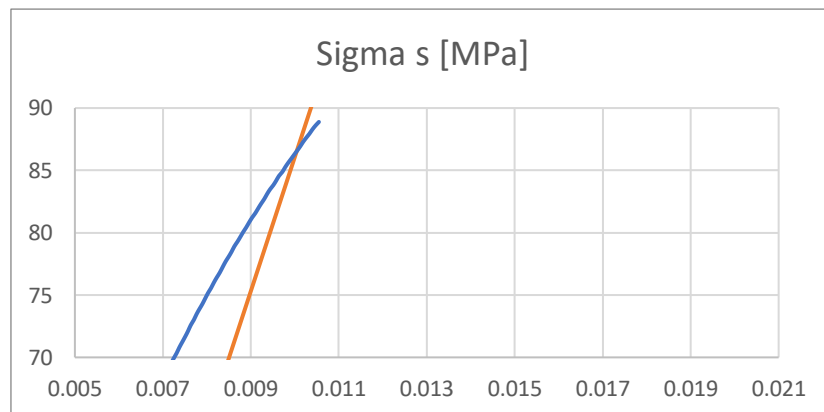


Figura 50. Grafico Sigma snervamento provino ricorno3

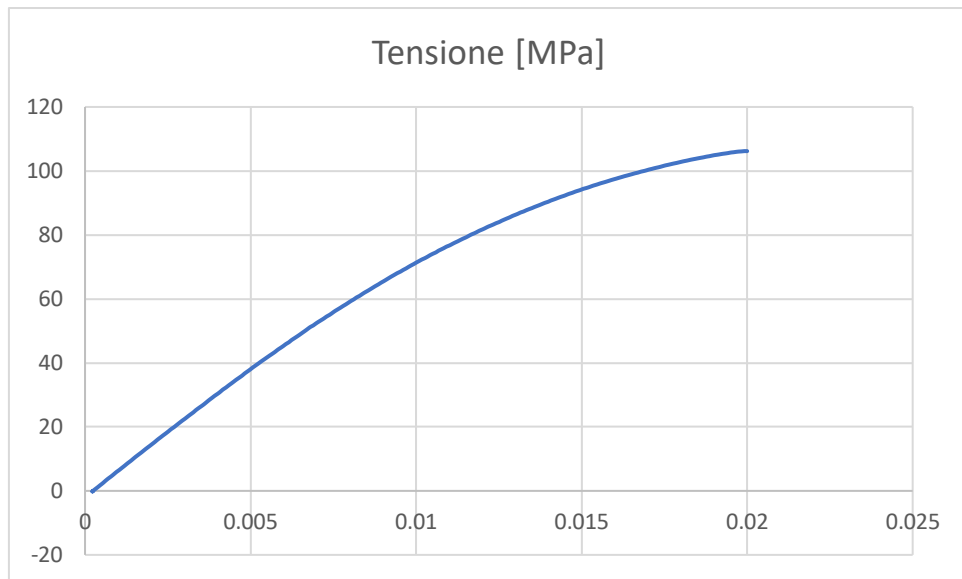


Figura 51. Grafico curva tensione provino ricorno3

E	sigma max	Sigma s	Unità
10759	103,75434	87	MPa

Tabella 29. Valori del modulo di Young, sigma di snervamento e sigma massima provino ricorno3



Figura 52. Rottura provino ricorno3 in seguito al test di trazione

## 6.5 Valutazione dell'impatto ambientale

Per andare a valutare l'impatto ambientale (Life-Cycle Assesment), abbiamo usato due software principali: SimaPro ed il foglio di calcolo Excel. L'LCA è stato valutato considerando 2 parametri principali: il GWP100 e il CED.

### 6.5.1 SimaPro

Il software SimaPro è prodotto dalla società olandese Prè Consultant e, oggi giorno, è uno dei

software più utilizzati per condurre studi LCA. Viene utilizzato in oltre 80 paesi da industrie e accademici per valutare le prestazioni ambientali di vari prodotti, processi e servizi. viene utilizzato per diverse applicazioni come l'impronta di carbonio e idrica, la progettazione di prodotti, la generazione di dichiarazioni ambientali di prodotto e la determinazione di indicatori chiave di prestazione (<https://simapro.com/>).

Le caratteristiche principali di SimaPro sono:

- La possibilità di scegliere tra diversi pacchetti, a seconda delle esigenze dell'utente.
- Interfaccia utente intuitiva conforme a ISO 14040.
- Facile modellazione, con la sezione "Wizard" per l'assistenza all'utente.
- Modellazione parametrizzata con analisi di scenario. Ciò consente, ad esempio, di eseguire analisi di sensitività, analisi di incertezza e definire relazioni non lineari tra i diversi parametri.
- Collegamento diretto a database Excel o ASP.
- Calcoli diretti della valutazione dell'impatto da ogni fase del modello.
- Analisi Monte Carlo.
- Risultati disponibili in grafici e tabelle.
- Analisi interattiva dei risultati, con possibilità di risalire ai risultati alle origini.
- Raggruppamento dei risultati.
- Analisi dei punti deboli. L'albero del processo può essere utilizzato per identificare eventuali "punti caldi".
- Utente singolo o multiutente.

Il software SimaPro include molti database di inventario che includono migliaia di processi e materiali. Il database da me utilizzato è il seguente:

- Ecoinvent 3.1

È incluso per impostazione predefinita nel software ed è il database LCI più grande e coerente sul mercato. Comprende oltre 15.000 set di dati LCI nei settori della fornitura di energia, agricoltura, trasporti, biocarburanti e biomateriali, rinfuse, prodotti chimici, materiali da costruzione, tessili, metalli di base e preziosi, lavorazione dei metalli, elettronica, prodotti lattiero-caseari, legno e trattamento dei rifiuti

Parametri:

GWP100: Potenziale di riscaldamento globale per un periodo di 100 anni → kg di CO<sub>2</sub> emessi da un processo/materiale in un periodo di 100 anni.

CED: Cumulative Energy demand, fabbisogno energetico cumulativo per ogni processo/materiale.

### 6.5.2 Scenari

1. Provino stampato senza ricottura
2. Provino stampato con ricottura in macchina a 380 °C
3. Provino stampato con ricottura in forno esterno a 200 °C

### 6.5.3 Unità funzionale

Nel calcolo dei vari parametri ho considerato come unità funzionale la stampa di 1 provino, effettuando eventuali proporzioni nel caso in cui i valori ricavati riguardavano più provino come, ad esempio, per la ricottura in forno dove venivano ricotti in forno 3 provini per volta.

### 6.5.4 Fasi considerate

Ci siamo focalizzati sul processo produttivo non andando a considerare il fine vita del prodotto ("dalla culla al cancello).

Trasporto materiale → Stampa → Ricottura

Materiali considerati: Colla – PEEK - Fibra di Carbonio

Nell'andare a valutare gli impatti ambientali mi sono affidato al database Ecoinvent 3.1 integrato nel software SimaPro, in questo database non sono presenti materiali come PEEK e fibra di carbonio che ho dovuto ricavare dalla letteratura scientifica.

### 6.5.5 Life-Cycle Inventory

Tutti i valori riportati riguardano la stampa di 1 provino

Stampa senza ricottura:

- Consumo energetico camera: 2,75 kWh
- Consumo energetico macchina: 0,83 kWh

Stampa con ricottura:

- Consumo energetico camera: 2,75 kWh
- Consumo energetico macchina: 1,02 kWh

Stampa con ricottura in forno:

- Consumo stampa: 3,58 kWh

- Consumo forno: 0,216 kWh

Tutti questi valori sono stati ricavati con lo strumento di misura della potenza elettrica [figura 12].

Una volta effettuate le misurazioni dirette ho inserito i dati su SimaPro.

Di seguito possiamo vedere il diagramma ad albero del processo di stampa senza ricottura

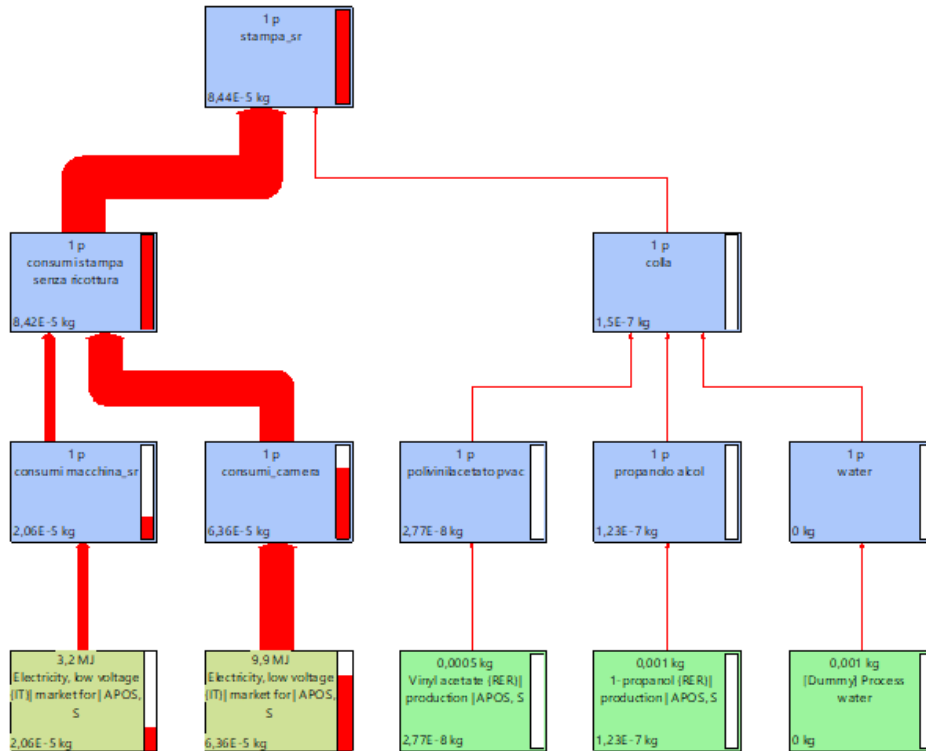


Figura 53. Diagramma ad albero processo di stampa provino senza ricottura. SimaPro.

Come possiamo notare i valori energetici sono quelli ricavati dalla misurazione diretta mentre per i materiali di consumo il discorso è diverso. La Magigoo azienda produttrice della colla utilizzata per motivi di privacy non fornisce la composizione chimica della colla per cui ne ho presa una simile con la seguente composizione: Polivinilacetato (PVAC), Alcohol isopropilico (Isopropyl Alcohol), Acqua, il rapporto tra i 3 componenti è di 1:2:2 quindi la percentuale è 20%, 40%, 40%. Considerando anche il fatto che un barattolo di colla è 50g e che per la stampa di un provino si usano 2,5 g di colla; dunque, per la stampa di 1 provino si usano: 0,0005 g di Polivinilacetato, 0,001 g di alcohol isopropilico e 0,001 g di acqua. Lo stesso discorso è stato fatto per la stampa con ricottura in macchina e quella con ricottura su forno esterno.

Di seguito il diagramma ad albero del processo produttivo di stampa con ricottura in macchina



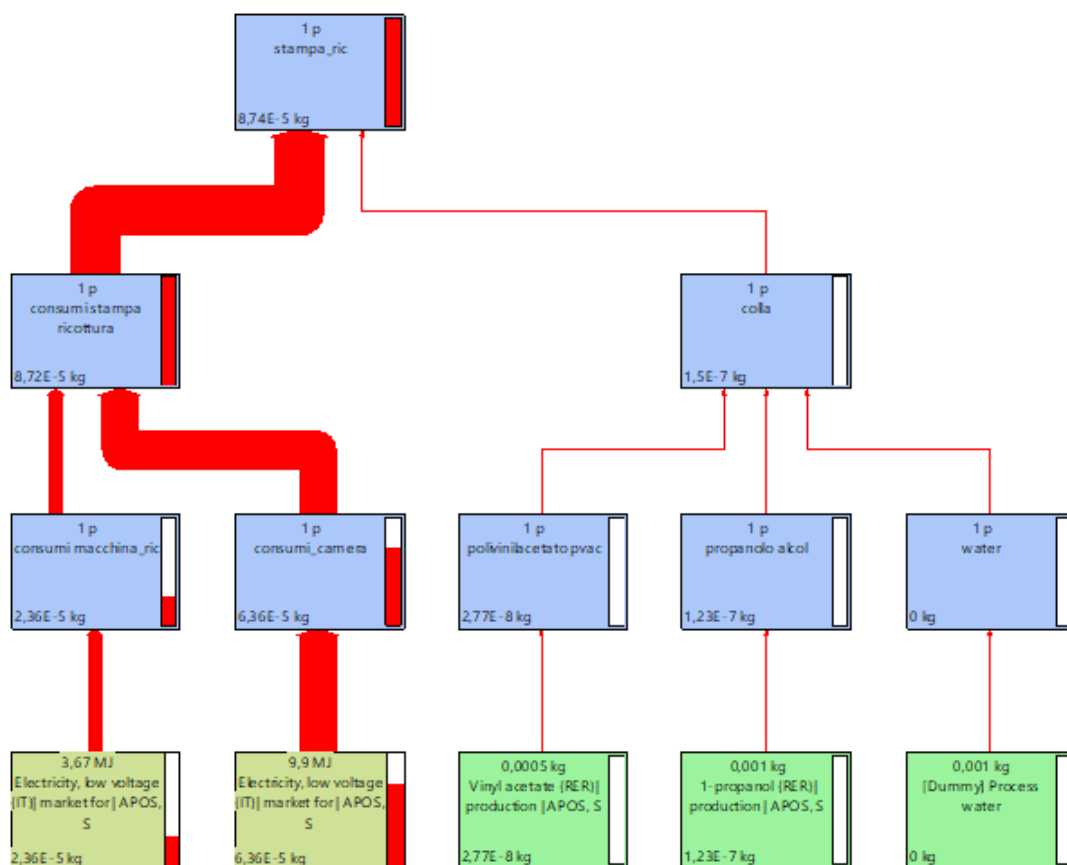


Figura 54. Diagramma ad albero stampa con ricottura in macchina. SimaPro

Questo invece il diagramma del processo produttivo di stampa con ricottura in forno.

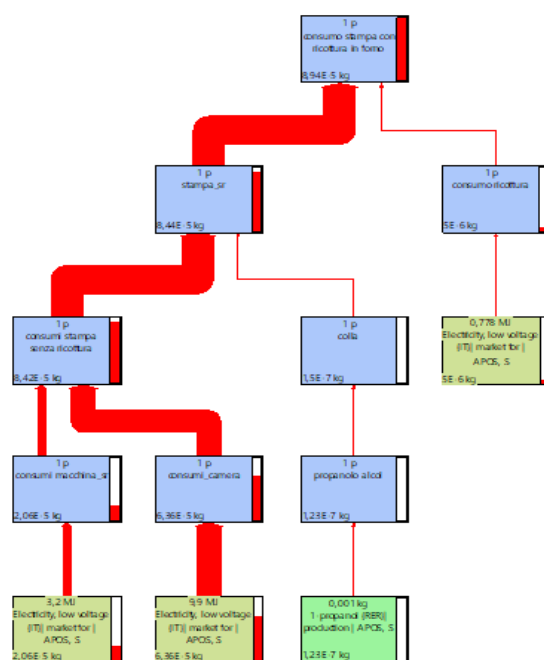


Figura 55. Diagramma ad albero stampa con ricottura in forno. Simapro

Di seguito è riportato il valore dei trasporti per quanto riguarda il carbon-peek

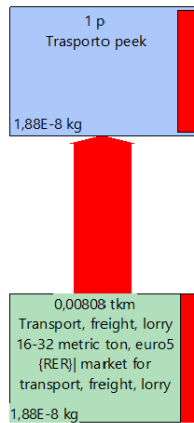


Figura 56. Valore trasporto carbon-peek per la stampa di 1 provino

Per quanto riguarda il trasporto del carbon-PEEK ho considerato la Roboze come la nostra azienda fornitrice e dunque ho calcolato la distanza in km tra la suddetta azienda e il laboratorio di Fermo tech: 414 km per trasportare 1 kg di carbon-PEEK, poi ho fatto la proporzione in base al peso del materiale utilizzato per la stampa di 1 provino ovvero 19,52 g.

Di seguito è riportato il valore dei trasporti per quanto riguarda la colla:

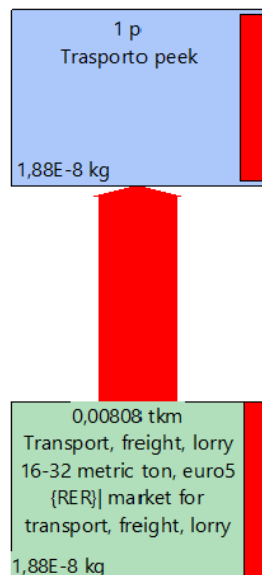


Figura 57. Valore trasporto colla per la stampa di 1 provino

Per quanto riguarda il trasporto della colla ho considerato la nostra azienda fornitrice di Livorno e dunque ho calcolato la distanza in km tra la suddetta azienda e il laboratorio di Fermo tech: 388 km

per trasportare 1 kg di colla, poi ho fatto la proporzione in base al peso della colla utilizzata per la stampa di 1 provino ovvero 2,5 g.

Una volta che ho avuto a disposizione tutti i dati ho potuto calcolare tramite SimaPro ed Excel il Global Warming Potential (GWP100) e il Cumulative energy demand (CED).

GWP 100 STAMPA				
Categoria di danno	Unità	Totale	consumi stampa ricottura	colla
GWP100	kg CO2-eq	1,4435371	1,4393692	0,004167881
consumi stampa senza ricottura				
Categoria di danno	Unità	Totale	consumi stampa senza ricottura	colla
GWP100	kg CO2-eq	1,3939037	1,3897358	0,004167881

Tabella 30. GWP100 stampa con e senza ricottura + colla

CED STAMPA				
Categoria d'impatto	Unità	Totale	consumi stampa ricottura	colla
Totale	MJ	32,020502	31,891809	0,12869266
Non renewable, fossil	MJ	20,907447	20,798066	0,10938066
Non-renewable, nuclear	MJ	3,5307546	3,5180774	0,01267717
Non-renewable, biomass	MJ	0,00401953	0,004017125	2,40E-06
Renewable, biomass	MJ	0,83630166	0,83371936	0,0025823
Renewable, wind, solar, geothe	MJ	3,207058	3,2056054	0,001452667
Renewable, water	MJ	3,5349213	3,5323239	0,002597463
consumi stampa senza ricottura				
Categoria d'impatto	Unità	Totale	consumi stampa senza ricottura	colla
Totale	MJ	30,920784	30,792092	0,12869266
Non renewable, fossil	MJ	20,190272	20,080891	0,10938066
Non-renewable, nuclear	MJ	3,4094416	3,3967644	0,01267717
Non-renewable, biomass	MJ	0,003881009	0,003878604	2,40E-06
Renewable, biomass	MJ	0,80755272	0,80497042	0,0025823
Renewable, wind, solar, geothe	MJ	3,0965199	3,0950673	0,001452667
Renewable, water	MJ	3,413117	3,4105196	0,002597463

Tabella 31. CED stampa con e senza ricottura + colla

GWP100 TRASPORTO PEEK			
Categoria di danno	Unità	Totale	Transport, freight, lorry 16-32 metri
GWP100	kg CO2-eq	0,001335194	0,001335194

Tabella 32. GWP100 trasporto Carbon-PEEK

CED TRASPORTO PEEK			
Categoria d'impatto	Unità	Totale	Transport, freight, lorry 16-32 metri
Non renewable, fossil	MJ	0,021108819	0,021108819
Non-renewable, nuclear	MJ	0,00043404	0,00043404
Non-renewable, biomass	MJ	4,72E-07	4,72E-07
Renewable, biomass	MJ	7,65E-05	7,65E-05
Renewable, wind, solar, geothe	MJ	5,28E-05	5,28E-05
Renewable, water	MJ	0,000164401	0,000164401

Tabella 33. CED trasporto Carbon-PEEK

GWP100 TRASPORTO COLLA			
Categoria di danno	Unità	Totale	Transport, freight, lorry 16-32 metri
GWP100	kg CO2-eq	0,000160264	0,000160264

Tabella 34. GWP100 trasporto colla

CED TRASPORTO COLLA			
Categoria d'impatto	Unità	Totale	Transport, freight, lorry 16-32 metri
Non renewable, fossil	MJ	0,002533702	0,002533702
Non-renewable, nuclear	MJ	5,21E-05	5,21E-05
Non-renewable, biomass	MJ	5,66E-08	5,66E-08
Renewable, biomass	MJ	9,18E-06	9,18E-06
Renewable, wind, solar, geother	MJ	6,34E-06	6,34E-06
Renewable, water	MJ	1,97E-05	1,97E-05

Tabella 35. CED trasporto colla

Categoria d'impatto	Unità	Totale	stampa_sr	consumo ricottura
Non renewable, fossil	MJ	21,381885	20,190272	1,1916133
Non-renewable, nuclear	MJ	3,6110078	3,4094416	0,20156624
Non-renewable, biomass	MJ	0,004111168	0,003881009	0,000230159
Renewable, biomass	MJ	0,85532019	0,80755272	0,047767475
Renewable, wind, solar, geother	MJ	3,2801833	3,0965199	0,18366333
Renewable, water	MJ	3,6154995	3,413117	0,20238248

Tabella 36. CED Stampa con ricottura in forno.

Categoria d'impatto	Unità	Totale	stampa_sr	consumo ricottura
GWP100 - fossil	kg CO2-eq	1,4686096	1,3865761	0,082033548
GWP100 - biogenic	kg CO2-eq	0,005734919	0,005413927	0,000320992
GWP100 - land transformation	kg CO2-eq	0,00202693	0,001913633	0,000113297

Tabella 37. GWP100 Stampa con ricottura in forno.

Per quanto riguarda PEEK e Fibra di Carbonio ho dovuto calcolare GWP100 e CED tramite il foglio di calcolo Excel prendendo i dati dalla letteratura scientifica [1].

Process	Energy intensity (kwh/kg) [ei]	MJ
Carbon fiber production	155	558
Peek Production	77,78	280

Tabella 38. Valori Intensità energetica per produrre 1 kg di CF e PEEK presi da letteratura scientifica [1].

Il valore dell'Intensità energetica per produrre 1 kg di Fibra di Carbonio ed il valore dell'intensità energetica per produrre 1 kg di PEEK sono stati ricavati da [1].

Per svolgere i calcoli ho usato le seguenti formule:

$$Ei = mi * ei \quad (1); \quad GWP100 = Ei * \frac{mCO2eq}{kWh} \quad (2)$$

dove  $E_i$  (1) è l'energia totale di ogni processo in kWh,  $m_i$  è la massa totale in kg di ogni materiale coinvolto,  $e_i$  è l'intensità energetica per ogni processo in kWh/kg, GWP100 (2) è il potenziale di riscaldamento globale per un periodo di 100 anni in kg,  $mCO_2eq$  è la massa in kg di emissione di CO2 prodotta dal consumo di 1 kWh di energia elettrica.

È stato considerato l' $mCO_2eq$  pari a 0,34 kg CO<sub>2</sub>eq/kWh [1]

Peso materiale in kg		
Provino	0,01952	kg
PEEK (80%)	0,015616	kg
CF (20 %)	0,00394	kg

Tabella 39. Peso di ciascun materiale per la stampa di 1 provino.

LCA	PEEK	CF
$E_i (m * e_i)$	1,21461248	2,19852

Tabella 40. Calcolo  $E_i$  PEEK e CF

Nella Tabella 40 abbiamo  $E_i$  PEEK = peso del PEEK (0,015616) kg \*  $e_i$  per la produzione del PEEK (77.78) kWh = 1,21461248;  $E_i$  CF = peso CF (0,00394)kg \*  $e_i$  per la produzione di CF (155) kWh = 2,19852.

CED per 1 kg CF	493,62 MJ
-----------------	-----------

Tabella 41. CED per la produzione di 1 kg di CF [2].

GWP100 PEEK	GWP100 CF	Unità
0,412968243	0,7474968	kgCO <sub>2</sub> eq

Tabella 42. GWP100 PEEK e CF per la produzione di 1 provino

GWP100 del PEEK è dato da:  $E_i$  PEEK (1,214612) \* 0,34; GWP100 CF è dato da:  $E_i$  CF (2,19852) \* 0,34.

CED PEEK	CED CF	
4,37248	1,9448628	MJ

Tabella 43. CED PEEK e CF per la produzione di 1 provino

CED del PEEK è dato da: peso PEEK (0,015616) \*  $e_i$  PEEK (280) = 4,37248 MJ

CED CF: peso CF (0,00394) \* CED CF (493,62) [2] = 1,9448628 MJ

## 6.6 Valutazione dell'impatto Economico

La valutazione dell'impatto Economico (Life-cycle Costing) è stata effettuata tramite Excel andando a considerare tutti i costi effettuati durante il processo produttivo, come mostrato nella tabella sottostante (Tabella 44).

Input		Unità di misura	valore
Materiali	Carbon Peek	€/kg	566,67
	Colla	€/kg	1124,6
Parti	Massa provino	kg	0,01831
	Massa supporto	kg	0,00121
	Massa colla	kg	0,0025
	Costo Forno	€	4010,14
Macchina	Costo Stampante	€	15616
	Lifetime	anni	10
	infrastructure cost (% machine cost)	%	0,01
	maintenance (% machine cost)	%	0,03
	machine uptime	%	80%
	hours/day	h	8,00
	days/week	d	5,00
Processi	Tempo totale	h	2,13
	Tempo di presiriscaldamento (macchina)	h	0,25
	Tempo di presiriscaldamento (camera)	h	0,25
	Tempo di stampaggio (macchina)	h	1,88
	Tempo di stampaggio (camera)	h	1,88
	Tempo di preriscaldamento ricottura	h	0,25
	tempo di stampa ricottura	h	1,88
	Tempo di setup, operatore	h	0,2
	Rimozione provino	h	0,1
	cambio ugello	h	0,5
	Tempo di utilizzo ugello	h	160
	design	h	0,5
	Prod volume	parts	10
	labor cost	€/h	30
	Designer cost	€/h	35
Energia	costo energia	€/kWh	0,17
	Pre-riscaldamento macchina	kWh	0,19
	Pre-riscaldamento camera	kWh	0,35
	Stampa macchina	kWh	0,7
	Stampa camera	kWh	2,4
	Pre-riscaldamento Ricottura	kWh	0,22
	Stampa Ricottura	kWh	0,8
	Ricottura in forno	kWh	0,216

Tabella 44. Dati e costi per la prova sperimentale.

Sia per il costo del forno per la ricottura che per quello della stampante ho considerato il prezzo di vendita presente nel mercato attuale, per entrambi ho stimato un tempo di vita utile di 10 anni, allo stesso modo il tempo di utilizzo di entrambi i macchinari è di 8 ore al giorno per 5 giorni settimanali. Per quanto riguarda il costo dell'energia, è stato considerato il costo base di € al kWh nel nostro paese.

Utilizzo della macchina	Valore	Unità
Forno	4050,24	€
Macchina e infrastruttura (stampante)	15772,16	€
Manutenzione annua (stampante)	468,48	€
Manutenzione annua (forno)	120,30	€
h di funzionamento annuo (stampante)	1600,00	h/yrs
h di funzionamento annuo (forno)	3200,00	h/yrs
Costo annuo (forno)	525,33	€
Costo annuo macchina (stampante)	2045,70	€
Costo orario (stampante)	1,28	€
Costo orario (forno)	0,16	€

Tabella 45. Costi di utilizzo della macchina

- Manutenzione annua stampante: costo stampante\*percentuale di manutenzione
- Manutenzione annua forno: costo forno\*percentuale di manutenzione
- Ore di funzionamento annuo stampante: ore al giorno (8) \*giorni alla settimana (5) \*machine uptime (80%)\*50
- Ore di funzionamento annuo forno: ore al giorno (16) \*giorni alla settimana(5) \*machine uptime (80%)\*50
- 50→ settimane di lavoro annuo
- Costo annuo stampante: costo stampante + manutenzione annua / lifetime
- Costo annuo forno: costo forni + manutenzione annua / lifetime
- Costo orario stampante: ore di funzionamento annuo stampante / costo orario stampante
- Costo orario forno: ore di funzionamento annuo forno/ costo orario forno

Costi totali di produzione	Valore	Unità
Materiali Grezzi	13,87	€
Utilizzo del forno	0,38	€
Utilizzo della macchina	3,11	€
Manodopera	9,09	€
Energia senza ricottura	0,62	€
Energia ricottura	0,17	€
Design	1,75	€
Energia forno	0,04	€
totale	28,99	€

Tabella 46. Costi totali di produzione

- Materiali grezzi: Costo al kg Carbon-PEEK \* (Massa provino + Massa supporto) + colla \* massa colla

- Utilizzo forno: Costo orario forno \* (2+ tempo setup operatore + tempo rimozione provino)
- Utilizzo della macchina: Costo orario stampante \* (tempo totale stampa + tempo setup operatore + tempo di rimozione provino)
- Manodopera: labor cost \* (tempo setup operatore + tempo rimozione provino) + cambio ugello \* (labor cost / tempo utilizzo ugello)
- Energia senza ricottura: costo energia \* (preriscaldamento macchina + preriscaldamento camera + stampa macchina + stampa camera)
- Energia ricottura: costo energia \* (preriscaldamento ricottura + stampa ricottura)
- Design: Designer cost \* (tempo di design / volume di produzione)
- Energia Forno: Costo energia \* ricottura in forno

### 6.6.1 Costo unitario in base al volume di produzione

VOLUME	design	resto	costo totale	costo unitario
1	17,5	27,24333	44,7433289	44,74332894
2	8,75	54,48666	71,9866579	35,99332894
3	5,833333	81,72999	99,2299868	33,07666228
4	4,375	108,9733	126,473316	31,61832894
5	3,5	136,2166	153,716645	30,74332894
6	2,916667	163,46	180,959974	30,15999561
7	2,5	190,7033	208,203303	29,74332894
8	2,1875	217,9466	235,446632	29,43082894
9	1,944444	245,19	262,68996	29,18777339
10	1,75	272,4333	289,933289	28,99332894
11	1,590909	299,6766	317,176618	28,83423804
12	1,458333	326,9199	344,419947	28,70166228
13	1,346154	354,1633	371,663276	28,58948279
14	1,25	381,4066	398,906605	28,49332894
15	1,166667	408,6499	426,149934	28,40999561
16	1,09375	435,8933	453,393263	28,33707894
17	1,029412	463,1366	480,636592	28,27274071
18	0,972222	490,3799	507,879921	28,21555117
19	0,921053	517,6232	535,12325	28,16438158
20	0,875	544,8666	562,366579	28,11832894

Tabella 47. Volume di produzione in relazione ai costi.



Come possiamo vedere nella tabella all'aumentare del volume di produzione diminuisce il costo di produzione, stabilizzandosi intorno a circa 28 € al pezzo, questo ci potrebbe indirizzare verso una produzione per lotti unitari o piccoli/medi se necessario.

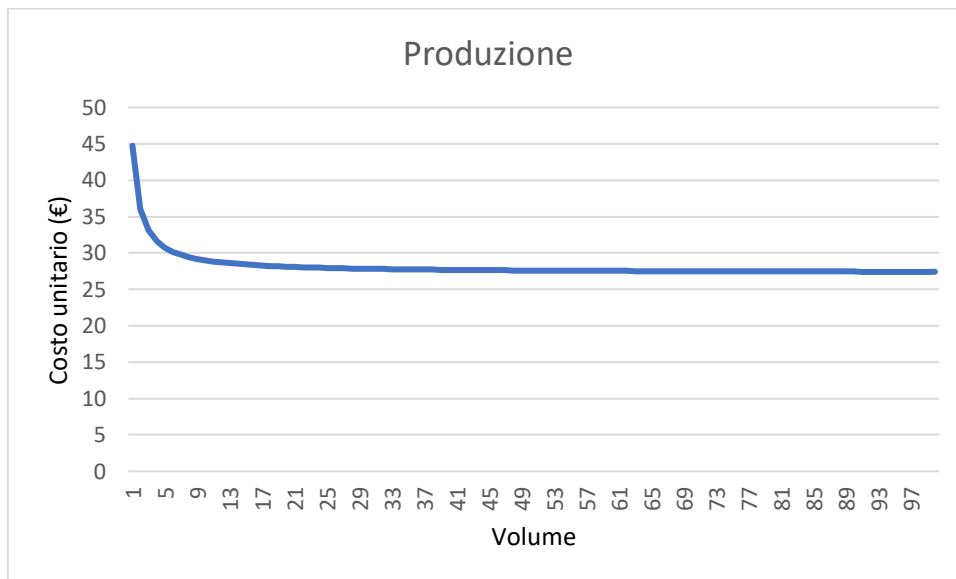


Figura 58. Andamento del costo unitario in base al volume di produzione.

## CAPITOLO 7

### RISULTATI

#### 7.1 Risultati prove di trazione

Provino	E [Mpa]	Sigma max [Mpa]	Sigma s [Mpa]
NR1	9938,8	91,0	77,0
NR2	10388,0	97,2	80,5
NR3	9016,4	83,7	68,5
RICFORNO1	12971,0	114,3	95,0
RICFORNO2	8643,7	87,2	72,5
RICFORNO3	10759,0	103,8	87,0
RICMAC1	10999,0	101,4	86,2
RICMAC2	8417,1	78,0	62,8
RICMAC3	10827,0	99,8	86,2

Tabella 48. Risultati prove di trazione

Come possiamo vedere nella tabella abbiamo i risultati in termini di Modulo di Young (E), Tensione massima (sigma max) e Tensione di snervamento (sigma s); dalla tabella si evince anche che per ogni parametro c'è un valore che si discosta dagli altri 2, questo valore è da attribuire ad un provino uscito male e dunque non è stato considerato nell'elaborazione dei risultati.

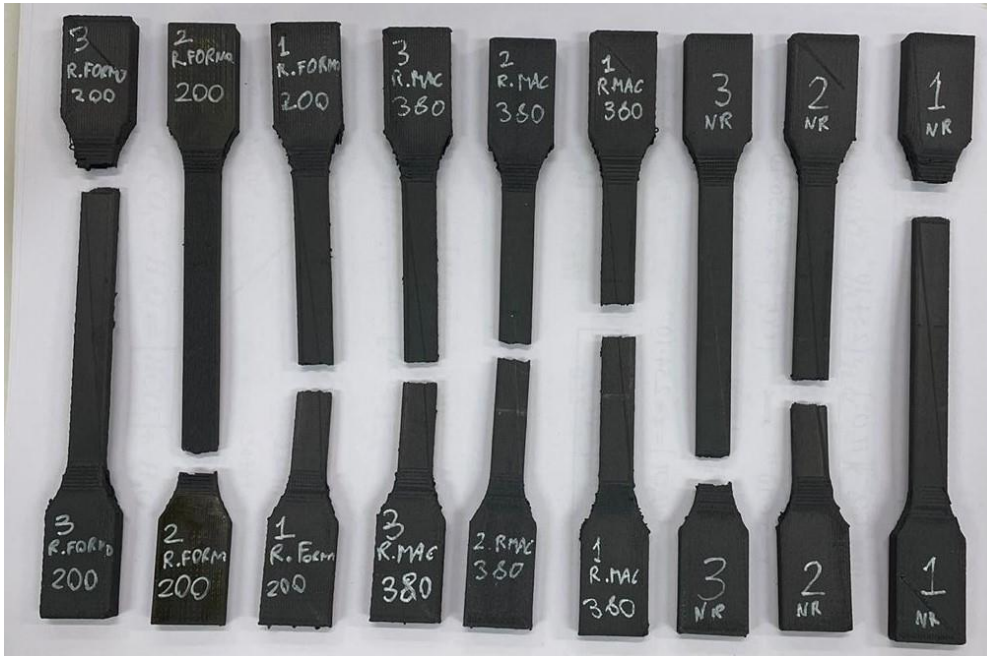


Figura 59. Punto di rottura dei diversi provini a seguito del test di trazione.

Nel proseguo dell'elaborazione dei risultati ho trovato un valore medio per i diversi parametri come mostrato nella tabella e nei grafici sottostanti

	MEDIA E	MEDIA SIGMA MAX	MEDIA SIGMA S
NR	10163,4	94,1	78,8
RICFORNO	11865,0	109,0	91,0
RICMAC	10913,0	100,6	86,2

Tabella 49. Valori medi dei parametri del test di trazione

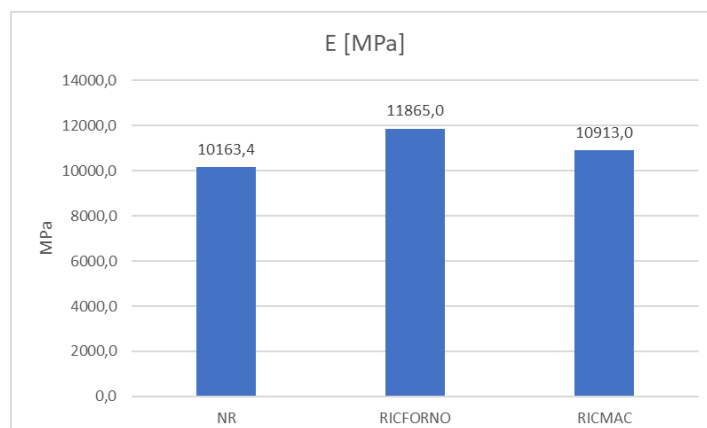


Figura 60. Istogramma Modulo di Young Medio.

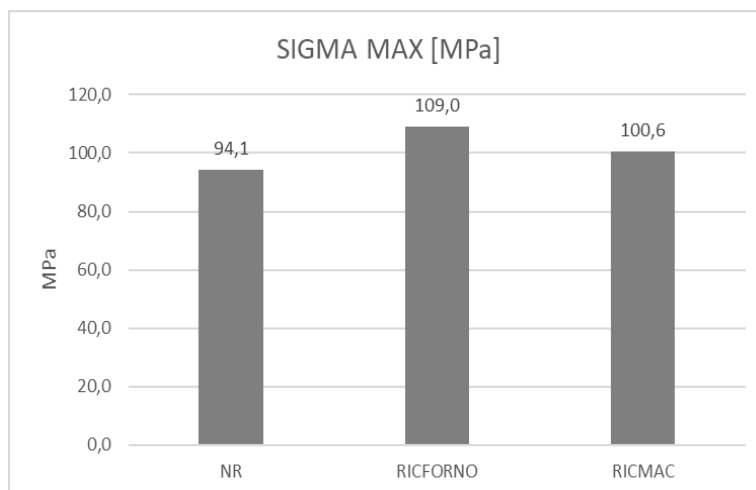


Figura 61. Istogramma Sigma max medio

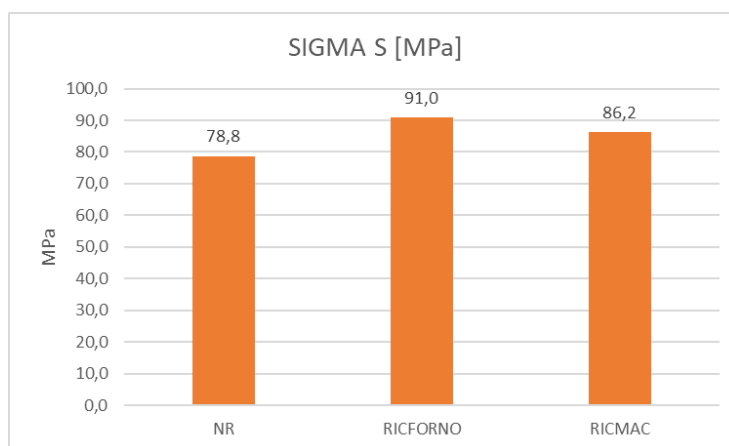


Figura 62. Istogramma sigma snervamento medio.

Come possiamo vedere dai grafici e dalle tabelle i provini con le maggiori prestazioni meccaniche sono quelli ricotti in forno, poiché hanno un valore maggiore di tutti e 3 i parametri.

Nello studio dei risultati ho anche fatto una stima percentuale dei valori trovati mettendoli a confronto con quello massimo per ogni parametro (Tabella 50):

Valore percentuale	E[Mpa]	Sigma max [Mpa]	Sigma s[Mpa]
NR1	0,956758	0,936543959	0,956521739
NR2	1	1	1
NR3	0,867963	0,86115378	0,850931677
RICFORNO1	1	1	1
RICFORNO2	0,666387	0,763238512	0,763157895
RICFORNO3	0,829466	0,908134267	0,915789474
RICMAC1	1	1	1
RICMAC2	0,76526	0,76947887	0,728538283
RICMAC3	0,984362	0,984460303	1

Tabella 50. Valori (E, sigma s, sigma max) messi a confronto con quello massimo

NR2	10388	97,20099	80,5	Unità
RICFORNO1	12971	114,25	95	MPa
RICMAC1	10999	101,3855	86,2	MPa

Tabella 51. Provini con maggiori prestazioni meccaniche

NR2	80%	85%	85%
RICFORNO1	100%	100%	100%
RICMAC2	85%	89%	91%

Tabella 52. Provini con maggiori prestazioni meccanica espressi in valori percentuali

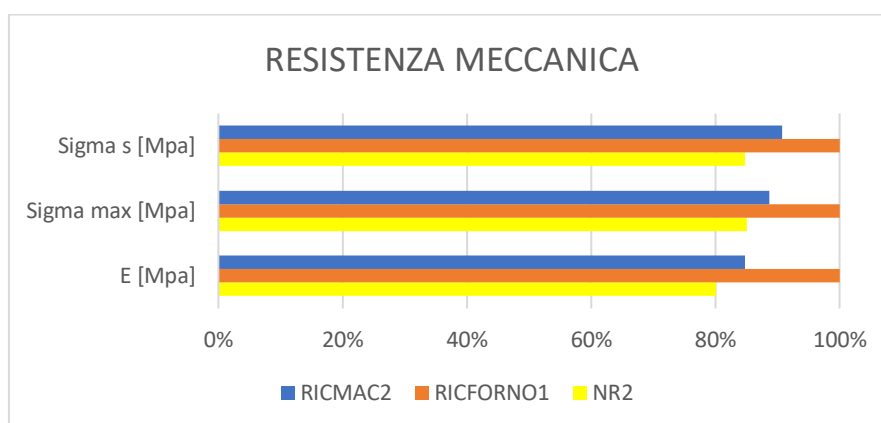


Figura 63. Istogramma Parametri in valore percentuale resistenza meccanica

Como si può vedere dai dati appena mostrati il provino con maggiore resistenza meccanica è stato "RICFORNO1".

## 7.2 Risultati LCA

GWP100	Senza ricottura	Con ricottura in macchina	Con ricottura in forno
Processo/Materiale	SR	RMAC	RFORNO
Stampaggio	1,3897	1,3897	1,3897
Ricottura		0,0496	0,0825
Colla	0,0042	0,0042	0,0042
PEEK	0,4130	0,4130	0,4130
Fibra di Carbonio	0,2076	0,2076	0,2076
Trasporto Carbon-PEEK	0,0013	0,0013	0,0013
Trasporto colla	0,0002	0,0002	0,0002
Totale	2,0160	2,0656	2,0985
	kgCo2eq.	kgCO2eq.	kgCO2eq.

Tabella 53. Risultati GWP100 dei tre diversi provini.

CED	Senza Ricottura	Ricottura	Ricottura in forno
Processo/Materiale	SR	RMAC	RFORNO
Stampaggio	30,7921	30,7921	30,7921
Ricottura		1,0997	1,8272
Colla	0,1287	0,1287	0,1287
PEEK	4,3719	4,3719	4,3719
Fibra di Carbonio	1,9449	1,9449	1,9449
Trasporto Carbon-PEEK	0,0211	0,0211	0,0211
Trasporto colla	0,0025	0,0025	0,0025
Totale	37,2612	38,3609	39,0884
	MJ	MJ	MJ

Tabella 54. Risultati CED dei tre diversi provini

Una volta a disposizione i dati li ho aggregati in 3 diverse categorie:

1. Stampaggio
2. Ricottura
3. Materiali: Colla + PEEK + Fibra di Carbonio
4. Trasporto: Trasporto Carbon-PEEK + Trasporto colla

GWP100	SR	RMAC	RFORNO
Stampaggio	1,390	1,390	1,390
Ricottura	0,000	0,050	0,082
Materiali	1,165	1,165	1,165
Trasporto	0,001	0,001	0,001
Totale	2,556	2,605	2,638

Tabella 55. Valori aggregati GWP100

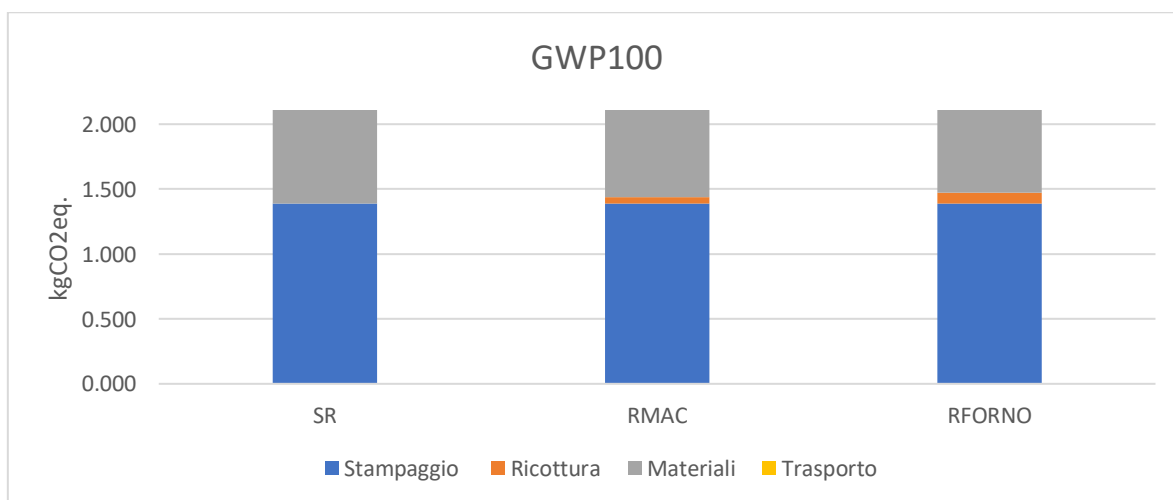


Figura 64. Istogramma contributo GWP100 dei diversi processi aggregati

CED	SR	RMAC	RFORNO
Stampaggio	30,792	30,792	30,792
Ricottura	0,000	1,100	1,827
Materiali	6,445	6,445	6,445
Trasporto	0,024	0,024	0,024

Tabella 56. Valori aggregati CED

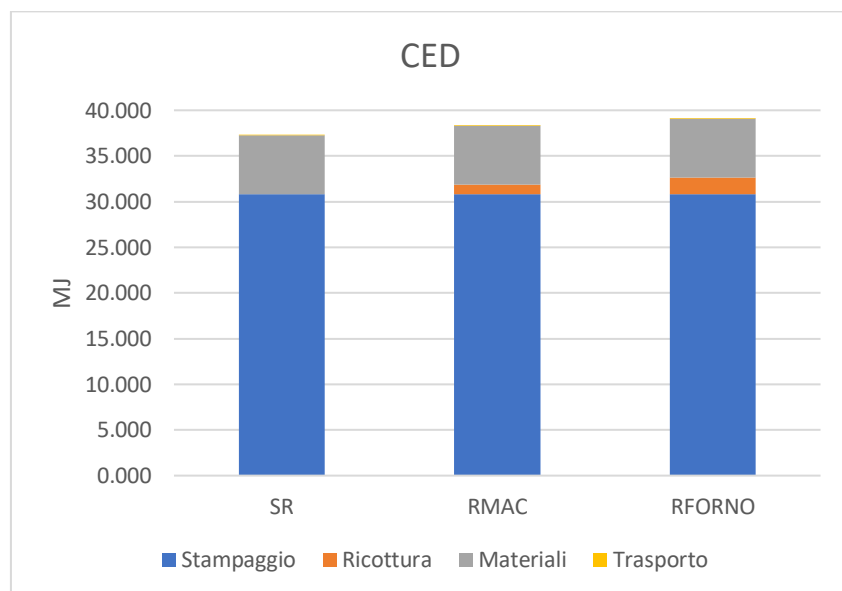


Figura 65. Istogramma contributo CED dei diversi processi aggregati

Come si evince dai diversi grafici e tabelle il processo con minor impatto ambientale è la stampa senza ricottura.

### 7.3 Risultati LCC

Questi sono i costi totali per la stampa di 1 provino

Costi totali	Valore	Unità
totale senza ricottura	28,44	€
totale con ricottura in macchina	28,62	€
totale con ricottura forno	28,86	€

Tabella 57. Tabella dei costi totali

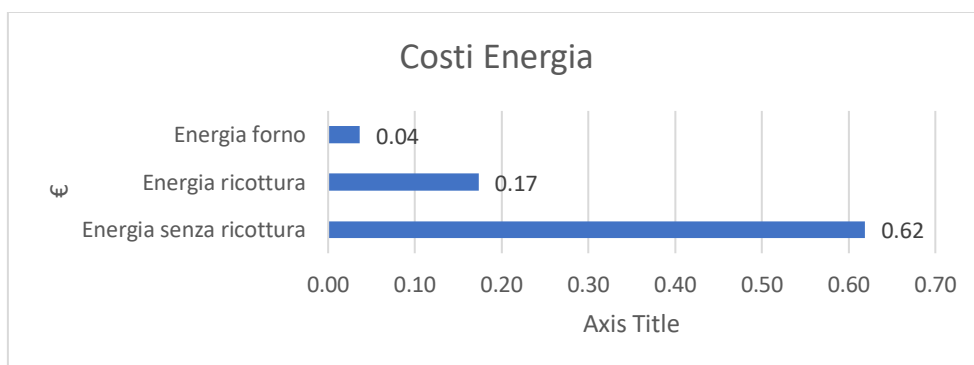


Figura 66. Istogramma costi energia

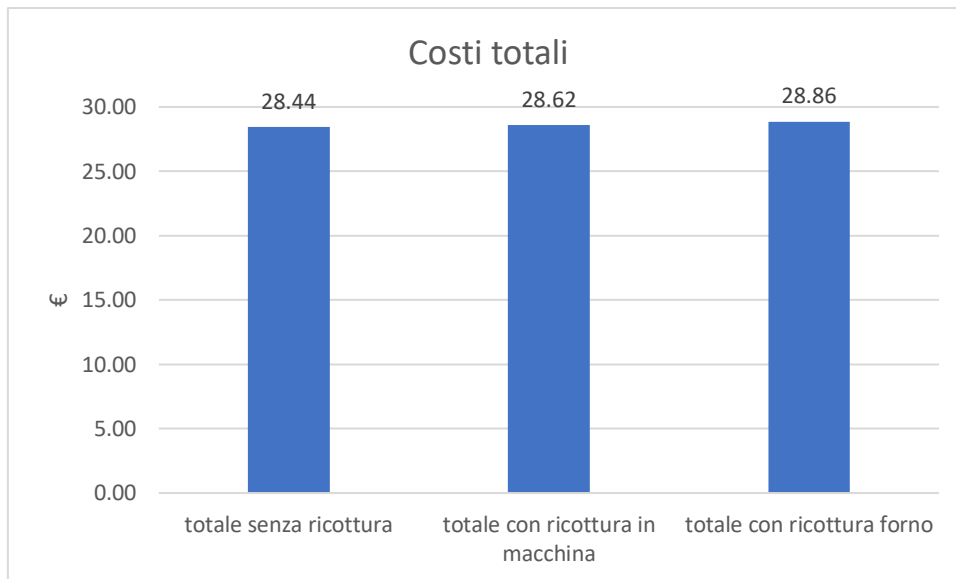


Figura 67. Istogramma costi totali

Come si evince dalla Figura i costi totali sono molto simili per ogni processo, quello che costa meno è la stampa senza ricottura.

#### 7.4 Risultati totali in valore percentuale

	<b>GWPI 100</b>	<b>CED</b>	<b>COSTI</b>	<b>RESISTENZA MECCANICA</b>
SR	95%	96%	98%	83.3%
RMAC	98%	98%	99%	88%
RFORNO	100%	100%	100%	100%

Tabella 58. Tabella contributi percentuali LCA, LCC e Prove di trazione.

## CAPITOLO 8

### CONCLUSIONI

Alla luce dei risultati raggiunti posso fare diverse considerazioni riguardo questa procedura sperimentale, innanzitutto per quanto riguarda gli impatti ambientali quello con valori più alti di emissioni di CO<sub>2</sub> e consumi energetici è stato il provino con ricottura in forno che ho voluto prendere come riferimento, quest'ultimo emette il 5% in più di CO<sub>2</sub> rispetto a quello senza ricottura e il 2% in più rispetto a quello ricotto in macchina, allo stesso tempo consuma il 4% in più di energia elettrica rispetto al provino senza ricottura e il 2% in più rispetto a quello ricotto in macchina, questo ovviamente è dovuto al fatto che nel caso di ricottura in macchina viene utilizzata la stampante 3D per più tempo mentre nel caso di ricottura in forno bisogna utilizzare un secondo macchinario che ha i suoi consumi energetici da aggiungere a quelli della stampante, lo stesso discorso può essere fatto per i costi, infatti anche in questo caso il provino che richiede più risorse economiche è quello ricotto in forno con il 2% in più rispetto a quello senza ricottura e l'1% in più rispetto a quello ricotto in macchina, in questo frangente possiamo dire che il gioco vale la candela poiché le prestazioni meccaniche del provino ricotto in forno sono decisamente maggiori rispetto agli altri 2, infatti il suddetto provino ha una resistenza alla trazione del 16,7% maggiore al provino senza ricottura e del 12% in più rispetto a quello ricotto in macchina.

Al termine di questa sperimentazione e alla luce delle considerazioni fatte in precedenza posso affermare che il processo di ricottura fa aumentare considerevolmente la resistenza meccanica del carbon-PEEK a discapito degli impatti ambientali e dei costi che sono maggiori sia in caso di ricottura in macchina che in caso di ricottura in forno. Quindi il processo di ricottura ha i suoi punti di forza come appunto la maggiore resistenza meccanica ma allo stesso tempo dal punto di vista ambientale ci sono degli svantaggi come la maggiore emissione di CO<sub>2</sub>; quindi, prima di scegliere il processo ottimale da sviluppare è doveroso prendere in considerazione tutte queste variabili e contestualizzarle nel proprio ambito.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Comparative Environmental and Cost Analysis of Alternative Production Scenarios Associated with a Helicopter's Canopy; Christos V. Katsiropoulos, Andreas Loukopoulos and Spiros G. Pantelakis; 2018.
- [2] Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components; Archimede Forcellese, Marco Marconi, Michela Simoncini, Alessio Vita; 2020.
- [3] Preparation of short CF/GF reinforced PEEK composite filaments and their comprehensive properties evaluation for FDM-3D printing; Peng Wang, Bin Zou, Shouling Ding, Chuanzhen Huang, Zhenyu Shi a,b,c, Yongsheng Ma, Peng Yao; 2020.
- [4] Criticality and Life-Cycle Assessment of Materials Used in Fuel-Cell and Hydrogen Technologies; Mitja Mori, Rok Stropnik, Mihael Sekavčnik and Andrej Lotrič; 2020.
- [5] Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite; Jack Howarth Sada S.R.Mareddy Paul T.Mativenga; 2014

## RINGRAZIAMENTI

Ringrazio la mia famiglia per il sostegno dato in questo periodo universitario, in particolar modo i miei genitori e le mie due sorelle Rachele e Betta per non avermi mai fatto mancare nulla.

Ringrazio Giulia che ho conosciuto in un periodo in cui stavo per mollare l'Università, senza il suo supporto e la sua presenza non sarei mai riuscito a raggiungere questo risultato, non dimenticherò mai tutte le nottate prima degli esami passate a ripassare insieme.

Ringrazio tutti i miei amici e le mie amiche che mi hanno accompagnato in questo percorso, chi ha creduto sempre in me e mi ha sostenuto nei momenti più difficili e anche chi mi ha aiutato nella comprensione e nello studio del mio ultimo esame sacrificando il proprio tempo per dedicarlo a me.

Infine, voglio ringraziare il Prof. Alessio Vita e l'Ing. Iacopo Bianchi che mi hanno seguito nello svolgimento del tirocinio e mi hanno dato consigli preziosi per la stesura della tesi.