

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

– Sede di Forlì –

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe LM – 33

TESI DI LAUREA

In TECNOLOGIE SPECIALI

VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEI PARAMETRI OPERATIVI

NEL PROCESSO DI LASER ABLATION SU MATERIALI

COMPOSITI CFRP A MATRICE EPOSSIDICA

CANDIDATO

Paolo Ravaioli

RELATORE

Prof. Lorenzo Donati

CORRELATORI

Prof. Alessandro Fortunato

Ing. Nunziante Pagano

Anno Accademico 2012/2013

Sessione III

« La scienza si avvicina asintoticamente alla verità »
(Margherita Hack)

RINGRAZIAMENTI

Innanzitutto voglio riservarmi un piccolo spazio informale, da dedicare non solo a coloro che mi hanno aiutato a realizzare questa tesi negli ultimi mesi, ma in generale a tutte le persone che mi hanno accompagnato in questa lunga avventura durata cinque anni. Non è stata certo una strada facile, e chi la ha percorsa assieme a me lo sa bene, ma oggi per me questo cammino finalmente si conclude. Sono comunque ormai consapevole che alla fine di una strada non c'è mai un traguardo, ma solo l'inizio di una nuova strada ancora più lunga. Finora la vita mi ha insegnato ad essere pessimista, però almeno per una volta lasciatemi provare il brivido di fare l'ottimista!!!

Inizio i ringraziamenti dal **prof. Lorenzo Donati**, che nonostante le questioni personali si è reso disponibile per la seconda volta come mio relatore, e mi ha proposto questo interessante ed impegnativo argomento di tesi. Ha creduto nelle mie capacità quando io stesso avevo dei dubbi e mi ha incoraggiato a fare affidamento sulle mie forze senza cercare “strade facili”, anzi spingendomi a mettere alla prova me stesso accettando questa ennesima sfida.

Ringrazio poi il **prof. Alessandro Fortunato**, che nonostante i numerosi impegni ed altre priorità sicuramente più importanti di questa, non ha esitato ad assumere il ruolo di mio correlatore. In questi mesi mi ha dimostrato grande gentilezza e disponibilità, ma nel contempo mi ha incoraggiato ad affrontare con entusiasmo questa ultima impresa per portarla a compimento nel modo migliore possibile.

Grazie infinite all'**ing. Nunziante Pagano**, che mi ha dedicato una marea di tempo in laboratorio per seguirmi pazientemente in tutta l'attività sperimentale, insegnandomi tutte le operazioni necessarie per utilizzare le macchine, lavorare i campioni ed osservarne i risultati, ed infine analizzare ed interpretare i dati raccolti. Ha passato ore e ore accanto a me davanti a quel laser e davanti al computer, non facendomi mai mancare suggerimenti e consigli.

Grazie anche al **prof. Andrea Zucchelli** e ai suoi ragazzi, che ci hanno fornito il materiale composito su cui lavorare e alcune attrezzature (di loro proprietà) essenziali per il trattamento dei campioni, e sono sempre stati presenti e disponibili per suggerimenti e idee.

Un unico grande grazie ai miei **colleghi ingegneri**, che qui non posso nominare singolarmente perché mi dilungherei troppo, e perché non voglio rischiare di dimenticare qualcuno. Sono stati dei meravigliosi compagni di viaggio, con i quali in questi anni ho condiviso tante cose: studio, paure, perplessità (troppe!!!), rabbia, fatica e soprattutto una enorme quantità di tempo e risate. E' sicuramente grazie a loro se in questi lunghi anni sono sempre andato a lezione volentieri. Spero tanto che i rapporti con loro continuino anche in futuro.

Un immenso grazie ai miei migliori amici **Iuke, Mirco, Fabio, Vale, Anto, Fili, Franz** e **Ye**, perché senza di loro non sarei certo riuscito a sopportare questo difficile cammino. Sono le persone che mi conoscono meglio, sanno sempre come prendermi e come tirarmi su di morale quando non sono dell'umore giusto. Grazie per le nostre serate, le risate infinite, il supporto morale, le mille avventure che abbiamo vissuto e viviamo insieme, e per le meravigliose stupidaggini che diciamo e facciamo quando siamo insieme (e che sono ormai il nostro "marchio di fabbrica", perché non c'è alcun gusto ad essere sempre persone serie!!!).

Gli ultimi ringraziamenti, ma non per importanza, vanno a quattro persone: innanzitutto ai miei genitori **Laura** e **Claudio**, per avermi dato materialmente la possibilità di intraprendere questo lungo percorso e per avermi sopportato sia nei miei giorni "di fatica" sia in quelli in cui le mie forze e la mia voglia venivano meno; infine a mio fratello **Fabio** e alla sua ragazza **Michela**, anche senza un ruolo diretto in questo mio "cammino" ma sempre interessati e pronti ad offrire incoraggiamenti, supporto morale e consigli (ma anche tante risate e momenti piacevoli).

SOMMARIO

<u>INTRODUZIONE</u>	1
<u>CAPITOLO 1 : I MATERIALI COMPOSITI</u>	3
1.1 DEFINIZIONE E GENERALITA'	3
1.2 LA MATRICE	5
1.2.1 Compositi a Matrice Polimerica	5
1.2.2 Approfondimento: Matrici in Resina Epossidica	7
1.3 IL RINFORZO	9
1.3.1 Materiali Compositi a Fibre	10
1.3.2 Approfondimento: Fibre di Carbonio	11
1.4 INTERAZIONI FIBRA-MATRICE	15
1.5 I MATERIALI COMPOSITI A PIU' STRATI	17
1.5.1 Compositi Laminati	17
1.6 I SEMILAVORATI A BASE DI FIBRE CONTINUE	19
1.6.1 Tessuti	19
1.6.2 Preimpregnati	21
<u>CAPITOLO 2 : IL LASER</u>	23
2.1 DEFINIZIONE E GENERALITA'	23
2.2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	25
2.2.1 L'Emissione Stimolata	27
2.2.2 L'Inversione di Popolazione e il Pompaggio	28
2.2.3 Il Risonatore	29

2.2.4 Regimi di Funzionamento	30
2.2.5 Sistemi di Trasporto del Fascio	32
2.3 PROPRIETA' E PARAMETRI DELLA RADIAZIONE LASER	34
2.4 CLASSIFICAZIONE	37
2.4.1 Approfondimento: Laser Nd:YAG	39
2.5 CENNI SULLA SICUREZZA	40

CAPITOLO 3 : LAVORAZIONI LASER SUI MATERIALI COMPOSITI ... 43

3.1 INTRODUZIONE	43
3.1.1 Panorama Tecnologico	44
3.1.2 Le Lavorazioni Laser	46
3.2 TAGLIO	47
3.2.1 Letteratura Tecnica Riguardante il Taglio	50
3.3 ABLAZIONE	54
3.3.1 Letteratura Tecnica Riguardante l'Ablazione	56
3.4 SALDATURA	60
3.4.1 Letteratura Tecnica Riguardante la Saldatura	62

CAPITOLO 4 : ORGANIZZAZIONE DEL PIANO DI LAVORO 65

4.1 SCOPO DELLA TESI	65
4.2 MATERIALE UTILIZZATO	68
4.3 ATTREZZATURE IMPIEGATE	71
4.4 PROCEDURA DI LAVORO	74
4.4.1 Produzione dei Provini	74
4.4.2 Modalità di Esecuzione del Processo	76
4.4.3 Osservazione dei Risultati	79

4.5 PARAMETRI DI PROCESSO	83
<u>CAPITOLO 5 : DISCUSSIONE DEI RISULTATI DELLE PROVE</u>	89
5.1 PARAMETRI INVESTIGATI	89
5.2 RISULTATI DELLE PROVE	92
5.2.1 Profondità	94
5.2.2 Larghezza	100
5.2.3 Degrado	108
5.2.4 Temperatura	111
5.3 CONSIDERAZIONI AGGIUNTIVE	116
5.3.1 Indicazioni sui Parametri Ottimali	116
5.3.2 Problematiche del Flusso d’Aria	119
<u>CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE</u>	129
<u>APPENDICE A : TESSUTO <i>PLAIN WEAVE</i></u>	133
<u>APPENDICE B : RESINA EPOSSIDICA</u>	135
<u>APPENDICE C : NOMENCLATURA DEI LAMINATI</u>	139
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	141

INTRODUZIONE

L'attività sperimentale presentata in questo elaborato riguarda lo studio di una particolare applicazione che impiega la tecnologia laser per la lavorazione di materiali compositi ed è stata interamente svolta, in particolar modo nella sua parte operativa, presso i laboratori della Facoltà di Ingegneria a Bologna.

Il lavoro di tesi ha come obiettivo fondamentale la valutazione degli effetti che i parametri di processo possono avere sulla qualità risultante nel procedimento di ablazione per i materiali compositi. Per questa indagine sono stati utilizzati campioni piani (tutti identici tra loro) con rinforzo in fibra di carbonio e matrice in resina epossidica, i quali sono stati lavorati con un laser Nd:YAG ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) funzionante in regime continuo. L'idea alla base dell'intera attività sperimentale è stata quella di realizzare una ablazione ottimale, rimuovendo dai campioni esclusivamente la resina (in maniera locale) e tentando, allo stesso tempo, di ottenere il minimo danneggiamento possibile per le fibre.

Le prove effettuate non costituiscono naturalmente un punto di arrivo, bensì rappresentano piuttosto un punto di partenza per acquisire informazioni preliminari che potranno consentire, nel prossimo futuro, di proseguire con il perfezionamento del processo e la messa a punto dei parametri, al fine di conseguire una lavorazione che dia risultati effettivamente ottimali ed interessanti per l'eventuale applicazione industriale.

Nel CAPITOLO 1 verrà presentata una trattazione generale sui materiali compositi e i vari aspetti che li contraddistinguono, con riferimento alle straordinarie proprietà di questi materiali e soffermandosi in particolare su tutto ciò che riguarda i cosiddetti *CFRP* (*carbon fiber reinforced plastic*), oggetto di studio in questa tesi.

Il CAPITOLO 2 è interamente dedicato ad una panoramica sui laser e le loro caratteristiche salienti, con una breve esposizione riguardante i principi di funzionamento, le grandezze che li caratterizzano e le diverse tipologie di sorgente

esistenti, con particolare attenzione ai laser della famiglia Nd:YAG (di cui fa parte la macchina impiegata nell'attività qui presentata).

Nel CAPITOLO 3 saranno legati tra loro i due argomenti precedenti, discutendo dunque dell'applicazione della tecnologia laser ai materiali compositi, ponendola a confronto con le altre tecnologie concorrenti ed illustrandone le diverse possibilità, i numerosi punti di forza e le eventuali problematiche.

Il CAPITOLO 4 affronterà invece la trattazione del vero e proprio lavoro sperimentale svolto in laboratorio, con approfondimenti riguardanti le attrezzature e i materiali utilizzati, nonché le procedure di prova e le modalità di trattamento e osservazione dei campioni.

Nel CAPITOLO 5 verranno estesamente presentati ed interpretati i dati e i risultati di tutte le prove effettuate, corredati naturalmente dall'osservazione di eventuali fenomeni inattesi o problematiche insorte.

L'interpretazione generale dell'intera attività e le considerazioni finali sui risultati ottenuti saranno infine oggetto della sezione conclusiva.

CAPITOLO 1

I MATERIALI COMPOSITI

1.1 DEFINIZIONE E GENERALITA'

I compositi sono una classe di materiali molto particolare. Volendo dare una definizione del tutto generica, un materiale composito è *“una miscela di due o più componenti chimicamente differenti e insolubili tra loro i quali, pur conservando ciascuno la propria identità chimica e fisica, contribuiscono insieme a generare un materiale che vanta proprietà meccaniche e fisiche complessivamente migliori e ottimizzate rispetto a quelle dei singoli componenti come entità separate”*^{[1][3]}. Questa definizione è però valida solo a livello macrostrutturale, altrimenti anche una qualsiasi lega metallica potrebbe essere considerata un composito.

Dalla definizione generale data sopra si deduce che i compositi sono una classe di materiali molto varia, e in realtà il loro uso è molto più antico di quanto si pensi: il primo esempio che è possibile trovare nella storia sono i mattoni di fango e paglia utilizzati da civiltà remote come gli antichi egizi. Riferendosi invece alla civiltà moderna, i primi esempi di materiali compositi sono stati probabilmente materiali quali il compensato e il calcestruzzo. Anche il cemento armato è un eccellente esempio di materiale composito, in cui barre di acciaio sono “annegate” nel calcestruzzo mantenendo però la loro identità chimica e la loro funzione (le barre di acciaio sopportano i carichi di trazione, mentre il calcestruzzo sopporta quelli di compressione). Anche in natura è possibile trovare materiali compositi, come ad esempio il legno (costituito da fibre di cellulosa in una matrice di lignina).

I materiali compositi sono generalmente bifasici, cioè formati da due costituenti nettamente distinti che concorrono in modo diverso a definire le proprietà del composito:

- Matrice: è generalmente costituita da una fase continua e omogenea, ed è l'elemento che definisce la forma e il volume globali del composito. Ha il compito di trattenere gli elementi del rinforzo nella corretta posizione, trasmettere le sollecitazioni da un elemento all'altro, nonché bloccare eventuali cricche che possono insorgere negli elementi stessi. Solitamente è un materiale duttile e tenace.
- Rinforzo: è generalmente costituito da entità multiple distribuite più o meno uniformemente nella matrice, ed è l'elemento che determina le principali caratteristiche meccaniche del composito. Ha il compito di sopportare i carichi (essendo molto più rigido della matrice, su di esso si scarica la maggior parte della sollecitazione). Solitamente è un materiale rigido, elastico e fragile.

L'adesione all'interfaccia tra questi due elementi deve essere perfetta per consentire una adeguata trasmissione delle sollecitazioni, e viene a volte realizzata impiegando un terzo componente, definito legante (applicato sulla superficie del rinforzo).

Le elevate proprietà meccaniche e la leggerezza rendono questi materiali interessanti per molte applicazioni: nel settore aerospaziale (elevate prestazioni ed alti rapporti rigidità/peso), nel settore automotive, in campo sportivo (veicoli da competizione, barche, biciclette, ecc...) e in campo medico (protesi). I compositi hanno poi altre interessanti caratteristiche: elevata resistenza a corrosione e carichi ciclici, isolamento termico ed elettrico, notevole elasticità e rigidità, stabilità termica e chimica.

Nonostante questo l'utilizzo dei compositi è però ancora poco diffuso, e solo negli ultimi decenni questi materiali stanno ricevendo la dovuta attenzione da parte del settore industriale. Il fattore che ha finora limitato la diffusione su larga scala dei compositi è la necessità di un approccio di progetto notevolmente diverso rispetto a quello, ormai consolidato, utilizzato per i materiali convenzionali. Emergono inoltre problemi di resistenza all'usura e ai carichi concentrati, e difficoltà di smaltimento. Questi fattori si ripercuotono negativamente sul costo dei prodotti, il quale si ripercuote poi sulla convenienza di questi materiali, producendo un circolo vizioso.

1.2 LA MATRICE

Come detto (v. § 1.1), la matrice è costituita da una fase continua e omogenea, che ha lo scopo di dare forma propria al composito. Essa deve inglobare il rinforzo e mantenerlo nella corretta posizione, e deve deformarsi sufficientemente per trasmettere le sollecitazioni tra le fibre e impedire la propagazione di eventuali difetti. Detto questo, è comprensibile perché la matrice debba usualmente essere duttile e tenace, con un allungamento a rottura più elevato di quello del rinforzo. Esistono varie tipologie di materiali che possono essere impiegati come matrice. E' possibile però classificare i compositi, in base al tipo di matrice, in tre grandi gruppi^{[1][5][7]}:

- *Compositi a Matrice Polimerica* (o *PMC: Polymer-Matrix Composite*);
- *Compositi a Matrice Metallica* (o *MMC: Metallic-Matrix Composite*);
- *Compositi a Matrice Ceramica* (o *CMC: Ceramic-Matrix Composite*).

La trattazione relativa alle matrici metalliche e ceramiche esula dagli scopi di questa tesi. Di seguito saranno dunque approfondite soltanto le matrici polimeriche, in particolare le resine epossidiche (impiegate nei provini studiati in questa tesi).

1.2.1 Compositi a Matrice Polimerica

I *compositi a matrice polimerica* sono i più utilizzati, per la loro versatilità e per i loro costi in continua diminuzione. In questi materiali sono impiegati, con funzione di matrice, polimeri di due tipi: *termoplastici* o *termoindurenti*. I termoplastici rammolliscono a temperature elevate e solidificano quando sono riportati a temperatura ambiente. I termoindurenti sono invece resine fluide a temperatura ambiente, e solidificano se portate ad alte temperature.

Le *matrici termoplastiche* hanno una struttura costituita da catene polimeriche unite da legami dipolari o di Van der Waals, che essendo piuttosto deboli possono essere

rotti mediante il semplice incremento della temperatura oltre un valore soglia (transizione vetrosa, 250 – 300°C). In questa condizione si ha un aumento di deformabilità del materiale, il quale assume uno stato fluido e può essere formato. Raffreddandolo, esso recupera la forma solida (amorfa, semicristallina o cristallina). La formazione e distruzione di questi legami è reversibile, e questi materiali possono quindi essere riscaldati, plasmati e raffreddati più volte senza mostrare modificazioni delle loro proprietà (possono quindi essere riutilizzati, “riciclati”).

La loro particolare struttura rende i polimeri termoplastici generalmente più tenaci dei termoindurenti, ma implica anche una minore resistenza a trazione e una minore rigidità (non possono dunque essere utilizzate per impieghi strutturali). Inoltre i termoplastici, rammollendo con il calore, non possono essere usati per temperature di esercizio elevate come per i termoindurenti (non oltre i 50 – 150°C, tranne poche eccezioni come il *politetrafluoroetilene*, in grado di sopportare anche 290°C).

Per di più, anche al di sopra della temperatura di transizione vetrosa i termoplastici rimangono fluidi piuttosto viscosi, e richiedono forti pressioni per essere plasmati. Occorrono dunque macchinari molto potenti, che naturalmente comportano un grosso onere tecnologico, oltre che un elevato costo. I termoplastici più comuni sono: *polietilene (PE)*, *cloruro di polivinile (PVC)*, *polipropilene (PP)*, *polistirene (PS)*.

Le *matrici termoindurenti* sono costituite da resine che al di sotto di una determinata soglia (temperatura di polimerizzazione, 120 – 200°C) sono fluide e caratterizzate da bassa viscosità ed elevata bagnabilità, perciò riescono a impregnare molto facilmente le fibre e permettono di realizzare forme relativamente complesse. L'indurimento avviene per reticolazione: fornendo una certa quantità di calore (e grazie all'azione di un catalizzatore) si permettono le reazioni tra i gruppi insaturi, che danno origine a catene legate tra loro da legami covalenti (molto forti).

Questa particolare struttura genera una “rete”, creando un'unica gigantesca molecola, e fa sì che le resine solidificate risultino particolarmente rigide e mediamente più dense dei termoplastici (però con una fragilità molto maggiore). In queste resine

l'indurimento è però irreversibile: con l'aumento della temperatura non si ha alcun effetto, a meno che non si raggiungano valori eccessivi che finirebbero per degradare il polimero (questi materiali non possono dunque essere rimodellati).

I vantaggi nell'uso dei termoindurenti sono però superiori agli svantaggi: notevole resistenza al *creep*¹, stabilità dimensionale e termica, isolamento termico ed elettrico, e rapporti rigidità/peso molto elevati. Le resine termoindurenti più comuni sono: *resine epossidiche*, *resine poliesteri*, *resine vinilesteri*, *resine fenoliche*. Le più utilizzate sono le resine epossidiche, in virtù delle loro ottime proprietà. Sono spesso impiegate congiuntamente alle fibre di carbonio, ed essendo state utilizzate anche nei provini studiati in questa tesi, saranno oggetto di approfondimento di seguito.

1.2.2 Approfondimento: Matrici in Resina Epossidica

Le *resine epossidiche* sono materiali plastici termoindurenti. Sono ottenute dall'unione di catene polimeriche contenenti gruppi chimici epossidici (fig. 1.1). Essendo resine termoindurenti, a temperatura ambiente si presentano in forma fluida: non essendo ancora iniziato il processo di reticolazione non si sono ancora formate le catene, ma sono presenti soltanto monomeri. In questo stato il fluido presenta un peso molecolare piuttosto basso, che si traduce in una bassa viscosità ed una elevata bagnabilità, permettendo quindi alla resina di impregnare facilmente il rinforzo.

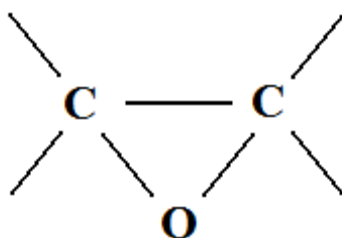


Figura 1.1: *Struttura atomica del gruppo epossidico*

¹ Il *creep* è il fenomeno del cosiddetto “*scorrimento viscoso a caldo*”, cioè un progressivo aumento della deformazione permanente che avviene in un materiale soggetto contemporaneamente a carichi esterni e temperature elevate (superiori a 0.3 – 0.4 volte la temperatura di fusione del materiale espressa in Kelvin).

L'indurimento è ottenuto mediante una reazione di *policondensazione*², con l'aiuto di catalizzatori (solitamente diammine). Il prodotto intermedio di questa reazione è costituito da lunghe molecole lineari che rendono la resina assai più viscosa. I gruppi epossidici presenti sui polimeri sono molto reattivi, e possono legarsi ad altri gruppi mediante l'apertura del ponte di ossigeno. Questa possibilità consente alle molecole di reagire con altri polimeri vicini, con formazione di un prodotto finale reticolare. Più gruppi epossidici sono presenti in ciascuna catena, più elevata sarà la densità dei nodi nel reticolo finale, e maggiori saranno quindi la durezza e la rigidità. Il risultato è perciò un materiale allo stato solido con elevato peso molecolare.

Le resine epossidiche indurite presentano ottime proprietà di resistenza meccanica (superiori rispetto alle resine poliestere), notevole stabilità termica, ottima adesione al rinforzo e buona resistenza chimica. Proprio grazie alle proprietà adesive e alla capacità di resistere ad aggressioni chimiche (ambientali o da parte di solventi), queste resine sono efficacemente utilizzate anche come adesivi strutturali. Mostrano anche ritiri molto ridotti in fase di indurimento (inferiori al 2%), poiché non formano alcun sottoprodotto di reazione durante la reticolazione.

Le resine epossidiche possono sopportare temperature di esercizio fino a 125°C se si utilizzano le resine più tenaci, e fino a 150 – 170°C se invece si impiegano quelle più resistenti (anche fino a 200°C con opportuni additivi). Le temperature di degrado, invece, si aggirano tipicamente attorno ai 450°C. Sono comunemente utilizzate nella produzione di compositi laminati, in particolar modo con rinforzi sotto forma di fibre (soprattutto in fibra di carbonio). Il motivo del grande successo delle matrici in resina epossidica risiede nell'eccezionale rapporto prestazioni/peso: se utilizzate con rinforzi di grafite, ad esempio, mostrano proprietà meccaniche superiori a quelle di molti acciai con un peso inferiore a quello dell'alluminio (circa il 20% in meno).

² La *policondensazione* è un processo chimico attraverso il quale da due o più monomeri si ottiene un polimero. Se ciascun monomero ha solo due gruppi funzionali si ottengono molecole lineari, a carattere termoplastico. Se invece ogni monomero ha più di due gruppi funzionali si hanno legami tra molecole vicine, e si forma un reticolo termoindurente. Il processo è accompagnato da eliminazione di acqua.

1.3 IL RINFORZO

Come detto (v. § 1.1) il rinforzo è costituito da una fase dispersa, distribuita nella matrice in modo uniforme. E' solitamente costituito da materiali rigidi e fragili, che non sono soggetti a deformazioni permanenti bensì arrivano a rottura in campo elastico. Avendo prestazioni molto superiori a quelle della matrice, è il rinforzo a determinare le principali caratteristiche meccaniche del composito. Il materiale che si ottiene avrà prestazioni globali circa intermedie tra quelle della matrice e quelle del rinforzo. Non è però possibile migliorare le proprietà del composito fabbricandolo con il solo materiale di rinforzo, nella speranza che esso non sia influenzato dalle più scadenti proprietà della matrice. Il rinforzo da solo sarebbe infatti un materiale troppo fragile, che in caso di rottura cederebbe di schianto (in modo pericoloso). E' quindi essenziale associare al rinforzo un supporto tenace e deformabile (la matrice), che impedisca la rottura fragile bloccando l'avanzamento di eventuali fratture.

Dal punto di vista meccanico, l'insieme di matrice e rinforzo costituisce un sistema di rigidità poste in parallelo tra loro: le deformazioni prodotte sui due componenti sono le stesse, mentre i carichi si ripartiscono in modo direttamente proporzionale alle rigidità dei componenti stessi. Di conseguenza sul rinforzo, molto più rigido della matrice, si scarica la maggior parte della sollecitazione esterna. E' possibile classificare i compositi in base alla forma del rinforzo in^{[1][5]}:

- *Materiali Compositi a Fibre;*
- *Materiali Compositi a Scaglie;*
- *Materiali Compositi a Particelle;*
- *Materiali Compositi a Riempitivo (o a Struttura Porosa).*

L'esposizione dettagliata relativa ai compositi a scaglie, a particelle e a riempitivo esula dallo scopo di questa trattazione, e non verrà dunque affrontata. Di seguito verranno pertanto approfonditi solamente i compositi a fibre, ed in modo particolare le fibre di carbonio (impiegate nella produzione dei provini studiati in questa tesi).

1.3.1 Materiali Compositi a Fibre

I *materiali compositi a fibre* sono senza dubbio i più diffusi ed utilizzati nelle costruzioni meccaniche. Il loro successo è strettamente legato agli elevati rapporti resistenza/peso (resistenza specifica) e rigidità/peso (modulo specifico). Si osserva infatti che la resistenza di un materiale aumenta enormemente se esso viene prodotto in fibre sottili, e che in generale la resistenza della fibra aumenta al diminuire della sezione trasversale. Questo è il cosiddetto *effetto dimensionale*, dovuto ad una riduzione del contenuto di difetti al diminuire delle dimensioni del campione.

Il termine corretto per indicare la singola fibra è in realtà *filamento*. In accordo con la definizione ASTM³, i filamenti sono “*materiali caratterizzati da una dimensione longitudinale preponderante rispetto alla dimensione trasversale (con un rapporto minimo fra esse di 10:1, e con una dimensione trasversale minore di 1 mm)*”^[1]. Se si riuniscono più filamenti in un fascio parallelo non ritorto si ottiene un cosiddetto *tow*. Se li si raggruppa invece in un fascio ritorto, avvolto su se stesso, si ottiene uno *yarn*. Infine avvolgendo più *yarn* tra loro si ottiene un *roving* (o *trefolo*). Per una migliore comprensione queste tre configurazioni sono mostrate in fig. 1.2.

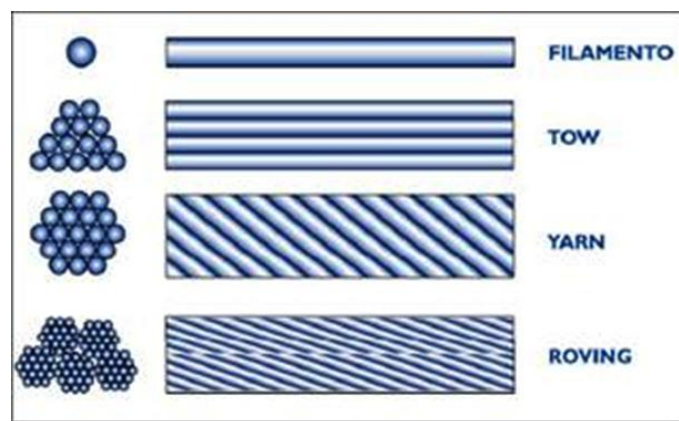


Figura 1.2: Possibili configurazioni di avvolgimento dei filamenti ^[4]

Queste configurazioni vengono poi usualmente definite con il termine di “fibre”. Tutte le tipologie di fasci, siano essi *tow*, *yarn* o *roving*, sono ottenuti per trafilatura:

³ ASTM: American Society for Testing Materials

il materiale viene introdotto in un forno dove rammollisce e ed effluisce per gravità attraverso una filiera, dopodiché una testa rotante esegue la filatura vera e propria. Prima dell'avvolgimento le fibre vengono ricoperte da una guaina protettiva (fase di *sizing*) il cui compito è impedire il danneggiamento delle singole fibre nel reciproco contatto, proteggere dall'umidità e favorire una corretta adesione alla matrice.

I compositi a fibre sono decisamente anisotropi⁴ (le fibre hanno dimensioni molto diverse nelle tre direzioni). Solitamente l'anisotropia di un materiale è considerata un fattore negativo poiché ne complica il progetto, ma nel caso dei compositi essa può rivelarsi un vantaggio, giacché permette di sfruttare appieno le caratteristiche del materiale: disponendo le fibre lungo la direzione della sollecitazione, infatti, si ottiene un considerevole incremento di resistenza della struttura. Si giunge così al *tailoring*, ovvero la progettazione congiunta di materiale e struttura, concepiti in modo specifico in base alle sollecitazioni da sopportare.

Le fibre possono essere *lunghe* (continue) o *corte* (discontinue), e possono essere disposte in modo *allineato* oppure *casuale*. La disposizione casuale è attuabile solo con fibre corte, e garantisce un certo grado di isotropia (proprietà meccaniche uniformi in tutte le direzioni), a prezzo però di una resistenza massima inferiore. In generale, infatti, la resistenza in una determinata direzione è proporzionale al numero di fibre per unità di volume orientate in quella direzione. Le fibre più comunemente impiegate sono: *fibre di carbonio*, *fibre di vetro*, *fibre aramidiche*, *fibre di boro*, *fibre in carburo di silicio*, *fibre in ossido di alluminio*. Le fibre di carbonio, oggetto di studio di questa tesi, saranno trattate in modo più approfondito di seguito nel testo.

1.3.2 Approfondimento: Fibre di Carbonio

Le *fibre di carbonio* sono sicuramente il rinforzo più noto, e dopo anni di “popolarità” nel campo delle attrezzature sportive, stanno recentemente avendo

⁴ Un materiale è *anisotropo* se le sue proprietà meccaniche e/o fisiche cambiano a seconda della direzione considerata.

grande successo anche in campo industriale, grazie alle loro ottime proprietà. I filamenti di carbonio hanno diametri molto ridotti (da 5 a 15 μm circa, fig. 1.3), risultando così di difficile manipolazione, e vengono quindi raccolte in fasci che comprendono da 1000 a 160000 filamenti.

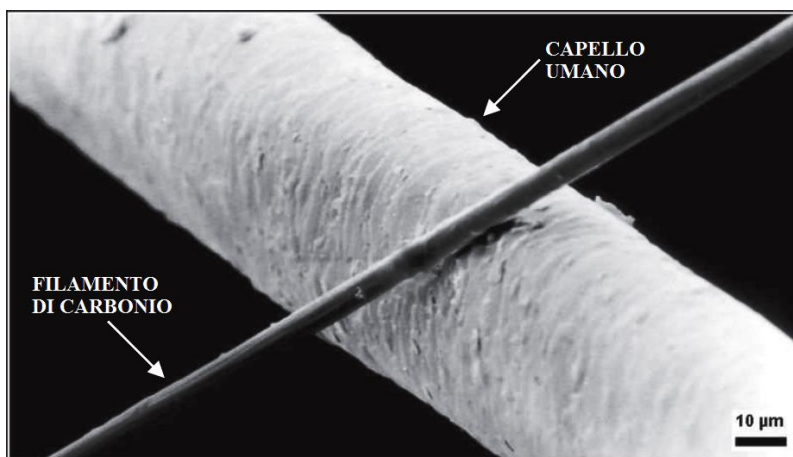


Figura 1.3: *Filamento di carbonio a confronto con un capello umano* ^[7]

I vari processi di fabbricazione delle fibre di carbonio, seppure diversi tra loro, sono tutti caratterizzati fondamentalmente dalle seguenti fasi^[1]:

- 1- Operazione di *filatura*, per ottenere le fibre “grezze”, ancora contenenti inclusioni o impurità, e con reticoli molecolari disordinati;
- 2- Trattamento di stabilizzazione mediante *pirolisi*⁵ a 220 – 300°C, per evitare che le fibre fondano alle elevate temperature delle fasi successive;
- 3- Processo di *carbonizzazione*⁶ a 1500°C, per eliminare dai reticoli molecolari gli elementi diversi dal carbonio;
- 4- Processo di *grafitizzazione*⁷ a quasi 3000°C, per far ottenere ai reticoli molecolari la struttura esagonale tipica della grafite (processo facoltativo, v. fig. 1.5).

⁵ La *pirolisi* è una decomposizione termochimica dei materiali organici, ottenuta applicando calore in assenza di agenti ossidanti o con una ridottissima quantità di ossigeno. Lo scopo del processo è rompere parte dei legami carbonio-carbonio, così da facilitare l’eliminazione degli elementi estranei.

⁶ La *carbonizzazione* è un processo che porta ad una graduale perdita di ossigeno, azoto ed idrogeno. La conseguenza è un aumento del tenore di carbonio nel materiale. Essa avviene anche in natura, quando i tessuti vegetali subiscono alterazioni che portano alla formazione di combustibili solidi naturali.

Lo scopo è ottenere fibre costituite da grafite il più possibile pura. La grafite è una forma allotropica⁸ del carbonio, ed ha una struttura a piani paralleli a celle esagonali (fig. 1.4): fra gli atomi dello stesso piano si hanno legami covalenti molto forti, mentre i diversi piani sono uniti tra loro da legami di Van der Waals, alquanto deboli.

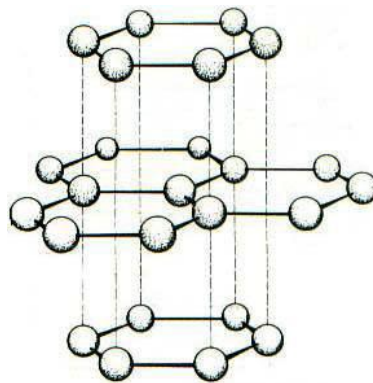


Figura 1.4: *Struttura reticolare della grafite* ^[1]

La struttura grafiteica è anisotropa rispetto alle direzioni longitudinale e trasversale: essa mostra grande resistenza meccanica nel piano dei cristalli, ma risulta alquanto debole se sottoposta a trazione in direzione ortogonale. Le fibre di carbonio sono costituite da polimeri di grafite, ed esibiscono una tenacità senza eguali se sollecitate nella direzione del polimero stesso. Compito del processo di produzione è disporre queste strutture nella direzione voluta (lungo le fibre), ma poiché questo è difficile da conseguire, le proprietà meccaniche reali saranno inferiori a quelle teoriche.

Le fibre di carbonio sono caratterizzate da una struttura che può variare da quella del carbonio praticamente amorfo a quella della grafite cristallina. In dipendenza da ciò variano anche le caratteristiche meccaniche, e si possono distinguere due tipologie di fibre: le *fibre ad alta resistenza (HS)*, con modulo elastico medio (230 – 250 GPa) ed elevatissima resistenza a trazione (fino a 5000 MPa); e le *fibre ad alto modulo (HM)*,

⁷ La *grafitizzazione* non è altro che una carbonizzazione molto spinta, in modo da ottenere l'eliminazione completa degli elementi diversi dal carbonio, formando quindi di grafite (che è carbonio allo stato puro).

⁸ L'*allotropia* è il fenomeno per cui un elemento chimico può esistere in natura in due o più forme distinte, che differiscono tra loro per struttura cristallina e proprietà chimiche e fisiche.

con altissimo modulo elastico (fino a 700 GPa) ma resistenza a trazione assai limitata (non oltre 1500 MPa). La differenza è legata al processo di fabbricazione (fig. 1.5): per ottenere fibre *HS* è infatti necessario fermarsi a 1500°C (carbonizzazione), mentre se si vogliono fibre *HM* si deve arrivare a 3000°C (grafitizzazione).

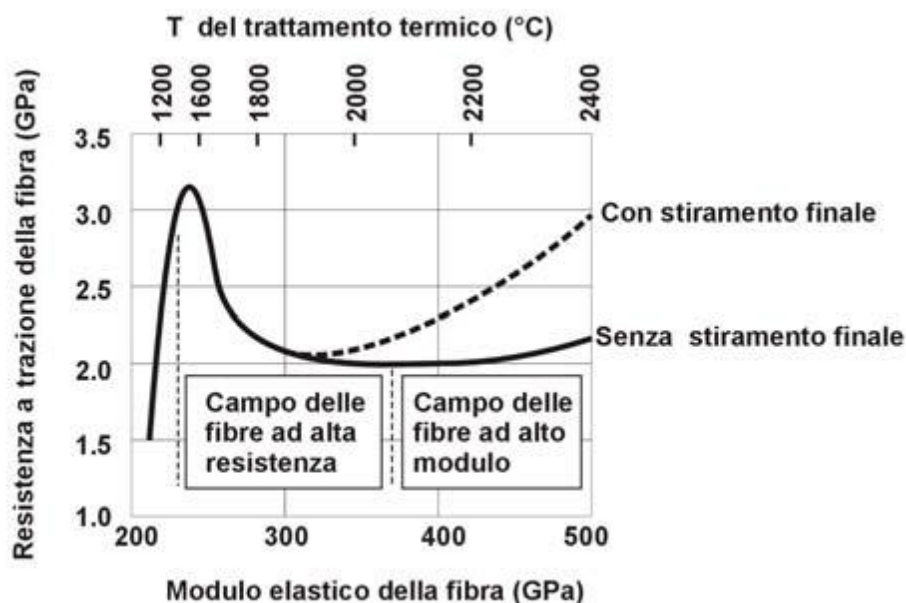


Figura 1.5: Andamento delle caratteristiche meccaniche per fibre *HS* e *HM* ^[6]

Il punto di partenza del processo produttivo precedentemente illustrato è costituito dai cosiddetti *precursori organici*, cioè sostanze organiche ad elevato contenuto di carbonio. I precursori più comuni sono: *poliacrilonitrile*, *raion* e *bitume* (o *pece*).

Il *poliacrilonitrile* (*PAN*) è un polimero contenente gruppi nitrile ($-C\equiv N$). È molto impiegato nel settore tessile (i tessuti *acrilici* sono in massima parte costituiti da copolimeri di *PAN*) e nel settore edilizio (le fibre polimeriche usate per prevenire le fessure da ritiro in malte e calcestruzzi sono a base di *PAN*). È ottenuto dalla polimerizzazione dell'acrilonitrile in mezzo acquoso a temperature di 40 – 55°C.

Il *raion* è una nota fibra tessile artificiale di origine naturale, derivata dalla cellulosa e spesso usata come sostituto della seta. Storicamente questo materiale è stato il primo

impiegato per la produzione di fibre di carbonio, ma a causa dei costi più alti rispetto agli altri precursori le fibre ottenute dal raion stanno scomparendo dal mercato.

Il *bitume* e la *pece* sono ottenuti come residui della distillazione del catrame, il quale può essere a sua volta considerato un residuo della lavorazione di carbon fossile o petrolio. Sono sostanze scure o nere, che possono trovarsi allo stato solido oppure di liquido molto viscoso. In linea generale, le fibre ottenute da pece o bitume sono solitamente fibre *HM*, mentre quelle ottenute da *PAN* sono generalmente fibre *HS*.

1.4 INTERAZIONI FIBRA-MATRICE

La trasmissione delle sollecitazioni tra fibra e matrice avviene per effetto delle tensioni tangenziali all'interfaccia, e deve essere assicurata da una perfetta adesione tra i due componenti. Dal momento che una tensione è definita come una forza per unità di superficie ($\tau = F/A$), è evidente che la forza massima a cui può resistere una fibra è proporzionale all'estensione della superficie di contatto con la matrice: a parità di tensione massima sopportabile, dipendente dal materiale, una superficie maggiore permette infatti alla fibra di resistere ad una forza più elevata. Risulta quindi giustificato l'utilizzo di elevati rapporti lunghezza/diametro delle fibre, che spesso raggiungono valori anche superiori a 100.

Ciò che accade al composito sotto carico, fino all'eventuale rottura, non è di facile trattazione. E' tuttavia possibile fornirne un'idea molto semplificata, osservando il comportamento di una frattura che si propaga per effetto delle tensioni interne al materiale. La cricca interessa inizialmente la matrice, si propaga attraverso di essa e raggiunge un certo numero di fibre, causandone il danneggiamento ed eventualmente la rottura. Un ipotetico comportamento tenace delle fibre consentirebbe di bloccare, o quantomeno ritardare, la propagazione della frattura. Si ricorda però che le fibre hanno il compito di sopportare i carichi esterni, e non possono essere realizzate in materiale tenace. E' necessario perciò che sia la matrice ad avere elevata tenacità,

così da ostacolare subito la propagazione della cricca, prima che quest'ultima metta in pericolo l'integrità delle fibre (o prima che la frattura si propaghi dalle fibre già rotte alle fibre ancora integre). La cricca in fase di propagazione, una volta raggiunta una fibra, può però a volte non propagarsi all'interno della fibra stessa, bensì lungo l'interfaccia con la matrice (causando problemi di adesione fra i due componenti). Le modalità di cedimento possono pertanto essere riassunte in tre tipologie^[3] (fig. 1.6):

- *Rottura vera e propria della fibra di rinforzo;*
- *Estromissione con sfilamento per distacco della fibra dalla matrice;*
- *Separazione fibra-matrice per cedimento di quest'ultima nella zona di contatto.*

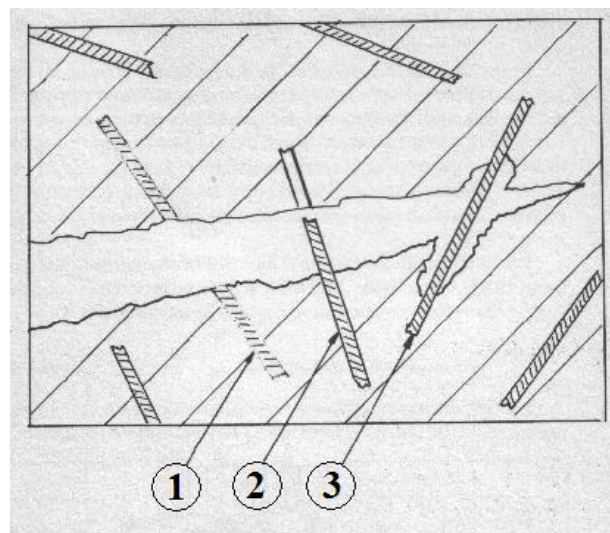


Figura 1.6: *Modalità di cedimento: 1) rottura della fibra , 2) sfilamento della fibra , 3) cedimento della matrice* ^[3]

Nel primo caso la sollecitazione ha superato il carico sostenibile dalla fibra, che si è rotta in modo fragile: il fenomeno può essere evitato aumentando il numero di fibre o cambiandone dimensioni o tipologia. Nel secondo caso l'interfaccia fibra-matrice non è più in grado di opporsi al distacco, e si presentano due casi possibili: se il fenomeno è limitato al solo distacco senza sfilamento, la fibra rimane parzialmente inserita nella matrice offrendo una residua resistenza meccanica; se invece la sollecitazione è tale da provocarne lo sfilamento completo, la parte di fibra "estratta" dalla sua sede non

ha più alcuna funzione resistente. Infine, nel terzo caso la fibra è ancora in grado di esercitare una minima reazione, essendo ancora parzialmente in sede.

Da quanto detto emerge nuovamente l'importanza di progettare preventivamente la geometria interna del composito, controllando l'orientamento delle fibre in modo che siano orientate secondo le massime sollecitazioni. Questo approccio, già citato in precedenza e definito *tailoring* (letteralmente "sartoria", v. § 1.3.1), consiste nella progettazione "su misura" del materiale specificamente per una data applicazione.

1.5 I MATERIALI COMPOSITI A PIU' STRATI

Sono oggi diffusissimi materiali compositi costituiti dalla sovrapposizione di più strati differenti, ciascuno dei quali, se considerato singolarmente, è a sua volta un composito (si ha quindi, in un certo senso, una struttura di tipo "ricorsivo"). In funzione della tipologia degli strati utilizzati, i materiali compositi a più strati possono essere suddivisi in due categorie:

- *Compositi Laminati;*
- *Strutture Sandwich.*

Le strutture sandwich non hanno alcuna connessione con l'argomento presentato in questo elaborato, pertanto la loro trattazione non verrà affrontata. Verranno invece approfonditi i compositi laminati, poiché costituiscono l'oggetto di questa tesi.

1.5.1 Compositi Laminati

Un materiale composito è definito *laminato* se è formato dall'unione di più strati elementari, denominati *lamine* (o *plies*). Una lamina è fondamentalmente costituita da un singolo piano di fibre parallele tra loro, inglobate nel sottile strato di matrice che compete loro (il cui spessore può variare da 0.1 a 5 mm, fig. 1.7).

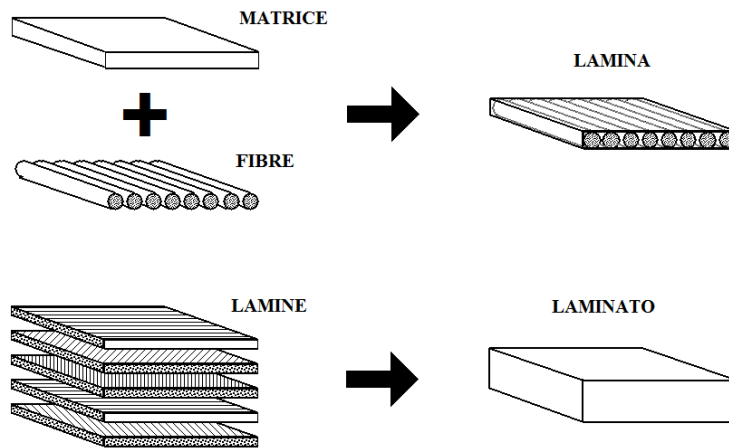


Figura 1.7: Struttura di una lamina e di un laminato ^[5]

Per loro stessa natura, le lamine hanno un comportamento anisotropo, in particolare ortotropo⁹. L'utilizzo di singole lamine con rinforzo unidirezionale, naturalmente, risulterebbe insoddisfacente nella maggior parte delle applicazioni ingegneristiche, a causa della bassissima resistenza e rigidità in direzione trasversale alle fibre. Unendo più lamine fino a formare un materiale multistrato, invece, si possono ottenere compositi con eccellenti proprietà nelle direzioni volute. Un laminato è quindi formato dall'unione di strati pressoché identici fra loro: l'unico parametro che può cambiare è la loro orientazione reciproca (fig. 1.8).

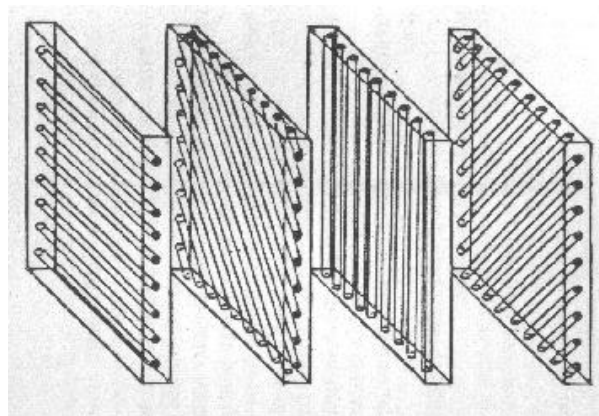


Figura 1.8: Unione di strati con diversa orientazione reciproca ^[3]

⁹ Un materiale è *ortotropo* se risulta anisotropo esclusivamente rispetto alle tre direzioni principali. In altri termini, un materiale ortotropo presenta proprietà uniche ed indipendenti solamente in tre direzioni ortogonali tra loro.

Alternando strati con diverse orientazioni, ad esempio, è possibile produrre un materiale che abbia proprietà meccaniche ottime sia in direzione longitudinale che in direzione trasversale (si parlerà perciò di laminati unidirezionali, bidirezionali oppure multidirezionali). Ovviamente è possibile dare alle lamine orientazioni qualsiasi, ma quelle comunemente utilizzate sono quattro: 0° , 90° , $+45^\circ$, -45° (gli angoli sono solitamente misurati rispetto alla direzione di applicazione del carico).

La previsione del comportamento in esercizio di un laminato non è semplice, e necessita di modelli la cui analisi esula dallo scopo di questa trattazione. Per fornire un'idea qualitativa dell'argomento è sufficiente dire che sono possibili due diversi approcci al problema: da una parte il punto di vista microscopico, che analizza i rapporti fibra-matrice tenendo conto della natura fortemente disomogenea del materiale (la cosiddetta "micromeccanica della lamina"); dall'altra parte il punto di vista macroscopico, che considera i valori medi dei parametri ed ha come obiettivo l'analisi del comportamento globale (la cosiddetta "macromeccanica della lamina").

1.6 I SEMILAVORATI A BASE DI FIBRE CONTINUE

Si è già parlato precedentemente (v. § 1.3.1) di come i singoli filamenti vengano sempre riuniti, per ottenere le fibre vere e proprie, in fasci denominati *tow*, *yarn* e *roving* (o *trefoli*). Nella maggior parte dei casi, però, non si utilizzano direttamente questi fasci "così come sono" per la produzione del composito finale, ma si passa attraverso la realizzazione di prodotti intermedi, usualmente definiti *semilavorati*. Questi possono avere varie forme: *mats*, *nastri TFT*, *tessuti* o *preimpregnati*. Di seguito saranno approfonditi in particolare tessuti e preimpregnati, poiché costituiscono la materia prima per la produzione dei provini studiati in questa tesi.

1.6.1 Tessuti

I *tessuti* non sono altro che sistemi di fibre intrecciate in vario modo secondo una trama ed un ordito, in analogia con i materiali tessili. Dal punto di vista delle

proprietà meccaniche, un tessuto è sostanzialmente analogo ad un laminato che abbia gli strati orientati come le fibre del tessuto stesso. La fondamentale differenza, tuttavia, è che nel tessuto le fibre non si trovano su piani paralleli distinti, ma essenzialmente sullo stesso piano. Con i tessuti non si ha perciò alcun problema di adesione o incollaggio fra gli strati, poiché lo strato è uno soltanto (di spessore di poco superiore al diametro delle fibre stesse). Questi prodotti possono essere utilizzati a secco oppure preimpregnati.

Le fibre utilizzate sono solitamente di tipo ritorto (*yarns*). La tessitura vera e propria si esegue con l'utilizzo di macchine chiamate telai: prima si dispongono i fili di ordito in direzione longitudinale, dopodiché si fanno passare i fili di trama alternativamente sopra e sotto i fili di ordito, seguendo una delle tante configurazioni possibili. I tipi di tessuto possono quindi essere numerosi e tutti differenti tra loro, a seconda che si voglia garantire un migliore e più resistente intreccio delle fibre oppure una migliore flessibilità ed adattabilità a stampi di forme complesse (proprietà definita *drappeggio*). Le tipologie più note di tessitura sono *piana* e *satina*.

La *tessitura piana* (*plain weave, PW*) è la più utilizzata. E' caratterizzata semplicemente dal passaggio dei fili di trama una volta sopra ed una volta sotto ai fili di ordito (fig. 1.9 (a)). Ha una resistenza uniforme nelle due direzioni, e permette di ridurre al minimo gli scorrimenti tra le fibre. Per la sua particolare rigidità però, dato che i fili risultano fortemente intrecciati e non mobili in modo indipendente, possiede una capacità piuttosto ridotta di adattarsi a superfici complesse.

Il tessuto *satina* (chiamato anche *raso*) è una variante della tessitura piana. La differenza risiede nel percorso dei fili di ordito rispetto a quelli di trama: nella tessitura piana ciascun filo di ordito interseca ogni filo di trama, mentre nel satina le intersezioni avvengono ogni 2, 3, ... , n fili (si parla di *satina 2, 3, ... , n*, fig. 1.9 (b) e (c)). Questa struttura permette maggiore flessibilità e adattabilità a forme complesse, poiché le fibre sono meno legate tra loro ed hanno maggiore libertà di movimento.

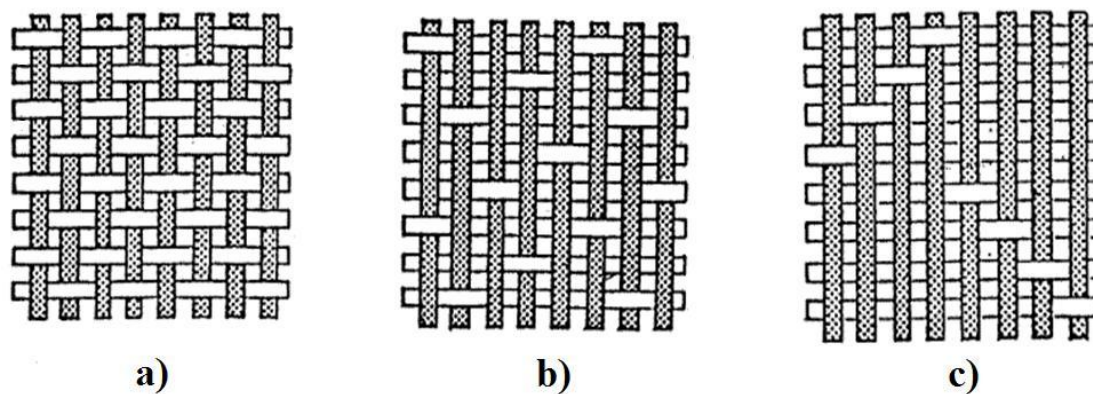


Figura 1.9: Tipologie di tessuti: a) tessitura piana , b) satin a 5 licci , c) satin a 8 licci ^{[1][2][4]}

1.6.2 Preimpregnati

I *preimpregnati* (*prepregs*) sono semilavorati già impregnati di resina portata allo *stadio B*, cioè una fase di polimerizzazione parziale. Così si ottiene un materiale abbastanza deformabile da adattarsi agli stampi, e che al contempo necessita solo di un ultimo trattamento termico per ottenere il composito finale.

I prepregs si presentano in varie forme: ogni semilavorato (lamine unidirezionali, tessuti, ecc...) è infatti disponibile nella forma *a secco* oppure *preimpregnata*. La differenza tra le due forme implica la necessità di due metodi di lavorazione diversi. Se si usano fibre a secco è necessario infatti impregnarle al momento della realizzazione del componente, e questo causa spesso l'utilizzo di una quantità eccessiva di resina (che andrà rimossa in seguito). I prepregs permettono invece di ovviare a questi inconvenienti, poiché sono già impregnati con un perfetto quantitativo di resina, ed è quindi sufficiente disporre le lamine all'interno degli stampi. I preimpregnati permettono inoltre altri vantaggi: una quantità esatta di resina consente di ottenere compositi più leggeri e con il corretto rapporto volumetrico fibra/matrice, e senza maneggiare grandi quantità di resina l'ambiente di lavoro è più pulito e non saturo dei pericolosi gas sprigionati dalle resine liquide.

Uno svantaggio dei preimpregnati, invece, è che mantengono le loro caratteristiche per un tempo limitato, e per questo devono essere conservati a bassa temperatura (solitamente in freezer). Per permettere alla resina di completare la polimerizzazione,

i prepregs necessitano di una somministrazione di calore e pressione, e risultano perciò particolarmente adatti ai processi di cura in autoclave. I più comuni procedimenti di fabbricazione dei preimpregnati sono *solution dip* e *film calandering*.

Il processo *solution dip* consiste nel far passare le fibre in un bagno di resina liquida e solventi. Il composito transita poi attraverso rulli che eliminano gli eccessi di resina e ne rendono costante lo spessore. Il prodotto passa infine in forno, al fine di rimuovere il solvente e portare la resina allo stadio *B*. L'impianto è schematizzato in fig. 1.10.

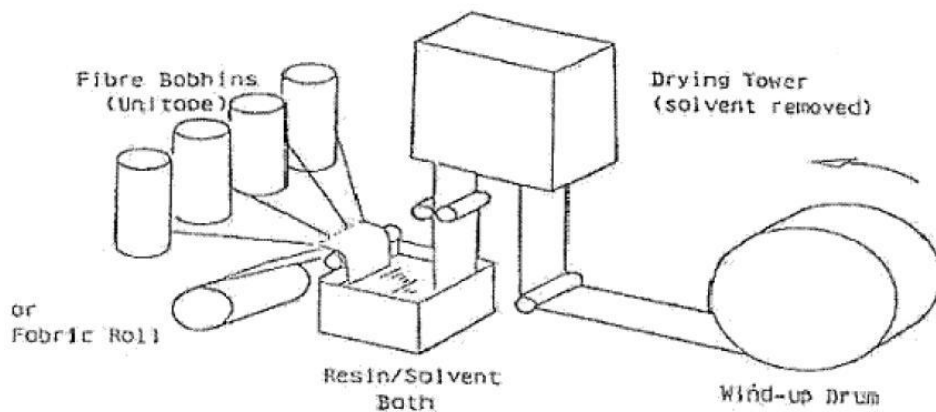


Figura 1.10: Schema del processo di *solution dip* ^[10]

Il processo *film calandering* consiste invece nel racchiudere e comprimere le fibre tra due sottili pellicole di resina, utilizzando rulli riscaldati (fig. 1.11).

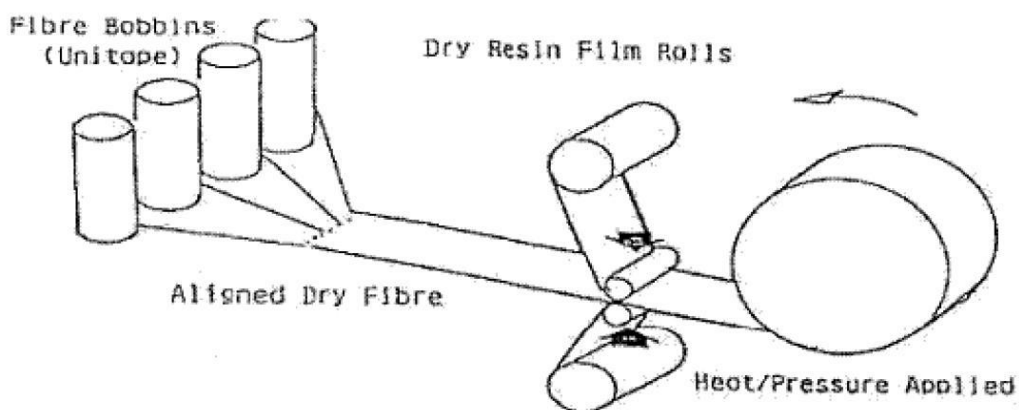


Figura 1.11: Schema del processo di *film calandering* ^[10]

CAPITOLO 2

IL LASER

2.1 DEFINIZIONE E GENERALITA'

Il termine *LASER* è l'acronimo inglese di “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”, che significa “*amplificazione della luce mediante emissione stimolata di radiazione*”^[11]. Il laser è un dispositivo in grado di emettere un fascio di radiazioni elettromagnetiche ad alta potenza dotate di tre proprietà fondamentali^[12]:

- Monocromaticità: tutte le onde hanno la stessa lunghezza d'onda;
- Coerenza: tutte le onde sono in fase tra loro;
- Unidirezionalità: tutte le onde hanno la stessa direzione e non divergono.

Da quest'ultima proprietà deriva poi un'altra caratteristica essenziale: la possibilità di *collimare* il fascio, ossia concentrarlo in un'area estremamente ridotta, definita *spot focale*. Queste peculiarità distinguono il laser da ogni altro tipo di radiazione, e lo rendono assai interessante per tante applicazioni nella scienza e nella tecnica.

La coerenza e la ridotta divergenza rendono i laser ottimi strumenti di misura: sia per misure di precisione (interferometria e misure microscopiche), sia per misure di grandi distanze (telemetria civile/ambientale e geodimetria). La capacità di collimazione permette invece di raggiungere elevate potenze per unità di superficie, consentendo al laser di asportare materiale. La radiazione, se molto concentrata, può infatti indurre nel pezzo un aumento di temperatura tale da provocare la combustione, la fusione o addirittura la vaporizzazione del materiale. Da questa possibilità derivano tutte le applicazioni industriali dei laser: taglio, saldatura, ablazione, foratura, ed

anche trattamenti termici. Come è noto le operazioni citate possono essere eseguite anche con altre tecnologie, ma l'esecuzione con laser porta una serie di vantaggi:

- L'elevata densità di potenza consente alte velocità di lavoro (dunque maggiore produttività), e ottima qualità delle superfici (dunque spesso non serve finitura);
- E' una tecnologia che si presta ad essere pienamente automatizzata, con risparmio di tempo e manodopera e miglioramento della qualità;
- Non essendovi contatto con il pezzo non c'è usura utensile, né sollecitazioni meccaniche sul materiale (dunque niente danni e nessuna necessità di bloccaggio).

Sono altresì presenti, anche se in misura minore, alcuni prevedibili svantaggi:

- Alcuni metalli (come ad esempio oro, rame, alluminio, argento e loro leghe) sono lavorabili con molta difficoltà a causa della loro elevata riflettività;
- Le alte temperature comportano una notevole cessione di energia al pezzo, con formazione di una zona termicamente alterata che può implicare danni termici al materiale, anche se l'elevata densità di potenza permette di contenerne l'estensione;
- E' una tecnologia molto impegnativa, sia in termini di ingombro e complessità, sia soprattutto in termini di costo degli impianti.

Altre applicazioni si trovano nelle telecomunicazioni, ad esempio negli amplificatori a fibra attiva¹⁰. In questa sede è importante la monocromaticità del fascio. Un altro campo in cui i laser sono una tecnologia consolidata è la medicina, dai trattamenti antinfiammatori alla chirurgia laser (asportazione di tessuti, chirurgia oculare, ecc...). In questo caso l'importanza ricade su potenza e precisione della radiazione, senza sfruttare coerenza e monocromaticità. Infine altre applicazioni si hanno in chimica, biologia, fisica, e in tutte le realtà di ricerca sulle interazioni laser-materia.

¹⁰ Gli *amplificatori a fibra attiva* sono fibre ottiche drogate nelle quali si può ottenere l'amplificazione di un segnale mediante emissione stimolata (lo stesso fenomeno su cui si basa l'emissione laser, v. § 2.2.1).

2.2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Come è noto dalla fisica, le radiazioni elettromagnetiche (compresa la luce visibile) hanno una duplice natura: *ondulatoria* e *corpuscolare*. Il manifestarsi di una o dell'altra dipende dal modo in cui si interagisce con la radiazione.

Dal punto di vista ondulatorio, la radiazione elettromagnetica è un'onda costituita dall'unione di un campo elettrico e un campo magnetico, i quali si propagano insieme con legge sinusoidale. Alla radiazione sono associati alcuni parametri: una lunghezza d'onda λ (distanza tra due picchi consecutivi), una ampiezza a (altezza dei picchi) e una frequenza f (numero di picchi che transitano nell'unità di tempo). Lunghezza d'onda e frequenza sono inversamente proporzionali, e sono legate dalla relazione:

$$v = f \cdot \lambda$$

Il termine v indica la velocità di propagazione, che dipende dal mezzo in cui l'onda si propaga. Nel vuoto assume valore massimo, la celebre costante c (velocità della luce nel vuoto) pari a $3 \cdot 10^8$ m/s. L'onda formata dai due campi è schematizzata in fig. 2.1.

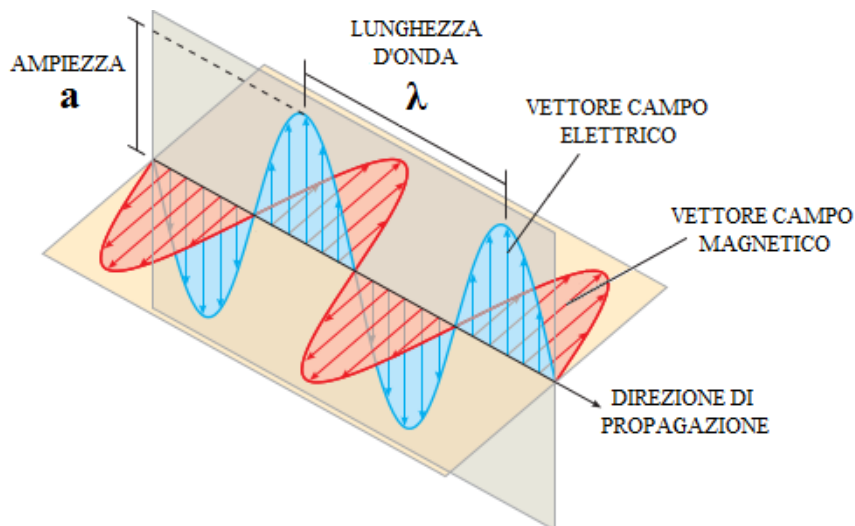


Figura 2.1: Rappresentazione di un'onda elettromagnetica ^[18]

A seconda della lunghezza d'onda e della frequenza le onde elettromagnetiche assumono nomi e proprietà estremamente differenti (fig. 2.2). La cosiddetta "luce

visibile” (l’unica che il nostro occhio può percepire) è solo una piccola parte di radiazione compresa tra 400 e 700 nm circa. Le radiazioni laser coprono un intervallo più ampio, spaziando dall’ultravioletto ($\lambda < 400$ nm) all’infrarosso ($\lambda > 700$ nm), e comprendendo naturalmente anche tutto il campo del visibile.

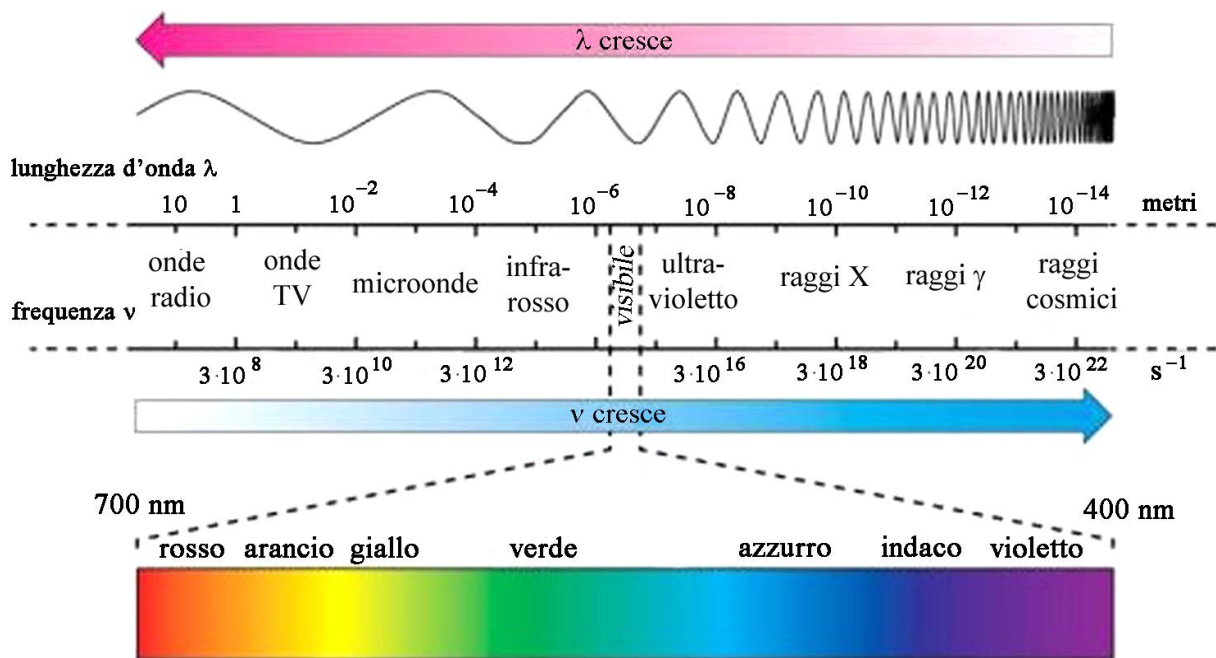


Figura 2.2: Lo spettro elettromagnetico ^[19]

Dal punto di vista corpuscolare la radiazione può essere vista come un flusso di quanti di energia chiamati *fotoni*. L’intensità del flusso corrisponde all’ampiezza, mentre l’energia dei singoli fotoni è legata alla frequenza dalla *legge di Planck*:

$$E_f = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Il termine h è la *costante di Planck*, con valore $6.62556 \cdot 10^{-34}$ J·s. Per generare una radiazione laser, è dunque necessario disporre di una sostanza i cui atomi o molecole siano in grado di emettere fotoni. Una tale sostanza prende il nome di *mezzo attivo*, o *mezzo laserante*. Per comprendere il meccanismo di generazione del fascio è però indispensabile prima di tutto illustrare le interazioni tra fotoni e atomi (o molecole), nonché i concetti di emissione stimolata, inversione di popolazione e pompaggio.

2.2.1 L'Emissione Stimolata

L'energia di un atomo non varia con continuità, bensì in maniera discreta secondo livelli ben definiti. Solo in questi stati l'atomo è in equilibrio e può esistere in maniera stabile. In condizioni normali, l'atomo si troverà al livello energetico più basso, definito *stato fondamentale*. Quando un fotone colpisce l'atomo, trasferisce ad esso tutta la sua energia. Se l'energia trasportata dal fotone è sufficiente a colmare il gap energetico tra lo stato fondamentale e un livello superiore, l'atomo assorbirà il fotone e si porterà ad uno *stato eccitato* (anch'esso stabile). Indicando con E_1 ed E_2 rispettivamente il livello energetico fondamentale e un livello superiore, risulta che un fotone di frequenza f può essere assorbito dall'atomo solo se vale l'uguaglianza:

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h \cdot f$$

Tuttavia, come è noto dalla termodinamica, più basso è il contenuto energetico di un sistema e più la sua condizione è stabile: il nuovo livello energetico raggiunto, pur essendo di per sé stabile, lo è dunque molto meno dello stato fondamentale. Dopo un certo tempo, perciò, l'atomo ritornerà comunque al livello fondamentale, emettendo energia sotto forma di un fotone. Poiché il divario energetico tra i livelli è sempre lo stesso, il fotone emesso avrà la stessa energia di quello assorbito inizialmente. I due fotoni avranno anche stessa frequenza, lunghezza d'onda, direzione e fase, e saranno quindi indistinguibili. Questo fenomeno è noto come *emissione spontanea*.

Se invece l'atomo si trova già allo stato eccitato, quando viene colpito da un fotone con energia pari a ΔE il suo livello energetico non può salire ulteriormente. Ciò che invece avviene è che l'atomo decade immediatamente allo stato fondamentale, emettendo questa volta due fotoni (poiché ha ricevuto due volte l'energia per il salto di livello), del tutto indistinguibili tra loro ed entrambi identici al fotone incidente. Questo fenomeno è noto come *emissione stimolata*. La differenza tra le due tipologie di emissione è riassunta in fig. 2.3. Le sorgenti laser sfruttano l'emissione stimolata per amplificare la radiazione, cioè per aumentare il numero di fotoni emessi, e di seguito nel testo sarà spiegato il modo in cui ciò è possibile.

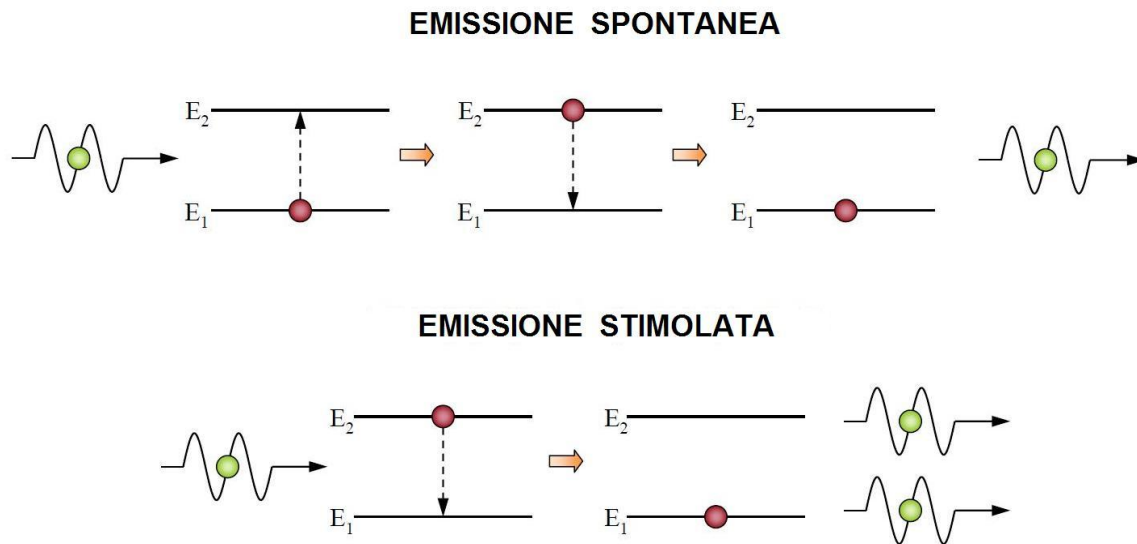


Figura 2.3: *Differenza tra emissione spontanea ed emissione stimolata* ^[15]

2.2.2 L’Inversione di Popolazione e il Pompaggio

In condizioni normali, all’interno del mezzo attivo la maggior parte degli atomi si trova allo stato fondamentale, e solo un piccola percentuale è nello stato eccitato. In queste condizioni è evidente che, in caso di eccitazione con fotoni, il fenomeno che preferenzialmente si verifica è l’emissione spontanea, la quale non porta alcun effetto poiché non incrementa il numero dei fotoni stessi. Se invece la popolazione di atomi avesse proporzioni invertite (maggioranza di atomi eccitati e piccola percentuale allo stato fondamentale), allora si avrebbe principalmente emissione stimolata e sarebbe possibile aumentare il numero di fotoni emessi, amplificando la radiazione.

Per realizzare questa cosiddetta *inversione di popolazione* è necessario fornire ininterrottamente energia agli atomi del mezzo attivo, in modo da mantenerli stabilmente allo stato eccitato. Questa operazione è definita *pompaggio*, e non è affatto semplice: è infatti essenziale che gli atomi, una volta giunti al livello energetico superiore, non decadano subito in modo spontaneo, bensì rimangano eccitati per un tempo sufficiente a garantire l’arrivo di un fotone (con conseguente emissione stimolata). Questa capacità dipende dal materiale, e solo le sostanze che la possiedono (definite *metastabili*) possono essere impiegate come mezzi attivi per generare laser. Il pompaggio può avvenire in due modi: *ottico* oppure *elettronico*.

Il *pompaggio ottico* si esegue attraverso lampade oppure diodi laser: illuminando una estremità del mezzo attivo, se ne eccitano gli atomi producendo un flusso di fotoni.

Il *pompaggio elettronico* si esegue invece inserendo il mezzo attivo all'interno di un condensatore: quando si applica una differenza di potenziale, gli elettroni sono costretti a muoversi all'interno del mezzo attivo, urtando gli atomi ed eccitandoli.

Nel seguito si chiarirà come viene fisicamente realizzata una sorgente che sfrutti i principi appena illustrati per generare un fascio laser.

2.2.3 Il Risonatore

Il *risonatore* (o *cavità risonante*) può essere considerato il reale dispositivo di emissione laser. In sostanza è costituito da una cavità, all'interno della quale è posizionato il mezzo attivo, e racchiusa alle estremità da due specchi (fig. 2.4): quello posteriore è ad alta riflettività, mentre quello anteriore è semi-riflettente e parzialmente trasparente, per consentire al fascio di propagarsi fuori dalla cavità.

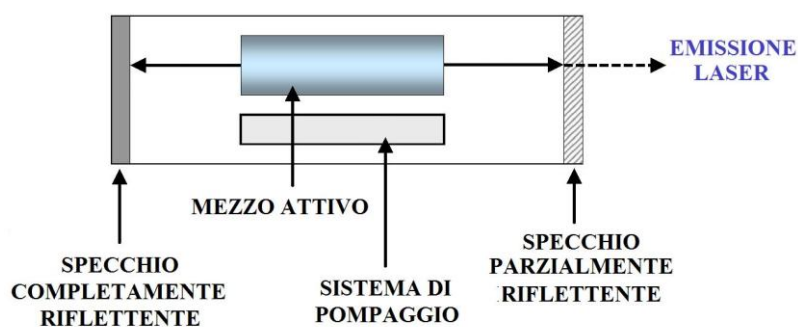


Figura 2.4: Rappresentazione di un risonatore ^[15]

Gli specchi hanno la funzione di riflettere i fotoni ripetutamente avanti e indietro all'interno del risonatore, facendo loro attraversare più volte il mezzo attivo. Se è mantenuta l'inversione di popolazione mediante il pompaggio, gli atomi si trovano allo stato eccitato e reagiscono al bombardamento fotonico effettuando una emissione

stimolata. Ogni volta che i fotoni attraversano il mezzo attivo il loro numero dunque aumenta, e con esso viene amplificata la potenza della radiazione. Nella cavità si generano perciò onde stazionarie che si propagano preferenzialmente in direzione assiale. Poiché infatti gli specchi sono posti alle estremità, i fotoni che attraversano il mezzo attivo in direzione ortogonale non vengono riflessi, e in breve tempo rimangono ad oscillare solo i fotoni che si propagano assialmente. Questo processo di “raddrizzamento, amplificazione e fuoriuscita” è schematizzato in fig. 2.5.

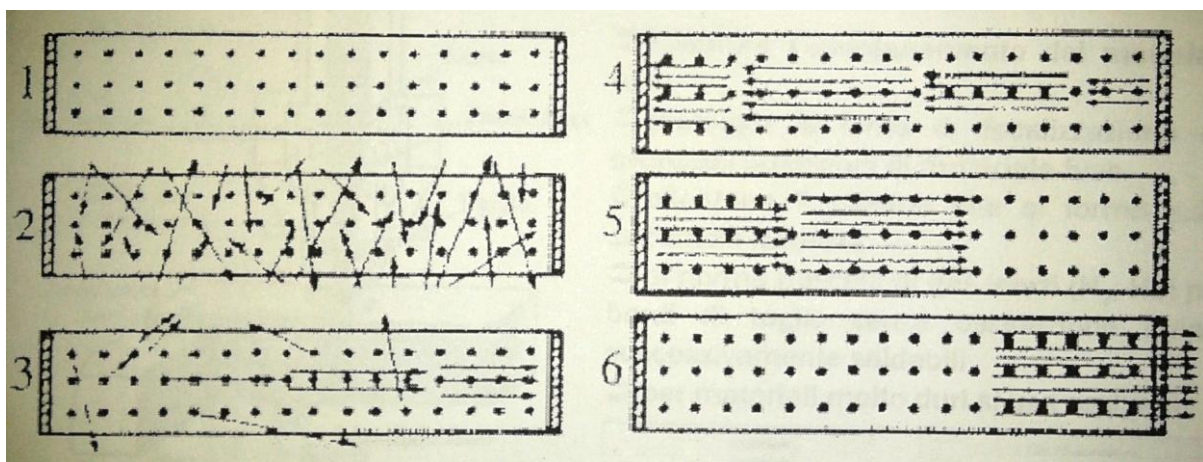


Figura 2.5: Raddrizzamento, amplificazione e fuoriuscita del fascio di fotoni ^[14]

2.2.4 Regimi di Funzionamento

In condizioni normali un laser funziona in *regime continuo* (*Continuous Wave, CW*), cioè con emissione continua e potenza costante nel tempo (fig. 2.6 (a)). Questo regime di funzionamento è molto semplice, ma non tanto adatto alle lavorazioni sui materiali: una sollecitazione termica continuativa del pezzo produce infatti zone termicamente alterate (*HAZ*, cioè *Heat Affected Zones*) molto ampie, con conseguenti danni al materiale e dispersione dell'energia del fascio. L'alternativa è il *regime impulsato* (*Pulsed Wave, PW*), caratterizzato da funzionamento discontinuo (fig. 2.6 (b)). In questo caso è necessario definire alcuni parametri^[12]: la durata del singolo impulso τ , la frequenza degli impulsi f , l'energia del singolo impulso E , la potenza media $P_m (E \cdot f)$ e la potenza di picco P_p (valore massimo durante il singolo impulso).

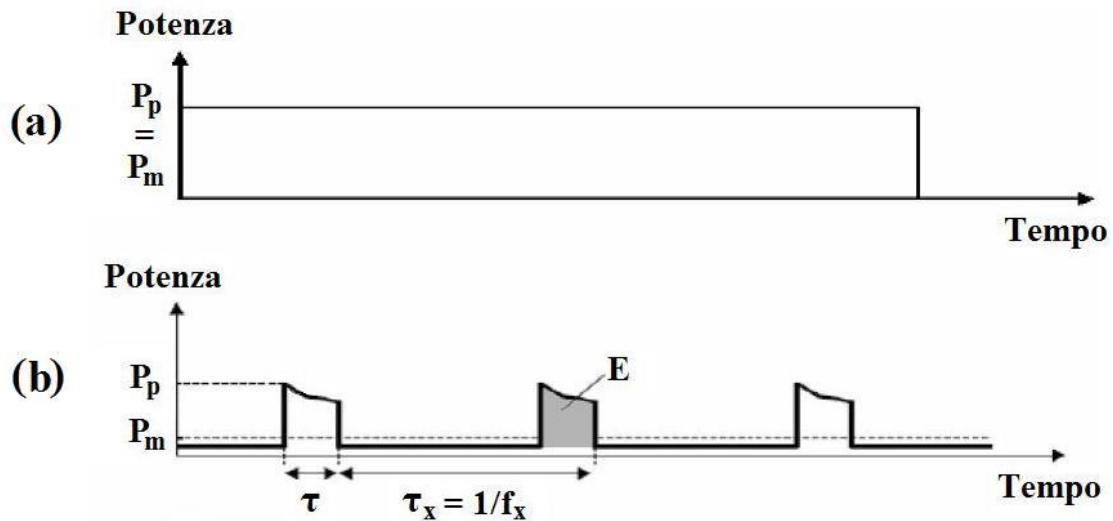


Figura 2.6: Regimi di funzionamento: a) regime continuo , b) regime impulsato ^[14]

Il vantaggio principale del regime impulsato rispetto al continuo è che, a parità di potenza media, si ottengono picchi di potenza elevatissimi e molto brevi. In tal modo l'energia totale ceduta al materiale rimane contenuta, e con essa lo stress termico e la HAZ. Per questo i laser impulsati sono adatti a lavorare i compositi, in particolare gli *FRP*¹¹: le matrici polimeriche sono infatti molto sensibili ai danni termici. Il regime impulsato si può ottenere in tre modi^[12]: *free running*, *Q-switching* e *mode locking*.

Il metodo *free running* consiste in una eccitazione pulsata del mezzo attivo, cioè nell'utilizzo di un pompaggio intermittente. Nel caso di pompaggio ottico con lampade, è possibile ottenere questo risultato utilizzando lampade flash. Questa tecnica permette di ottenere laser con impulsi dell'ordine dei millisecondi (10^{-3} s).

Il metodo *Q-switching* consiste nell'invalidare temporaneamente l'effetto risonante, così da interrompere la radiazione. Durante l'interruzione l'energia continua ad accumularsi, e alla ripresa dell'emissione si ottengono potenze di picco elevatissime. Esistono vari modi di realizzare questo: ad esempio, uno dei due specchi può essere

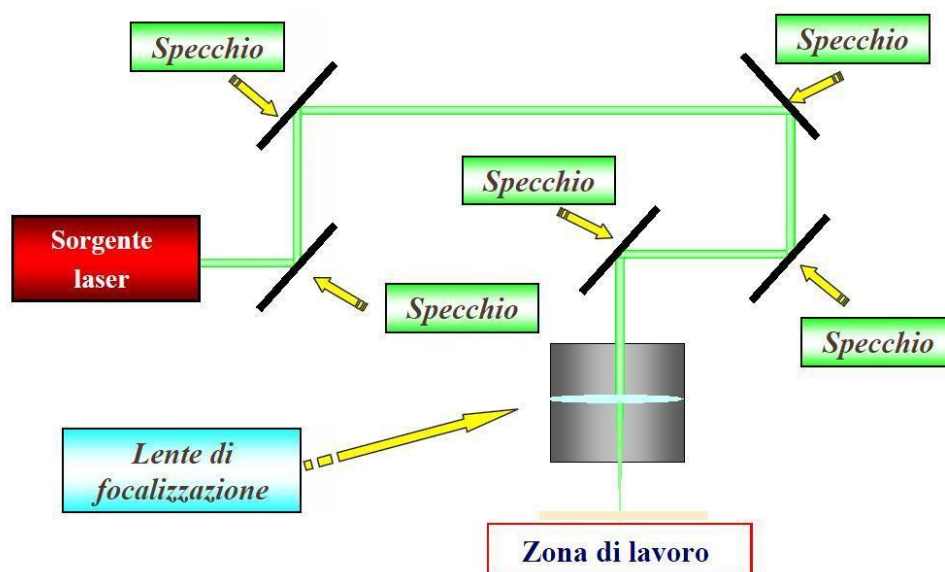
¹¹ La sigla *FRP* (*Fiber Reinforced Polymers* o *Fiber Reinforced Plastics*) indica genericamente tutti i materiali compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre.

fatto ruotare, cosicché l'emissione si abbia solo quando i due specchi sono affacciati. Con questo metodo è possibile ottenere impulsi dell'ordine dei nanosecondi (10^{-9} s).

La tecnica *mode locking* consiste nell'indurre una differenza di fase fissa tra i modi di vibrare della cavità. Si genera così una interferenza costruttiva/distruttiva tra le onde: in fase distruttiva si ha l'interruzione dell'emissione, mentre in fase costruttiva si producono impulsi molto intensi. Le applicazioni industriali del mode locking sono, ad oggi, ancora praticamente inesistenti. Questo metodo consente di ottenere impulsi brevissimi, dell'ordine dei picosecondi (10^{-12} s) o anche femtosecondi (10^{-15} s).

2.2.5 Sistemi di Trasporto del Fascio

Una volta uscita dal risonatore, la radiazione deve essere condotta alla zona di lavoro. Questo "trasporto" deve soddisfare alcune esigenze: ridurre al minimo la dissipazione dell'energia del fascio, mantenere il parallelismo delle onde lungo il percorso, e infine garantire alla testa di lavoro la possibilità di eseguire movimenti nello spazio. Esistono due modalità di trasporto (fig. 2.7): *catena ottica* e *fibra ottica*.



(a)

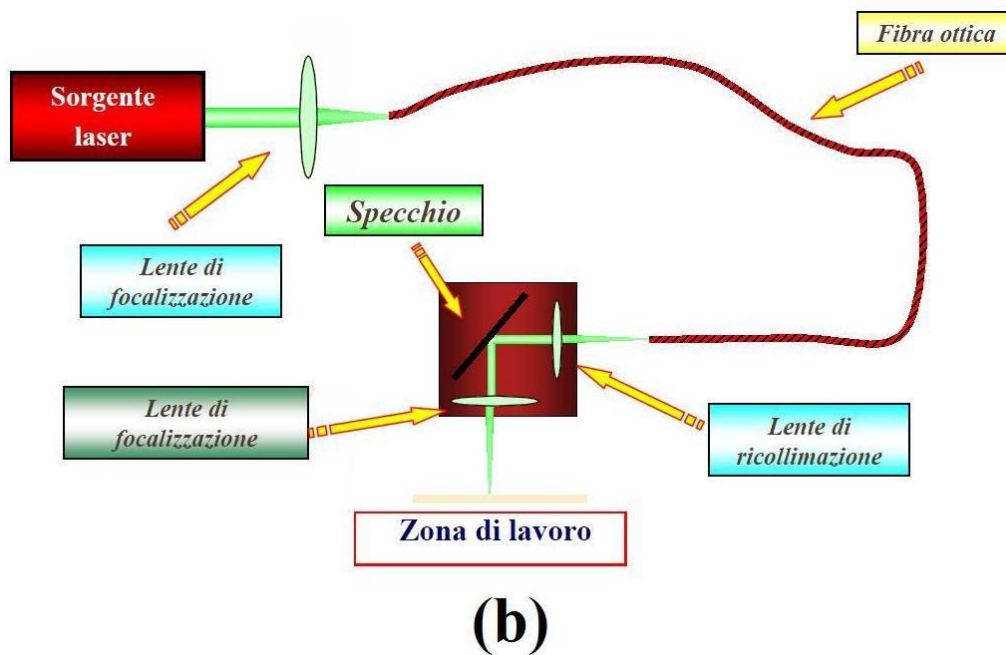


Figura 2.7: Modalità di trasporto del fascio: a) catena ottica , b) fibra ottica ^[14]

Il trasporto in *catena ottica* prevede l'utilizzo di specchi altamente riflettenti in rame o silicio. La radiazione viene riflessa più volte, e le onde rimangono parallele tra loro. All'interno della testa di lavoro (al termine del percorso) è presente una lente di focalizzazione, che ha il compito di rendere concorrenti le traiettorie dei fotoni, concentrandoli in uno spot estremamente ridotto. Le distanze tra gli specchi non sono fisse, e ciò permette alla testa di lavoro di muoversi lungo i tre assi cartesiani nello spazio (a volte sono possibili anche rotazioni). Questo sistema garantisce elevata precisione, ma risulta molto costoso a causa della complessità di regolazione e manutenzione dei delicatissimi gruppi ottici (facilmente danneggiabili da parte del calore). Questa modalità di trasporto è utilizzabile con tutte le tipologie di laser.

Il trasporto in *fibra ottica* consiste invece nel veicolare il fascio attraverso un dispositivo filiforme (chiamato appunto fibra ottica), costituito da un'anima in materiale trasparente alla radiazione e ricoperta da un rivestimento che invece la riflette (mantenendola all'interno per riflessione totale). I fotoni avanzano quindi senza problemi all'interno della fibra lungo tutto il percorso necessario, fino a

giungere alla zona di lavoro. Il sistema di lenti è differente rispetto al caso di catena ottica: per poter “introdurre” la radiazione all’interno della fibra è infatti necessaria una prima lente di focalizzazione all’ingresso, mentre all’uscita il fascio è divergente e rende necessarie una lente di ricollimazione (per rendere le onde nuovamente parallele) e una seconda lente di focalizzazione (per concentrarle nello spot desiderato). Questo sistema è nettamente più economico e semplice del precedente, anche per la manutenzione. Il principale problema di cui soffre è che non può essere impiegato con tutte le tipologie di laser: solo un certo intervallo di lunghezze d’onda può infatti essere trasportato in fibra ottica, poiché il rivestimento non è in grado di riflettere tutti i tipi di radiazione (ad esempio i laser a CO₂, con $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, non possono essere trasportati). Un ulteriore inconveniente è che il fascio, nel viaggiare all’interno della fibra, perde la distribuzione spaziale che gli si fornisce all’ingresso.

2.3 PROPRIETA’ E PARAMETRI DELLA RADIAZIONE LASER

Si è già accennato (v. § 2.1) alle tre caratteristiche che distinguono i fasci laser da ogni altra radiazione. In questo capitolo esse saranno riprese e brevemente illustrate, insieme ad una serie di altre grandezze che caratterizzano la radiazione laser.

La prima importante proprietà è la *monocromaticità*, ossia il fatto che tutte le radiazioni del fascio hanno identiche lunghezza d’onda e frequenza. La lunghezza d’onda determina il “colore” con cui l’occhio percepisce la radiazione, e ciò giustifica l’uso del termine “monocromaticità” (cioè “unico colore”). Lunghezza d’onda e frequenza di un laser dipendono dal salto energetico ΔE che origina l’emissione di fotoni, il quale a sua volta dipende dal materiale del mezzo attivo. Ciò significa che a seconda della sostanza impiegata si ottengono laser con λ e f caratteristici.

La *coerenza* consiste nel fatto che tutte le onde del fascio sono in fase tra loro. Due onde si dicono *in fase* se le posizioni dei picchi e delle valli coincidono (fig. 2.8). Si

possono distinguere due tipi di coerenza: due onde possono infatti oscillare in fase alla stessa distanza dalla sorgente in istanti di tempo diversi (*coerenza temporale*), oppure nello stesso istante di tempo in differenti posizioni dello spazio (*coerenza spaziale*). Le radiazioni laser sono sempre coerenti sia nel tempo che nello spazio.

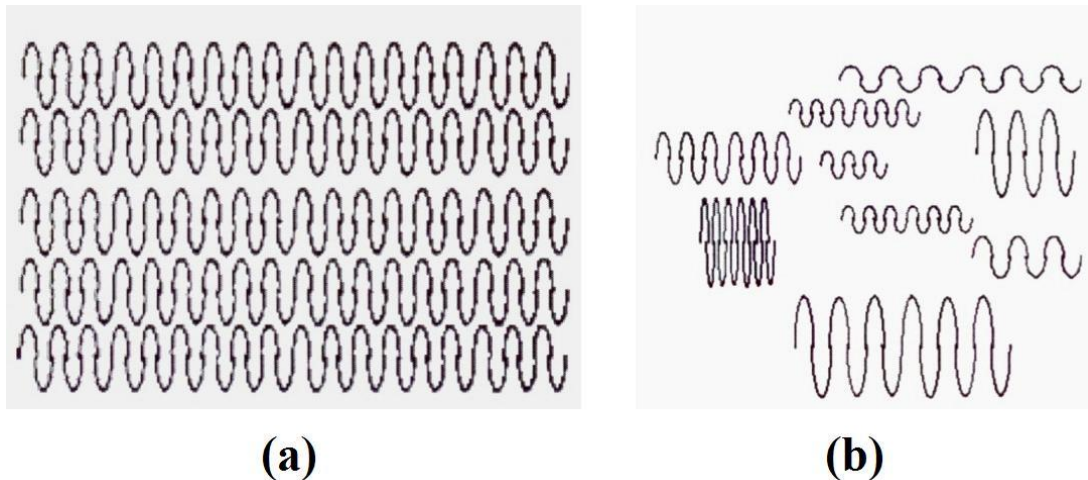


Figura 2.8: Differenza tra onde in fase (a) e onde non in fase (b) ^[16]

Un'altra caratteristica rilevante è l'*unidirezionalità*, cioè il fatto che le radiazioni si propagano tutte nella stessa direzione. Questo consente di avere un fascio fortemente collimato, con onde parallele e non divergenti. Esso risulta perciò molto facile da focalizzare, concentrandone l'intera potenza in uno spot focale piccolissimo. Le densità di potenza raggiungibili sono molto elevate: anche diverse decine di MW/cm^2 con sorgenti di pochi kilowatt. Il diametro dello spot può assumere valori che vanno da qualche decina di micron fino ad un massimo dell'ordine del millimetro.

L'*irradianza* è invece un parametro che misura la potenza emessa per unità di superficie, e rappresenta quindi la vera e propria densità di potenza sulla sezione trasversale del fascio laser (si misura infatti in W/cm^2).

Molto simile all'irradianza è la *brillanza*, che misura la potenza emessa dal fascio per unità di superficie e per unità di angolo solido (dunque si misura in $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$). Per

loro stessa natura i laser possiedono brillanze molto più elevate rispetto alle sorgenti convenzionali, grazie alla già citata unidirezionalità e focalizzabilità del fascio.

Il *TEM* (*Transverse Electromagnetic Mode*) rappresenta la distribuzione di potenza sulla sezione trasversale del fascio. Ogni sorgente laser possiede uno specifico valore di *TEM*, poiché la distribuzione di potenza dipende dalla soluzione costruttiva adottata per il risonatore. Una volta definito un riferimento cartesiano sulla sezione, si utilizza la notazione TEM_{xy} : x rappresenta i punti di minimo lungo le ascisse, e y i punti di minimo lungo le ordinate. Il modo TEM_{00} corrisponde, ad esempio, ad una distribuzione gaussiana. La notazione TEM_{xy}^* indica invece la sovrapposizione di due modi identici ruotati tra loro di 90° . Alcuni esempi comuni sono dati in fig. 2.9. Se una sorgente laser produce una radiazione che presenta più modi *TEM* sovrapposti, si parla di *laser multi-modo*, in contrapposizione con i *laser a modo singolo*.

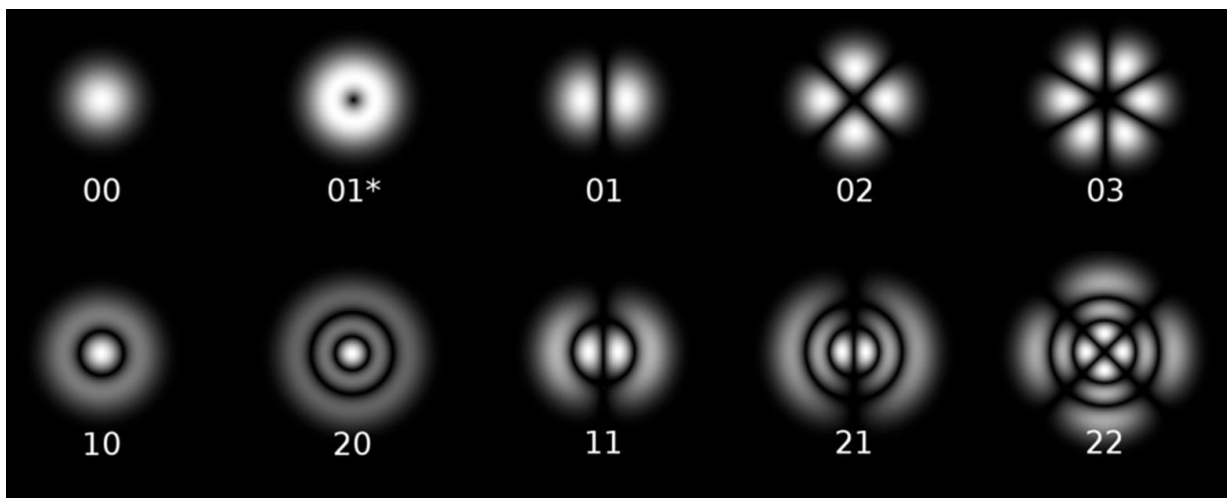


Figura 2.9: Esempi dei più comuni modi *TEM* ^[20]

L'indicatore M^2 si riferisce invece alla qualità della radiazione laser in termini di focalizzabilità. Esso indica quanto la distribuzione di potenza si discosta dalla condizione gaussiana (solitamente ottimale). Più alto è il valore, più la distribuzione differisce dalla gaussiana (il modo TEM_{00} ha il minimo valore di M^2 , cioè 1).

Un'altra grandezza importante (e molto simile alle due precedenti) è la *fluenza*, ossia la quantità di energia per unità di superficie, misurata in J/cm^2 e calcolabile semplicemente moltiplicando la densità di potenza per il tempo di esposizione.

L'ultimo parametro essenziale per i laser è l'*efficienza*, cioè il rendimento del sistema di produzione della radiazione. All'interno di un sistema laser si possono individuare tre trasformazioni energetiche, a ciascuna delle quali si può associare un rendimento (fig. 2.10). Il termine η_P indica il rendimento di pompaggio, η_A il rendimento di assorbimento di energia da parte del mezzo attivo, ed η_L il rendimento di generazione del fascio laser. L'efficienza complessiva risulterà dunque $\eta = \eta_P \cdot \eta_A \cdot \eta_L$.

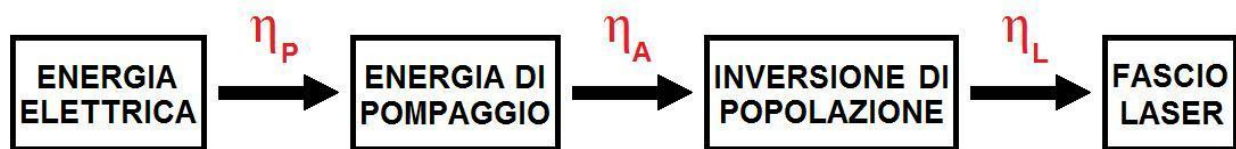


Figura 2.10: Schema delle trasformazioni energetiche in un sistema laser ^[12]

2.4 CLASSIFICAZIONE

Sono già state presentate due semplici possibilità di classificazione dei laser, rispettivamente secondo il regime di funzionamento (continuo o impulsato, v. § 2.2.4) e secondo la modalità di trasporto (catena ottica o fibra ottica, v. § 2.2.5). Tuttavia, una più organica catalogazione delle sorgenti laser può essere ottenuta basandosi sulla natura e sullo stato fisico del mezzo attivo. Con questo criterio si possono distinguere^[12]: *laser a stato solido*, *laser a stato gassoso*, *laser a stato liquido*, *laser a semiconduttori*, e *laser in fibra*.

I *laser a stato solido* utilizzano come mezzi attivi dei veri e propri cristalli. Esistono numerose tipologie di questi laser, ma i più comuni sono senza dubbio i *laser a rubino* (con cristalli di rubino e $\lambda = 694 \text{ nm}$), i *laser Nd:YAG* (con cristalli di vetro

drogati al neodimio e $\lambda = 1064$ nm), e i *laser Yb:YAG* (con cristalli di vetro drogati all'itterbio e $\lambda = 1030$ nm). I cristalli utilizzati possono avere diverse forme geometriche (barrette, dischi, capillari, ...), e possono quindi richiedere l'impiego di differenti soluzioni costruttive. Di seguito (v. § 2.4.1) verranno approfonditi in particolare i laser Nd:YAG, poiché di questa categoria fa parte il laser impiegato nello studio esposto in questa trattazione.

I *laser a stato gassoso* sono sistemi che sfruttano come mezzi attivi dei gas puri o delle miscele di gas o vapori metallici. In questo caso il risonatore è un tubo di vetro o di quarzo chiuso da specchi alle estremità, e il pompaggio avviene in genere mediante radiazioni ultraviolette oppure corrente elettrica. I più comuni laser allo stato gassoso sono i *laser a CO₂* ($\lambda = 10.6$ μm), i *laser ad eccimeri* ($\lambda = 248 - 308$ nm), i *laser ad azoto* ($\lambda = 337$ nm), e i *laser a neon-elio* ($\lambda = 632.8$ nm).

I *laser a stato liquido* non sono di interesse industriale, e trovano applicazione quasi esclusivamente in campo medico. Il mezzo attivo è un colorante organico o inorganico, contenuto in un risonatore in vetro. Il pompaggio si esegue con lampade flash (per un funzionamento impulsato) o con un laser ausiliario a stato gassoso (per un funzionamento continuo). Una particolarità di questi laser è che la frequenza può essere modificata inserendo un prisma all'interno del fluido.

I *laser a semiconduttori* sono in realtà laser a stato solido. Tuttavia, poiché il mezzo attivo impiegato (diodi laser) è di natura diversa rispetto ai tradizionali cristalli, questi laser sono spesso considerati una categoria a parte. Sono costituiti da una giunzione p-n tra semiconduttori drogati, a cui può essere applicata corrente elettrica (pompaggio) per generare una emissione di fotoni. Il risonatore è in realtà la giunzione stessa, chiusa da due pareti riflettenti. Possiedono rendimenti molto elevati (fino al 50%), ed hanno $\lambda = 940 - 975$ nm.

I *laser in fibra* utilizzano come mezzo attivo il nucleo di una fibra ottica appositamente drogata. Il pompaggio viene effettuato con diodi, i quali proiettano all'interno della fibra una radiazione che, per riflessione totale, attraversa numerose volte il mezzo attivo. Invece di comuni specchi, il risonatore è chiuso alle estremità da due reticoli di Bragg. Questi laser generano fasci di elevata qualità con alti rendimenti, e sono molto adatti per funzionare in regime impulsato ad alte frequenze.

2.4.1 Approfondimento: Laser Nd:YAG

Il nome *Nd:YAG* deriva dalla composizione del mezzo attivo: *YAG* significa infatti “*Yttrium Aluminium Garnet*”, cioè “*granato di ittrio e alluminio*”. I cristalli Nd:YAG possono avere diverse forme, ma i più diffusi sono quelli in forma di barrette, con diametri dell'ordine del centimetro e lunghezze tipiche di 10 – 20 cm. Il risonatore è una cavità ad alta riflettività con sezione a doppia ellisse (fig. 2.11): la barretta è posta al centro, nel fuoco comune alle due ellissi, mentre le lampade flash per il pompaggio sono posizionate nei fuochi restanti. Questa configurazione permette alle onde emesse dalle lampade di giungere sempre sulla barretta.

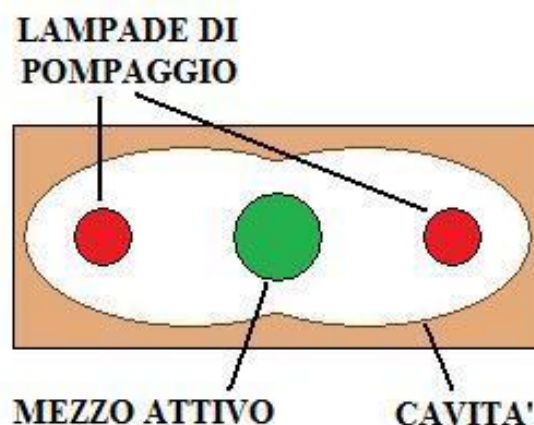


Figura 2.11: Sezione del risonatore per un laser Nd:YAG

I laser Nd:YAG soffrono il surriscaldamento del cristallo, il quale può deformarsi (peggiorando la qualità del fascio) o addirittura esplodere. Per evitare ciò, l'interno

della cavità è raffreddato ad acqua, ma ciò non risolve del tutto il problema e permane dunque un notevole limite alle massime potenze raggiungibili. Inoltre, si osserva che una variazione di potenza di pompaggio si traduce in una variazione di potenza del laser, e siccome l'eccitazione garantita dalle lampade si degrada nel tempo, ne risulta che la potenza del laser dipende anche dall'età delle lampade. Fortunatamente è possibile incrementare la potenza della sorgente disponendo più barrette di mezzo attivo in serie (ciascuna dotata di lampade sincronizzate).

Il vantaggio fondamentale dei laser Nd:YAG risiede tuttavia nella lunghezza d'onda: essa è pari a 1064 nm e cade perciò nel cosiddetto "vicino infrarosso", ossia la porzione di campo infrarosso più prossima al visibile. Questo permette innanzitutto una migliore focalizzazione rispetto ai laser a CO₂, dunque una maggiore densità di potenza e una migliore qualità del fascio. In secondo luogo una radiazione di questo tipo può essere trasportata in fibra ottica, il che si traduce in un sistema più semplice e flessibile, nonché meno ingombrante e molto meno costoso (v. § 2.2.5). Inoltre, la lunghezza d'onda dei laser Nd:YAG consente loro di essere agevolmente focalizzati con lenti tradizionali, mentre i laser a CO₂ richiedono forzatamente l'impiego di specchi metallici (piani per la trasmissione e parabolici per la focalizzazione).

Infine, si osserva che la riflettività dei metalli aumenta nel campo del pieno infrarosso: questo significa che essi riflettono quasi perfettamente le radiazioni del medio infrarosso, e dunque molti di essi possono essere lavorati con i laser Nd:YAG ma non con quelli a CO₂. Questi ultimi, tuttavia, sono usatissimi per lavorare materiali come il vetro o il plexiglass che, essendo trasparenti nel visibile e nel vicino infrarosso, si lascerebbero attraversare senza alcun effetto dai laser Nd:YAG.

2.5 CENNI SULLA SICUREZZA

Un altro approccio di classificazione è basato sulle *classi di sicurezza*. Le radiazioni ad alta intensità dei laser, infatti, rappresentano un importante rischio biologico. L'occhio è un organo molto delicato, e un fascio collimato che attraversi il cristallino

verrebbe concentrato in una zona puntiforme ad altissima densità energetica, bruciando la retina. Se la potenza è alta, l'esposizione può causare anche danni alla pelle. E' dunque utile una classificazione basata sui potenziali danni dei laser, a cui possano fare riferimento le leggi sulla sicurezza. Si distinguono diverse classi:

- Classe 1: Laser con potenze inferiori a 0.04 mW che emettono luce visibile. Non rappresentano alcun pericolo per il corpo umano.
- Classe 2: Laser con potenze fino a 1 mW che emettono luce visibile. Il fascio non è sicuro se osservato direttamente e a lungo, ma il riflesso di chiusura delle palpebre è più che sufficiente per la protezione dell'occhio. Nessun danno alla pelle.
- Classe 3A: Laser con potenze fino a 5 mW che emettono luce visibile. Pericolosi se osservati attraverso strumenti ottici, che possono ridurre il diametro dello spot aumentandone la densità di potenza.
- Classe 3B: Laser con potenze fino a 500 mW che emettono nel visibile o invisibile. Sono pericolose sia la visione diretta che la riflessione speculare (specialmente se l'occhio è indifeso), ma possono essere osservati per riflessione diffusa.
- Classe 4: Laser con potenze oltre i 500 mW, di qualsiasi lunghezza d'onda. Sono sempre pericolosi, sia per l'occhio che per la pelle, in qualsiasi modo li si osservi: visione diretta, riflessione speculare o diffusa. Vi è potenziale pericolo di incendio.

Sono particolarmente pericolosi i laser che emettono radiazioni nell'invisibile, poiché l'occhio non è in grado di percepirne l'intensità e non attua alcun riflesso di protezione. Un importante accorgimento consiste nel far terminare il percorso del raggio su un materiale che lo diffonda sotto forma di radiazione non pericolosa.

CAPITOLO 3

LAVORAZIONI LASER SUI MATERIALI COMPOSITI

3.1 INTRODUZIONE

Dopo aver introdotto i materiali compositi e il laser, è ora necessario compiere un ulteriore passo unendo i due argomenti e trattando l'applicazione della tecnologia laser ai compositi stessi. Come mostrato nel Capitolo 1, questi particolari materiali possiedono proprietà e caratteristiche profondamente differenti rispetto ai materiali convenzionali, a causa della eterogeneità ed anisotropia che li caratterizzano.

Queste differenze si ripercuotono poi in modo marcato sugli aspetti tecnologici di queste due categorie di materiali. Per i materiali tradizionali, infatti, le tecnologie di lavorazione sono ormai consolidate, e nel corso dei decenni sono state ottimizzate e rese allo stesso tempo più economiche. Nel caso dei compositi, invece, la necessità di un approccio diverso ha costretto il mondo industriale ad elaborare appositi metodi di lavorazione, le cui migliorie ed innovazioni sono tuttora in pieno corso. In sostanza si può dire che la tecnologia di questi materiali è ancora in una fase di "infanzia".

Le varie metodologie di fabbricazione dei compositi non sono oggetto di questa tesi, pertanto questo capitolo riguarda esclusivamente le lavorazioni post-produzione che possono essere effettuate su di essi, come ad esempio operazioni di taglio, saldatura, ablazione e riparazione. In particolare, è opportuno prima di tutto fare una breve panoramica delle diverse tecnologie che è possibile impiegare per lavorare questi materiali, dopodiché ci si concentrerà specificamente sulle lavorazioni eseguite mediante laser, al fine di mostrarne vantaggi e svantaggi, nonché esaminare gli studi svolti finora attraverso l'opportuna letteratura tecnica.

3.1.1 Panorama Tecnologico

Storicamente, il primo approccio intrapreso verso i materiali compositi è consistito nell'applicazione delle tecnologie già sviluppate per i materiali convenzionali, specialmente i metalli. I principali metodi di asportazione comunemente applicati ai compositi sono cinque: *lavorazione meccanica*, *waterjet abrasivo*, *elettroerosione*, *lavorazione ad ultrasuoni* e *lavorazione laser*. Quest'ultima, essendo la tematica centrale di questa trattazione, sarà approfondita di seguito in un capitolo a parte.

La *lavorazione meccanica* è una tecnologia ormai consolidata, perciò rimane tuttora il metodo più utilizzato per i compositi polimerici con rinforzo fibroso. Per riuscire a lavorare anche le fibre più resistenti si impiegano utensili estremamente duri in acciaio rapido o carburi, oppure dotati di lame diamantate. Tali utensili sono molto precisi, ma non consentono di realizzare geometrie complesse. Inoltre, a causa della abrasività delle fibre e dei carichi intermittenti generati dalla loro rottura, gli utensili sono soggetti ad una elevatissima usura, che riduce molto la loro vita utile.

L'usura dipende inoltre dalla velocità di lavoro: alte velocità permettono elevata produttività ma costringono a costosi cambi utensile, mentre basse velocità consentono un risparmio sugli utensili ma impongono bassa produttività. Inoltre, l'azione meccanica produce spesso sul materiale composito tutta una serie di “danni da contatto”, specialmente se l'utensile è deteriorato: delaminazioni¹², pull-out¹³ delle fibre, degrado superficiale o anche zone termicamente alterate (più un utensile è usurato, più calore si genera per attrito durante la lavorazione).

¹² La *delaminazione* è un comune difetto tipico dei materiali compositi laminati. Consiste in sostanza nel distacco, anche solo a livello locale, tra due lamine adiacenti. E' solitamente una difettosità critica, poiché ai bordi della “bolla” che si forma si concentrano tensioni in grado di far rapidamente aumentare le dimensioni della zona delaminata.

¹³ Il *pull-out* (letteralmente “tirare fuori”) consiste in un vero e proprio trascinamento delle fibre da parte dell'utensile. Le fibre vengono strappate e parzialmente estroflesse dalla loro sede nella matrice.

Il *waterjet abrasivo* è una tecnologia non convenzionale consistente in un sottile getto d'acqua ad altissima velocità arricchito con particelle abrasive. Questo metodo si distingue per il vantaggio di non indurre alcun effetto termico nei pezzi lavorati, dunque nessuna distorsione e totale assenza di zone termicamente alterate.

Nella lavorazione con *waterjet* degli FRP può però verificarsi delaminazione, a causa dell'effetto combinato delle elevate pressioni e della flessione elastica delle lamine. Un altro limite di questa tecnologia è la larghezza del solco di taglio ottenibile, che generalmente non può scendere al disotto il millimetro e dunque non permette di impiegare questo metodo per realizzare micro-lavorazioni.

L'*elettroerosione* è un procedimento che sfrutta il calore generato da archi elettrici fatti scoccare continuamente tra l'elettrodo-utensile e il pezzo in lavorazione, i quali fanno evaporare localmente il materiale dando al pezzo una forma esattamente complementare a quella dell'utensile impiegato. I principali problemi di cui questa tecnologia soffre sono l'ovvia usura dell'utensile nelle estreme condizioni di lavoro in cui si trova e la limitazione di utilizzo ai soli materiali conduttori.

Riguardo a quest'ultimo aspetto è doveroso ricordare che le fibre di carbonio, al contrario di quelle di vetro o aramidiche, sono ottimi conduttori elettrici. Questo significa che l'applicazione ai materiali compositi è limitata esclusivamente ai CFRP. Questa tecnica permette la realizzazione di forme anche molto complesse, con buona finitura superficiale e ottima accuratezza dimensionale, tuttavia la velocità di rimozione di materiale risulta estremamente ridotta.

La *lavorazione ad ultrasuoni* è un'altra tecnologia non convenzionale, che per asportare materiale sfrutta la vibrazione di particelle abrasive. Questa vibrazione è generata da un trasduttore, il quale la trasferisce ad un cono di trasmissione in cui viene amplificata, ed infine ad un utensile che a sua volta la induce nell'abrasivo. In analogia con l'elettroerosione, l'utensile deve possedere una forma complementare a quella del pezzo da realizzare. In analogia con il *waterjet*, invece, questo metodo non

produce nel pezzo alcun danno termico o metallurgico, né stress residui. Gli ultrasuoni permettono finiture superficiali migliori delle lavorazioni meccaniche, ed è possibile ottenere geometrie impensabili per i metodi convenzionali. Tuttavia, permane lo svantaggio costituito dalla bassissima velocità di lavoro.

3.1.2 Le Lavorazioni Laser

Come si può dedurre da tutti gli aspetti appena discussi, la lavorazione degli FRP è un problema complesso, e la ricerca di una soluzione applicabile a livello industriale costituisce una vera e propria sfida. L'incremento della domanda e la mancanza di valide lavorazioni alternative hanno portato negli anni ad estesi investimenti nelle lavorazioni meccaniche come metodo dominante. Tuttavia, come si è visto, con questa tecnologia possono verificarsi diversi danni nel materiale, a cui si aggiunge l'elevato consumo degli utensili. Tutto ciò richiede spesso lavorazioni secondarie o scarto di pezzi, perciò è essenziale una attenta selezione degli utensili e dei parametri di processo per ottenere lavorazioni di qualità. Questo, a volte, può richiedere attrezzature appositamente progettate (molto costose).

Di conseguenza si è cercato di studiare alcune alternative alle tradizionali lavorazioni meccaniche. Tra queste, l'elettroerosione non si è rivelata molto valida, poiché la sua applicazione risulta limitata da diversi fattori: il tasso di asportazione di materiale estremamente ridotto (che penalizza la produttività), la possibilità di lavorare solo le fibre di carbonio (le uniche che siano conduttrici), i danni termici prodotti nel pezzo, ed infine la rapidissima usura utensile. Anche nel caso degli ultrasuoni, la principale criticità risiede nella bassissima velocità di rimozione del materiale. Il laser e il waterjet, invece, hanno un considerevole potenziale come metodi industrialmente praticabili per lavorare gli FRP. Ciascuna di queste due tecnologie ha infatti i suoi vantaggi: ad esempio i laser sono più veloci sui piccoli spessori, mentre il waterjet su quelli più grandi. Quest'ultimo, oltretutto, non esercita alcuna azione termica né meccanica sul materiale, il che è assolutamente ideale per i compositi.

Il laser, d'altra parte, è una tecnologia senza contatto in cui l'utensile è la radiazione stessa, e ciò consente di eliminare qualsiasi scambio di forza con il pezzo, ovviando a numerosi problemi (v. § 2.1): non c'è alcuna usura utensile, né danni meccanici alle superfici, né vibrazioni o flessioni del pezzo (il quale non necessita perciò di essere bloccato). Rispetto al waterjet, con i laser si possono ottenere superfici di taglio di maggiore qualità (che usualmente non necessitano di finitura) e solchi di taglio più stretti (dunque sono fattibili anche le micro-lavorazioni). Come il waterjet, inoltre, anche i laser si prestano ad essere automatizzati mediante controllo numerico, garantendo la flessibilità della produzione e l'ottimizzazione dei tempi. Oltretutto, alcuni di essi possono essere trasmessi in fibra ottica, il che consente di ridurre i costi dei macchinari rispetto a quanto avviene invece per il waterjet.

Naturalmente, però, la tecnologia laser porta con sé anche alcuni svantaggi. Il principale inconveniente è che si tratta di un processo termico, che quindi origina nel materiale zone termicamente alterate non trascurabili, nelle quali le proprietà dei costituenti del composito (soprattutto della matrice) possono essere compromesse. Infine, un altro inconveniente dei laser molto sentito nelle realtà industriali è la liberazione di sostanze quali polveri e vapori tossici, prodotti dalle interazioni termochimiche tra il fascio laser e il composito e che possono costituire un rischio per la salute.

Saranno ora presentate, più dettagliatamente, le tre applicazioni principali dei laser sui materiali compositi (taglio, ablazione e saldatura), ciascuna seguita da una breve analisi della relativa letteratura tecnica.

3.2 TAGLIO

La lavorazione di taglio, per definizione, consiste in una distruzione localizzata del materiale fino a produrre la separazione completa e totale del pezzo in due parti. Nel caso dei materiali compositi, ciò implica la necessità di tranciare non solo la matrice, ma anche le fibre di rinforzo, e questo pone subito alcune considerazioni importanti.

Innanzitutto è doveroso notare che, all'interno di un composito, le fibre e la matrice reagiscono in maniera completamente diversa alle elevate densità di potenza che si applicano. Le fibre, come è noto, hanno prestazioni meccaniche molto superiori alla matrice, e sono in grado di sopportare temperature molto più elevate.

Ciò significa che per riuscire a recidere e tagliare le fibre è necessario fornire al materiale una notevole quantità di energia, la quale però causerà immancabilmente un danneggiamento della matrice eccessivo e troppo esteso. Ne risultano perciò zone termicamente alterate non trascurabili, specialmente nel caso dei CFRP: le fibre di carbonio sono infatti ottimi conduttori, e sono in grado di diffondere rapidamente il calore lontano dalla zona di lavoro, trasferendolo poi alla matrice.

Da questo punto di vista i laser in regime impulsato risultano molto più adatti di quelli continui a lavorare i materiali compositi (v. § 2.2.4), poiché con essi si riescono ad ottenere tempi di interazione laser-pezzo estremamente brevi e intervalli di raffreddamento tra gli impulsi, con la conseguenza di produrre zone termicamente alterate molto più ridotte. Per limitare i danni anche in caso di utilizzo di laser in regime continuo (ad esempio quelli a CO₂), è consigliabile lavorare alla massima velocità possibile per ridurre il tempo di interazione, e utilizzare fasci ad alta potenza per garantire comunque l'apporto energetico necessario.

Lavorare gli FRP mediante radiazioni laser, sebbene per molti aspetti sia vantaggioso, non è dunque per nulla facile. Per di più, se non si utilizzano parametri di processo con valori ottimali possono insorgere ulteriori problematiche e difetti nei pezzi. Questi difetti sono solitamente molto influenzati dai parametri e dalle caratteristiche del laser e del composito impiegati. Un primo esempio di queste interdipendenze è dato dalla densità di potenza e dal tempo di interazione, i quali sono i fattori che più di ogni altro influiscono sull'entità dei danni termici, e il cui effetto sulla vaporizzazione di resina e fibre è mostrato in figura 3.1. Si può notare che le fibre aramidiche hanno caratteristiche abbastanza vicine a quelle della resina, e questo consente al composito un comportamento termico abbastanza omogeneo anche a livello microscopico. Perciò i compositi polimerici con fibre aramidiche si

comportano molto meglio dei CFRP quando sottoposti a taglio laser, e subiscono meno danni termici. Il tempo di interazione è poi direttamente legato alla velocità di taglio, un aumento della quale produce la riduzione della HAZ, la riduzione in larghezza e profondità del solco di taglio, e la riduzione dei residui di fibre e matrice carbonizzati. Elevata frequenza degli impulsi, lunga durata degli stessi e basse velocità di lavoro generano invece un tempo di interazione maggiore, e conseguentemente zone alterate più ampie.

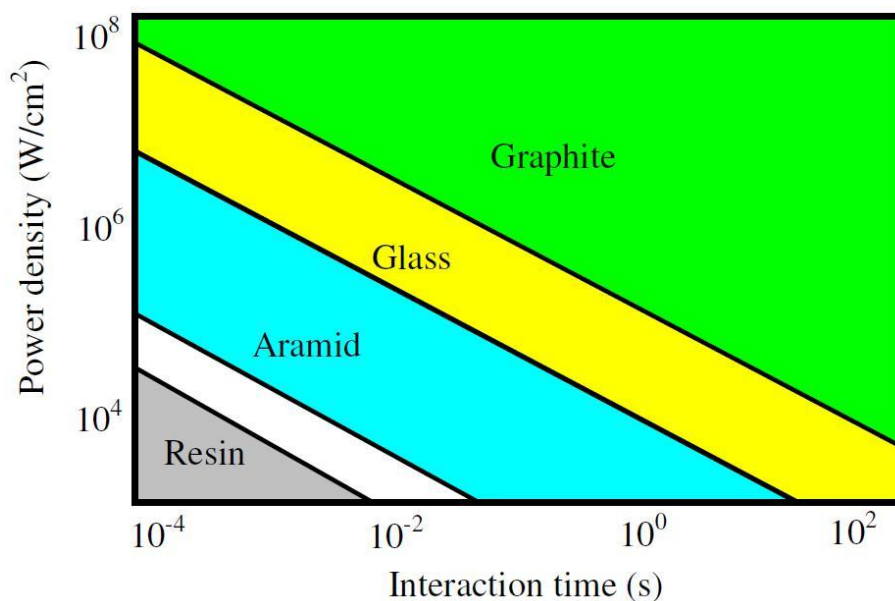


Figura 3.1: Condizioni di vaporizzazione per resina e vari tipi di fibre in funzione di densità di potenza e tempo di interazione ^[39]

Un altro parametro di importanza fondamentale nel determinare la qualità della lavorazione è la lunghezza d'onda del laser impiegato. Nella letteratura tecnica, come si vedrà anche nel seguito di questo capitolo, i laser studiati sono sempre di tipo industriale e dunque ascrivibili a tre categorie di lunghezze d'onda: medio infrarosso ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, laser a CO₂), vicino infrarosso ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, tutti i laser della famiglia YAG) e ultravioletto ($\lambda < 400 \text{ nm}$, laser a eccimeri o Nd:YVO₄). In generale le lunghezze d'onda maggiori producono effetti termici più marcati, poiché frequenza ed energia dei fotoni sono più basse ed eccitano solo le vibrazioni molecolari, mentre le radiazioni ultraviolette riescono a realizzare l'eccitazione degli elettroni, la quale è

un processo tipicamente molto meno termico. L'impiego di laser UV garantisce dunque superfici lavorate di maggiore qualità (specialmente se in regime impulsato), con migliori finiture superficiali e minore contenuto di difetti.

Nonostante tutto, i vantaggi del taglio laser rispetto alle altre tecnologie sono comunque ben evidenti: oltre ad essere una lavorazione senza contatto (con tutti i vantaggi di cui si è già parlato, v. § 3.1.2), consente anche di concentrare l'azione in uno spot piccolissimo, permettendo la realizzazione di forme complesse anche di dimensioni molto ridotte. Prima di affrontare altre lavorazioni, sarà ora presentata una sintesi dei principali studi effettuati sul taglio degli FRP.

3.2.1 Letteratura Tecnica Riguardante il Taglio

Per ciò che riguarda i materiali termoplastici, esistono analisi condotte da Schneider, Wolf e Petring^[21] riguardo alle prestazioni di taglio e all'estensione della zona termicamente alterata. Gli studi mostrano che la HAZ può essere ridotta utilizzando alte intensità e brevi tempi di interazione, poiché in tal modo si minimizza la conduzione termica attraverso le fibre e dunque il danno alla matrice. Per le prove è stato impiegato un laser a CO₂. Nel caso delle fibre di vetro, la lavorazione con passata singola lascia uno strato di vetro fuso sul bordo di taglio, mentre la tecnica di passata multipla riduce notevolmente questi residui e dà una superficie regolare e pulita, grazie alle maggiori velocità di taglio (e dunque minori interazioni).

Si nota poi una proporzionalità praticamente lineare tra la velocità di lavorazione e il numero di passate necessarie per ottenere il taglio completo: questo è un risultato ovvio, poiché un taglio più veloce comporta meno materiale rimosso con la singola passata, e di conseguenza il numero di passate richiesto per separare completamente il materiale è maggiore. Utilizzare il laser in modalità continua genera una estesa HAZ di circa 300 – 400 µm, la cui dimensione aumenta con il numero di passate. Con impulsi dell'ordine dei nanosecondi, invece, la zona alterata può ridursi a soli 100 – 200 µm e le superfici di taglio risultano meno carbonizzate.

Tuttavia, si nota che i vantaggi del regime impulsato rispetto al continuo si riducono se si aumenta la potenza media di quest'ultimo. Naturalmente l'estensione dei danni si può ridurre anche aumentando la velocità di taglio: fino a 50 m/min si osservano residui di matrice ri-solidificata e HAZ estesa, mentre per velocità superiori a 100 m/min non si notano residui e la HAZ è ristretta, pur continuando ad essere presente il recesso della matrice che porta allo scoperto le fibre. Infine, un'ultima grandezza che influisce sull'entità dei danni termici è il tempo di intervallo tra le passate (nel processo multi-passata): anche una piccola riduzione da 1.6 a 0.6 causa infatti un visibilissimo aumento della HAZ.

Shyha^[22] ha condotto invece esperimenti sul taglio di CFRP e GFRP¹⁴ mediante un laser a CO₂ con potenza massima di 2.5 kW, variando la velocità di taglio da 1000 a 1750 mm/min e controllandone gli effetti. Il risultato immediato indica che il tasso di asportazione cresce con la velocità di taglio, per entrambi i materiali e indipendentemente dalla potenza del laser e dal gas di assistenza. In particolare, la rimozione alla velocità di 1750 mm/min è più che doppia rispetto a quella che si ha a 1000 mm/min. Nonostante ciò, con i GFRP si ottengono asportazioni massime di 8 cm³/min, molto più alte rispetto ai 4.2 cm³/min dei CFRP: ciò è dovuto alla inferiore temperatura di fusione delle fibre di vetro rispetto a quelle di carbonio.

Tuttavia, una velocità di lavoro elevata implica un tempo di interazione molto basso, e questo comporta lo svantaggio di una rugosità superficiale piuttosto alta, che spesso eccede i limiti tipicamente imposti dall'industria aerospaziale e rende necessarie lavorazioni di finitura. Infine, in merito al solco di taglio, si osserva che sia la larghezza del kerf che la sua conicità sono inversamente proporzionali alla velocità: questo succede in virtù del tempo di interazione e vale per entrambi i materiali studiati, ma si nota che nel caso del carbonio il solco ottenuto risulta più stretto e tuttavia più conico. Tutto ciò consente di affermare con sicurezza che la velocità di

¹⁴ La sigla GFRP (*Glass Fiber Reinforced Plastics*) comprende genericamente tutti i compositi a matrice polimerica rinforzati con fibra di vetro.

taglio costituisce il parametro che più di ogni altro influenza la qualità della lavorazione e il tasso di asportazione del materiale.

Anche Goeke e Emmelmann^[23] si sono occupati di investigare l'influenza dei parametri di processo sulla qualità del taglio dei CFRP, utilizzando un laser in fibra drogato con itterbio e un laser a CO₂. Anche in questo caso le larghezze della zona alterata e del kerf si sono rivelate inversamente proporzionali alla velocità di taglio, a causa del fatto che aumentando il ritmo di lavoro si riduce il tempo di interazione e con esso la cessione di energia al materiale. Questo studio evidenzia inoltre che i laser a CO₂, in virtù della maggiore lunghezza d'onda, cedono molta più energia al pezzo e sono dunque adatti per tagliare gli spessori maggiori (fino a 7 mm con ottima qualità), mentre il laser in fibra è più performante per spessori non oltre i 2 mm.

Uno studio sul taglio di CFRP con laser Nd:YAG impulsato è stato poi condotto da Mathew, Goswami, Ramakrishnan e Naik^[24]. I risultati di questi esperimenti sono, fortunatamente, piuttosto chiari e dettagliati. Innanzitutto, come ci si aspetterebbe, l'estensione della zona termicamente alterata si rivela direttamente proporzionale alla frequenza degli impulsi, poiché minori pause tra di essi si traducono ovviamente in una maggiore sollecitazione termica del materiale. Tuttavia, la HAZ risulta anche inversamente proporzionale alla durata dell'impulso, a causa del fatto che una maggior durata implica un minore picco di potenza e dunque meno alterazioni nel pezzo. Si nota anche, a conferma dei risultati di molti altri studi, che la zona alterata si riduce all'aumentare della velocità grazie alla minore interazione, mentre cresce se si aumenta l'energia di impulso. Per ciò che riguarda invece il kerf, si conferma la sua riduzione all'aumentare della velocità di taglio, ma la novità è che larghezza e conicità risultano minimi per valori di frequenza non estremi, bensì intermedi.

Per ciò che riguarda i laser UV, invece, sono significative le analisi di Li, Zheng, Lim, Chu e Li^[25]. La sorgente utilizzata è un cristallo Nd:YVO₄ impulsato (ordine dei

nanosecondi) con una lunghezza d'onda di 355 nm. I risultati dimostrano che laser di questo tipo forniscono prestazioni di taglio anche migliori dei classici laser a CO₂: la brevissima interazione permette infatti di ottenere HAZ molto ristrette (sotto i 50 µm) e pochissimi difetti delle superfici di taglio.

Particolarmente interessanti e completi sono poi gli studi effettuati sui parametri di processo nel taglio dei CFRP da parte di Riveiro, Quintero, Lusquiños, Del Val, Comesaña, Boutinguiza e Pou^[26]. La particolarità di questi test è l'utilizzo di un laser a CO₂ sia in modalità continua che impulsata, con un range di frequenza da 10 a 4000 Hz. La modalità continua produce un taglio con diverse imperfezioni, soprattutto protrusione delle fibre per vaporizzazione della matrice, a causa delle diverse temperature di degradazione dei due componenti: la resina si decompone infatti attorno ai 500°C, mentre le fibre di carbonio vaporizzano a 3300°C. Come è ormai noto, il regime continuo genera inoltre una HAZ piuttosto ampia, che risulta ulteriormente estesa se il taglio avviene perpendicolarmente alle fibre.

La potenza del laser sembra essere, per il funzionamento CW, il parametro fondamentale nella determinazione della qualità del taglio. In particolare, il kerf risulta minimo per valori intermedi (attorno ai 1000 W), mentre la conicità tende a calare lievemente all'aumentare della potenza. L'estensione della zona termicamente alterata invece ha, intuitivamente, una tendenza esattamente opposta. Il regime continuo si rivela dunque non adeguato per lavorazioni di alta qualità: la cessione di energia al pezzo è infatti eccessiva, e porta ad una distruzione della matrice con danni termici molto estesi. Il regime impulsato, d'altra parte, risulta molto più adatto e performante, ma solo con i corretti valori dei parametri di processo. E' infatti possibile diminuire la larghezza del solco di taglio mantenendo un duty cycle di valore intermedio, intorno al 50%: una percentuale troppo alta si avvicinerebbe infatti ad un funzionamento continuo (duty cycle 100%), mentre con una percentuale troppo bassa si avrebbe un taglio costituito da una serie di forature ripetute, e in entrambi i casi si otterrebbe un kerf molto ampio.

Altri effetti (molto più lievi) di riduzione del solco di taglio si possono ottenere aumentando la frequenza o riducendo l'energia degli impulsi. Anche la conicità del kerf è influenzata dai tre parametri sopracitati: si riesce infatti a ridurla se si aumenta la frequenza e/o si riducono l'energia di impulso e il duty cycle. Infine, l'estensione della HAZ risulta decisamente inferiore al caso continuo, ed in particolare è direttamente proporzionale al duty cycle. Un ultimo parametro che ha una influenza interessante sul taglio è la pressione del gas d'assistenza: riducendola si ottiene un kerf meno conico e più stretto all'ingresso.

3.3 ABLAZIONE

Come già detto in precedenza (v. § 3.2) i compositi sono materiali estremamente disomogenei, nei quali le fibre e la matrice reagiscono in modi completamente diversi all'energia che la radiazione laser porta con sé. Rispetto alle fibre, infatti, la matrice ha un coefficiente di assorbimento più elevato e conduttività/diffusività termiche alquanto più basse, nonché temperature di fusione/evaporazione nettamente inferiori. Ciò significa, dunque, che durante la lavorazione la matrice viene asportata per vaporizzazione (se termoplastica) o per degradazione (se termoindurente) a temperature molto più basse di quelle necessarie per danneggiare le fibre.

Questa osservazione conduce direttamente ad un ulteriore tipo di lavorazione, definita *fotodecomposizione ablativa* (oppure, più semplicemente, *foto-ablazione* o *ablazione*). Questo processo, in generale, consiste in una rimozione controllata di materiale da una superficie solida: se il flusso laser è basso il materiale vaporizza, mentre se il flusso è elevato interviene la formazione di plasma. Solitamente l'ablazione laser è svolta con sorgenti impulsate, ma è possibile eseguirla anche con laser continui (purché l'intensità sia sufficientemente elevata). La quantità di materiale asportata con un singolo impulso dipende dalla profondità a cui l'energia del fascio viene assorbita, la quale è a sua volta legata alle proprietà ottiche del materiale e alla lunghezza d'onda della radiazione.

I laser ultravioletti, ad esempio, grazie all'elevata energia dei fotoni sono particolarmente adatti per realizzare l'ablazione: l'interazione laser-pezzo che ne risulta, infatti, permette di rompere i legami atomici e/o molecolari, decomponendo il materiale con danni termici assai ridotti. Nel vicino infrarosso le proprietà di trasmissione della matrice sono troppo elevate, e il processo di ablazione risulterebbe molto difficile. Nel medio infrarosso la trasmissione invece cala bruscamente, ma l'alto rischio di danni termici renderebbe l'ablazione comunque ardua. La massa totale rimossa da un singolo impulso è definita *rateo di ablazione*.

L'ablazione può anche essere impiegata all'interno di un approccio di riparazione dei materiali compositi danneggiati^[28], in cui l'obiettivo primario è di ripristinare la resistenza e la rigidità originarie del componente. L'idea consiste, sostanzialmente, nel rimuovere per ablazione la porzione di materiale danneggiata (insieme ad una sufficiente area circostante) e sostituirla con materiale "nuovo". In realtà, a seconda del tipo di danno da riparare, si possono distinguere due differenti approcci: il primo consiste nel rimuovere per degradazione solamente la resina per poi iniettarne della nuova e sottoporla al processo di cura, mentre il secondo comporta la rimozione completa di matrice e fibre per generare una cavità in cui applicare poi una "toppa" formata da nuove lamine con stratificazione identica al materiale originale (fig. 3.2, comunemente definito *grooving*).

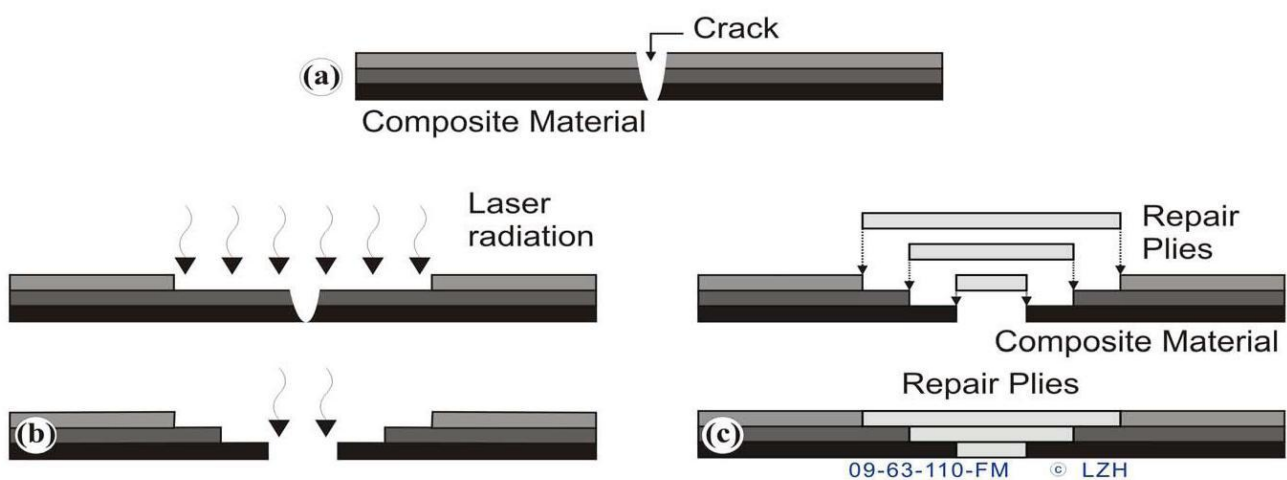


Figura 3.2: Schematizzazione del processo di riparazione mediante grooving di un composito^[33]

Il primo approccio è senza dubbio più semplice, ma permette riparazioni efficaci solamente nei casi in cui le fibre non siano danneggiate, cioè solo in caso di danni interlaminari. In questo caso lo svantaggio principale risiede nella difficoltà di asportare la matrice senza rovinare il rinforzo. Anche adottando il secondo approccio, tuttavia, si procede solitamente a rimuovere la resina dalle superfici della cavità lasciando scoperte le fibre, così da incrementare la superficie di legame e migliorare quindi la resistenza della giunzione. In questo secondo caso, il collegamento tra il materiale originale e quello sostituito è generalmente garantito dalla nuova resina, oppure da appositi adesivi strutturali. I principali svantaggi di questo tipo di riparazione sono la rimozione di una grande quantità di materiale (anche non danneggiato) e la difficoltà di eseguire eventuali riparazioni sul campo. Le prestazioni del legame dipendono in generale da diversi fattori^[28]: tipo di trattamento superficiale eseguito sull'area interessata, adesivo utilizzato, condizioni di cura e geometria della giunzione.

L'utilizzo del laser per la riparazione dei compositi permette una serie di vantaggi: la durata del processo scende fino a 12 ore (contro le circa 40 dei processi meccanici convenzionali), la precisione ottenibile è dell'ordine del micron, la rimozione selettiva della resina consente di migliorare la resistenza meccanica della giunzione, la lavorazione è molto flessibile e può essere facilmente automatizzata.

3.3.1 Letteratura Tecnica Riguardante l'Ablazione

Gli studi di Dittmar, Gäbler e Stute^[29] si sono concentrati sull'ablazione di CFRP e GFRP mediante un laser ultravioletto ($\lambda = 355$ nm) ad impulsi dell'ordine dei nanosecondi. Le prove riguardano differenti valori di sovrapposizione degli impulsi (*overlap*), al fine di verificarne l'effetto sulla qualità del risultato finale. In particolare, i valori utilizzati sono, nell'ordine: -50%, -25%, 0%, 25% e 50% (percentuali rispetto al diametro focale). Un valore negativo indica che la distanza tra due impulsi è maggiore del diametro dello spot, dunque non c'è sovrapposizione.

I risultati indicano innanzitutto che un overlap negativo, cioè con impulsi completamente separati, consente di impiegare meno tempo per la lavorazione. E' poi evidente che le fibre di vetro richiedono meno energia per essere rimosse rispetto a quelle di carbonio. Un'altra interessante conclusione è che con una fluenza elevata l'energia di impulso è direttamente proporzionale all'overlap, mentre con una fluenza bassa avviene l'opposto. Per ciò che riguarda il tasso di asportazione del materiale le fibre di vetro presentano, ovviamente, valori più elevati rispetto al carbonio. I CFRP, inoltre, possiedono una rugosità finale che rimane pressoché costante al variare dell'overlap, e con valori nettamente inferiori rispetto ai GFRP. Infine, mentre i compositi in fibra di carbonio non accusano problemi in alcun caso, quelli con fibre di vetro subiscono gravi danni termici se trattati con elevata fluenza e overlap superiore a 0% (fig. 3.3).

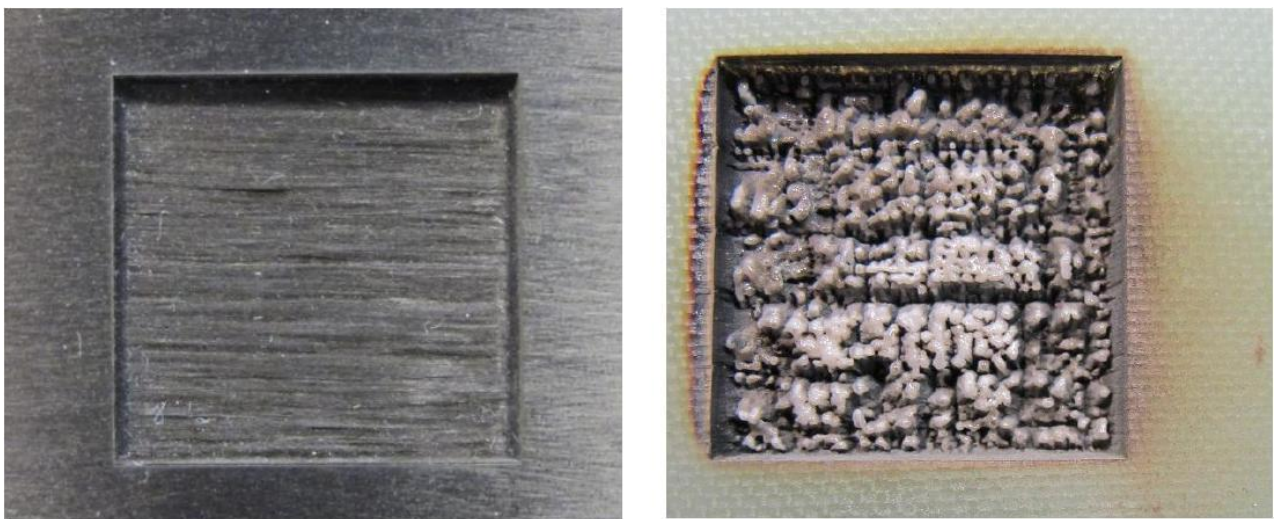


Figura 3.3: *Confronto tra CFRP (sinistra) e GFRP (destra) trattati con un overlap di 70% e fluenza elevata*^[29]

Moreno, Méndez, García, Arias e Roso^[30] si sono invece occupati di investigare la possibilità di impiegare un laser ad impulsi ultra-corti per realizzare l'ablazione di compositi in fibra di carbonio. L'aggettivo “ultra-corti” indica, convenzionalmente, impulsi con un range di durata tra il picosecondo (10^{-12} s) e il femtosecondo (10^{-15} s). In particolare, la sorgente impiegata è caratterizzata da una lunghezza d'onda di 795

nm ed è in grado di generare impulsi della durata di 120 fs. I tradizionali laser con impulsi al nanosecondo sono già molto performanti, ma utilizzando impulsi ancora più brevi si nota una completa assenza di danni termici o residui carbonizzati nell'intorno della zona lavorata. Rimangono tuttavia presenti alcuni difetti, in particolare ondulazioni delle superfici e porosità: non è chiaro se la causa di questi problemi sia effettivamente la lavorazione oppure no, ma la cosa certa è che non tutti i materiali testati li presentavano, il che significa che essi dipendono molto anche dal termoplastico impiegato. Un altro effetto osservato è che nel caso di polimeri a fibre il rinforzo rimane intatto in posizione durante la rimozione della matrice, mentre nei polimeri a particelle il rinforzo viene rimosso insieme alla matrice.

Particolarmente interessanti sono poi gli studi sull'impiego di impulsi ultra-corti (da 500 fs a 10 ps) su GFRP effettuati da Schilling, Lasagni e Klotzbach^[31]. Per valutare le diverse prestazioni al variare della lunghezza d'onda, sono state utilizzate tre differenti sorgenti appartenenti rispettivamente alle tre famiglie di emissione laser: infrarosso ($\lambda = 1064$ nm), visibile ($\lambda = 532$ nm, luce verde) e ultravioletto ($\lambda = 355$ nm). Prima di tutto, come in effetti ci si aspetterebbe, il funzionamento a 500 fs produce una zona termicamente alterata sensibilmente più stretta rispetto agli impulsi a 10 ps, e ciò indipendentemente dalla lunghezza d'onda impiegata. In secondo luogo, il rateo di ablazione risulta palesemente influenzato da tre parametri: esso infatti aumenta con la densità di energia e con la lunghezza d'onda, mentre si riduce se aumenta la durata di impulso. Ciò significa che impulsi più brevi, oltre a produrre meno danni, realizzano anche una velocità di asportazione maggiore.

Inoltre, questi risultati indicano anche che il laser IR garantisce il tasso di rimozione più elevato, mentre il laser UV fornisce i valori più bassi. In realtà, si possono distinguere due meccanismi di ablazione differenti: il "tipo 1" con rimozione della sola matrice, oppure il "tipo 2" con asportazione congiunta di fibre e matrice. Anche nel caso di ablazione di tipo 2, però, la matrice è sempre il primo materiale ad essere rimosso. L'elevata energia rilasciata dalla radiazione infrarossa causa sul materiale un

effetto così violento da produrre sempre il secondo tipo di ablazione. Questo comportamento può emergere anche con il laser verde o ultravioletto, ma solo se gli impulsi sono lunghi e molto ravvicinati e la fluenza è mantenuta molto elevata.

Alcune analisi sull'utilizzo di laser a eccimeri ($\lambda = 248$ nm e impulsi di 30 ns) sono invece state condotte da Bénard, Fois, Grisel e Laurens^[32]. Un laser con queste caratteristiche permette la rimozione selettiva della matrice senza alcuna degradazione delle fibre, ma per fare questo è necessario scegliere attentamente una fluenza che sia superiore alla soglia di ablazione del polimero (circa 40 mJ/cm^2), ma contemporaneamente inferiore a quella del rinforzo (oltre i 400 mJ/cm^2). I risultati indicano chiaramente che la profondità di ablazione aumenta con la fluenza e il numero degli impulsi, dunque è possibile realizzare una ablazione graduale del polimero incrementando il numero di impulsi a fluenza costante: fino a circa 40 impulsi la rimozione di materiale procede a rugosità costante e pari a quella del composito non trattato, ma al disopra di questa soglia la rugosità aumenta col numero di impulsi. Se invece si aumenta la fluenza si ottiene l'ablazione completa del polimero, con la protrusione delle fibre e un incremento di rugosità fino a 20 volte il valore del materiale non lavorato (ma sempre senza danni al rinforzo).

Per quanto riguarda invece la riparazione dei CFRP mediante laser ultravioletto impulsato ($\lambda = 355$ nm e impulsi di 30 ns), sono stati svolti alcuni studi da Völkermeier, Fischer, Stute e Kracht^[33]. La prima cosa che si nota è che sia il rateo di ablazione della matrice che quello del rinforzo hanno una proporzionalità lineare rispetto alla fluenza del laser, sebbene il valore di soglia necessario per rimuovere le fibre sia quasi due ordini di grandezza maggiore rispetto a quello della resina.

In secondo luogo, risulta evidente che la profondità di ablazione aumenta con il numero di cicli di lavoro (per ovvie ragioni), ed è inversamente proporzionale alla distanza tra le linee tracciate dal fascio durante la lavorazione (poiché una riduzione di questa distanza comporta un aumento di densità energetica e quindi maggiore

asportazione). Si è poi chiaramente dimostrato che con questo tipo di laser è possibile ottenere una rimozione selettiva della sola matrice, in modo molto preciso ed anche nei microscopici spazi tra le fibre, senza il minimo danno per queste ultime. In conclusione, i test di resistenza effettuati mostrano che i provini riparati possiedono praticamente le stesse proprietà meccaniche di quelli non riparati di riferimento, evidenziando quindi le grandi potenzialità di questo nuovo approccio.

Anche Fischer, Romoli e Kling^[34] si sono occupati della riparazione di CFRP mediante radiazioni ultraviolette ad impulsi di 15 – 50 ns. Le evidenze mostrano che la profondità di ablazione della matrice varia linearmente con la densità di energia, mentre la profondità di ablazione delle fibre ha una proporzionalità meno che lineare e (come ci si attende) un valore di soglia maggiore di circa due ordini di grandezza. La profondità di ablazione è inoltre legata alla distanza tra le linee tracciate dal fascio sulla superficie durante la lavorazione: in particolare, essa si riduce all'aumentare di questa distanza in maniera approssimativamente iperbolica e non lineare.

3.4 SALDATURA

I materiali compositi possono anche essere sottoposti a saldatura. La saldatura laser è un processo molto utilizzato per unire componenti, ed è già impiegato in molte applicazioni industriali per merito della sua accuratezza, flessibilità e qualità delle giunzioni risultanti, e grazie anche alla interessante possibilità di realizzare saldature per trasparenza¹⁵. Nel caso dei compositi, il processo è più propriamente definito *bonding*, e presenta alcune differenze sostanziali rispetto al tradizionale concetto di saldatura a cui si è abituati nel caso dei metalli.

¹⁵ La *saldatura per trasparenza* è un procedimento di giunzione possibile solo con tecnologie non convenzionali, nel quale i lembi da unire sono sovrapposti e la zona di saldatura non è accessibile. L'azione riscaldante deve essere in grado di attraversare il primo dei due materiali, e dovrà essere bloccata ed assorbita dal secondo. La descrizione di questo tipo di saldatura è ripresa anche più avanti nel paragrafo.

Innanzitutto, siccome per realizzare il legame deve avvenire una fusione e risolidificazione del materiale, è evidente che solo la matrice può partecipare al processo, mentre le fibre rimangono completamente inalterate ed al loro posto. L'applicabilità della saldatura laser dipende quindi dalle proprietà ottiche della matrice polimerica nei confronti della lunghezza d'onda impiegata, specialmente per quanto riguarda assorbimento e trasmissione della radiazione. Nella maggior parte dei casi, uno dei due materiali è trasparente alla radiazione laser utilizzata, mentre l'altro è in grado di assorbirla (fig. 3.4). Durante il processo, il fascio laser è trasmesso attraverso il mezzo trasparente e totalmente assorbito dall'altro: all'interno di quest'ultimo l'energia viene convertita in calore, il quale riscalda poi per conduzione anche il materiale trasparente. La fusione all'interfaccia, seguita da un raffreddamento sotto pressione, permette l'unione definitiva dei due componenti.

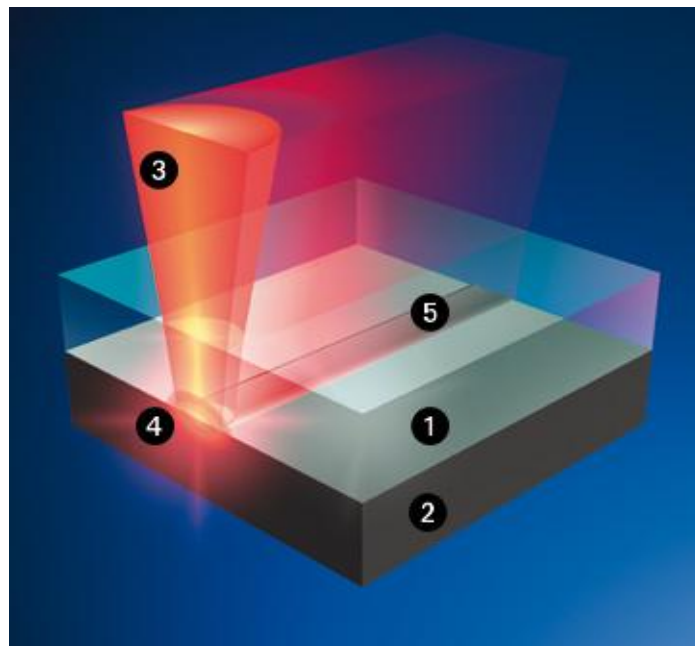


Figura 3.4: Saldatura laser per trasparenza: 1) materiale trasparente alla radiazione , 2) materiale assorbente , 3) fascio laser , 4) spot focale , 5) cordone di saldatura

Poiché il legame avviene esclusivamente attraverso la matrice, risulta ovvio che le proprietà meccaniche della saldatura non saranno mai paragonabili a quelle del materiale composito di base. Inoltre, come detto, è sempre richiesta una fusione e

risolidificazione della matrice, e ciò significa che il processo di saldatura è limitato esclusivamente ai soli materiali termoplastici, escludendo completamente i compositi a matrice termoindurente. Poiché i compositi utilizzati in questa tesi sono proprio CFRP a matrice termoindurente (epossidica), nessuna delle prove sperimentali eseguite riguarda la saldatura.

In ogni caso, sfruttando il principio spiegato è anche possibile unire, senza l'ausilio di adesivi, un composito a matrice termoplastica ad un materiale diverso, come ad esempio un metallo o un composito termoindurente. Molti termoplastici sono trasparenti alle radiazioni del vicino infrarosso, e ciò rende i laser Nd:YAG e a diodi (con λ rispettivamente pari a 1064 e 940 nm) particolarmente adatti per questo genere di applicazioni. E' necessario ora dare informazioni più dettagliate sugli studi effettuati sulla saldatura degli FRP mediante fasci laser.

3.4.1 Letteratura Tecnica Riguardante la Saldatura

Per quanto riguarda l'unione tra compositi a matrice termoplastica, sono significativi gli studi compiuti da Knapp, Clement, Franz, Oumarou e Renard^[35]. Il laser impiegato è del tipo a diodi ($\lambda = 940$ nm), e i compositi sono costituiti da fibre di vetro in matrice di polipropilene e poliammide. I risultati indicano innanzitutto che la densità e l'orientazione delle fibre influiscono sulla trasmissione del calore all'interno del materiale: esso si propaga infatti facilmente in direzione delle fibre, ma con molta fatica in direzione ortogonale. Dal punto di vista microstrutturale, la zona saldata si rivela del tutto simile al materiale base, ad eccezione ovviamente della totale assenza di fibre che la attraversano perpendicolarmente. La qualità della zona trattata è estremamente dipendente dal contenuto volumetrico di fibre: una buona saldatura si ottiene solo in virtù di una certa trasparenza del materiale, dunque con una densità di fibre relativamente bassa.

Amend, Frick e Schmidt^[36] si sono invece occupati di investigare la possibilità di unione tra un composito termoplastico e un composito termoindurente. In questo

caso, però, prima di realizzare l'unione è necessario effettuare un trattamento superficiale del termoindurente, così da garantire una interfaccia ottimale e generare un legame che offra la maggiore resistenza possibile. Questo trattamento consiste in una vera e propria ablazione del materiale, e l'idea è di eseguire anche questa lavorazione impiegando la tecnologia laser, in particolare valutando le differenze tra un laser IR ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) e un laser UV ($\lambda = 355 \text{ nm}$). Le radiazioni infrarosse rimuovono poco materiale e servono dunque molte passate per riuscire a realizzare la superficie voluta, ma così facendo si produce anche una indesiderata ablazione delle fibre. La radiazione ultravioletta riesce invece a rimuovere subito grandi quantità di resina, senza rischiare di danneggiare le fibre. La differenza di comportamento è legata al diverso assorbimento del fascio da parte del materiale: le resine epossidiche assorbono infatti le radiazioni UV molto più facilmente delle radiazioni IR.

La saldatura vera e propria è invece affidata ad un laser a diodi ($\lambda = 940 \text{ nm}$) con diametro focale di 1 mm. I componenti sono mantenuti sotto pressione costante, e si impiega una tecnica multi-passata per riscaldare il termoplastico in maniera uniforme e quasi-simultanea. Il trattamento con laser ultravioletto dà origine ad una interfaccia molto più pulita ed uniforme rispetto al laser infrarosso, ma la resistenza del legame risultante è quasi analoga. Ciò che cambia visibilmente è la modalità di rottura che interviene in caso di cedimento della giunzione: nel caso del trattamento IR l'interfaccia rimane intatta e la rottura avviene sempre nel materiale termoplastico, mentre con il trattamento UV è sempre l'interfaccia a cedere per prima.

Questo significa che una rottura "material-friendly", che riesca approssimativamente a preservare l'integrità dei singoli componenti, è ottenibile solamente in caso di ablazione con laser ultravioletto. D'altra parte, l'ablazione con infrarossi garantisce resistenze lievemente superiori: ciò accade perché i residui carbonizzati di fibre e matrice presenti in questo caso permettono di incrementare la superficie di adesione e migliorano l'*interlock*, ossia l'incastro tra le superfici irregolari. Infine si osserva molto chiaramente che, se il termoplastico impiegato è rinforzato con fibre di qualche tipo, la resistenza della saldatura può aumentare sensibilmente.

Un'altra idea interessante è quella investigata da Amend, Pillach, Frick e Schmidt^[37], consistente nella giunzione di due compositi termoindurenti (rinforzati con fibre di vetro) mediante l'impiego di uno strato intermedio termoplastico. Il principio è sempre lo stesso, ma in questo caso deve essere applicato due volte: prima si salda il termoplastico ad uno dei GFRP, e successivamente si ripete il processo con l'altro (sempre applicando una pressione costante). La lavorazione è svolta mediante un laser a diodi ($\lambda = 940 \text{ nm}$) e il termoplastico utilizzato è "arricchito" con particelle di carbonio. Poiché il termoplastico (l'unico materiale che fonde nel processo) si trova racchiuso tra gli altri due compositi, ne consegue che saranno i termoindurenti a dover essere trasparenti alla radiazione impiegata.

La differenza tra la saldatura dei GFRP rispetto ai CFRP è che per i primi non è necessario alcun trattamento superficiale di preparazione. Testando differenti tipologie di termoplastici risulta innanzitutto che il contenuto di carbonio influenza la resistenza della giunzione, e in particolare il valore massimo viene raggiunto con un contenuto di circa 1 – 2%. Questo accade perché una bassa percentuale di carbonio permette una maggiore penetrazione del fascio laser e dunque un più omogeneo riscaldamento del materiale, mentre con percentuali troppo alte il calore rimane concentrato sulla superficie e degrada il polimero.

Anche una aggiunta di fibre di vetro al termoplastico può migliorare la resistenza della saldatura, non solo in virtù delle migliori proprietà meccaniche del rinforzo, ma anche perché la presenza delle fibre migliora il contatto meccanico tra le superfici dei componenti. Gli esperimenti mostrano poi che una superficie con micro-rugosità, rispetto ad una con rilievi realizzati artificialmente, riesce ad originare un legame molto più resistente: ciò è possibile poiché le micro-rugosità incrementano molto l'area effettiva di legame. In conclusione, con questo processo si possono ottenere valori di resistenza della giunzione da 10.6 a 13.1 MPa, cioè esattamente paragonabili a quelli raggiunti dai migliori incollaggi a caldo convenzionali (10 – 15 MPa).

CAPITOLO 4

ORGANIZZAZIONE DEL PIANO DI LAVORO

4.1 SCOPO DELLA TESI

L'attività sperimentale presentata in questa tesi è stata interamente svolta a Bologna, presso i laboratori della Facoltà di Ingegneria. La prima parte dell'attività ha previsto una caratterizzazione della modalità di interazione tra fascio laser e materiale CFRP tramite l'esecuzione sia di prove di taglio (quindi asportazione sia di fibre che di matrice) che di ablazione (cioè asportazione della sola resina). Tali prove sono state eseguite impiegando due sorgenti laser differenti sia per potenza erogata (20 W e 1000 W) sia per regime di funzionamento (impulsato e continuo), ma di pari lunghezza d'onda della radiazione emessa (1064 nm).

Successivamente, a seguito dei differenti risultati ottenuti per le due lavorazioni (ed anche in base al loro diverso interesse applicativo), si è deciso di incentrare l'attività sperimentale esclusivamente sulla ablazione. Questo poiché essa, a differenza del taglio, è ancora una lavorazione piuttosto “nuova” e soggetta a problematiche complesse, ed in quanto tale non ancora consolidata all'interno del panorama tecnologico illustrato nel capitolo precedente (e quindi scarsamente presente nella letteratura tecnica).

L'estrema anisotropia dei compositi, infatti, introduce nel processo una quantità di variabili difficilmente calcolabile, molte delle quali attualmente non controllabili o addirittura non ancora note. L'idea alla base del lavoro qui presentato è stata, in particolare, quella di ottenere una ablazione della resina che raggiungesse la maggiore profondità possibile, sperando eventualmente di ottenerne la completa

rimozione attraverso tutto lo spessore del laminato, e tentando allo stesso tempo di lasciare il più possibile intatte le fibre. Come già accennato (v. § 3.3), ciò potrebbe risultare estremamente utile in un'ottica di *laser-based composite repair*, ossia di riparazione dei compositi per mezzo di un fascio laser.

Talvolta, un componente in composito può infatti subire danneggiamenti che coinvolgono esclusivamente la resina e non intaccano minimamente le fibre, come ad esempio fratture interlaminari o delaminazioni. In situazioni del genere, poiché le proprietà meccaniche del rinforzo non sono compromesse, sarebbe conveniente riparare il materiale piuttosto che sostituire per intero il componente. A questo scopo la matrice (anche se termoindurente) può essere rimossa dalla zona interessata causandone la vaporizzazione: ciò è possibile solo impiegando una radiazione ad alta energia, come appunto il laser. Una volta asportato localmente il polimero e lasciate “libere” le fibre, si conclude la riparazione iniettando nuova resina mediante aspirazione sotto vuoto, e infine ripetendo il processo di cura del composito.

Dal punto di vista teorico, una rimozione della matrice che non rovini le fibre può sembrare un procedimento piuttosto semplice: in virtù della notevole differenza tra le temperature nominali di degrado delle due componenti (400 – 450°C circa per la resina epossidica contro più di 3000°C per le fibre di carbonio), sarebbe sufficiente mantenere le condizioni di processo ad un livello intermedio per assicurare l'effetto desiderato. Purtroppo realizzare tutto ciò potrebbe non essere affatto facile, per diversi motivi:

- La distribuzione di potenza del fascio sulla superficie di lavoro non è uniforme, e ciò dà origine a gradienti di temperatura molto elevati nella zona trattata. Dunque ci si può aspettare, anche a potenze non elevate, il rischio di rovinare le fibre dove l'incremento di temperatura risulta notevole, oppure di non rimuovere correttamente la matrice dove esso è ridotto (o, nel caso peggiore, entrambe le cose). Questi fattori tendono ad accentuarsi all'aumentare della percentuale di defocalizzazione del fascio;

- La traiettoria del laser rispetto al campione ha, con tutta probabilità, una influenza di tipo termico: al momento dell'ingresso del fascio sul campione esso sarà ancora freddo e potrebbe opporre più resistenza ad essere trattato in profondità, mentre all'uscita del fascio il materiale si sarà ormai riscaldato e la lavorazione potrebbe riuscire a raggiungere profondità maggiori;
- Se anche si riuscisse a limitare i primi due aspetti, permarrrebbe comunque la difficoltà di assicurare per tutta la durata del processo una temperatura compresa nell'intervallo adeguato. Come detto, infatti, il campione si riscalda durante l'azione del fascio e il comportamento del materiale potrebbe cambiare (in termini di coefficiente di assorbimento della radiazione incidente), dando quindi origine ad una lavorazione non uniforme;
- Le temperature di degrado sopracitate relative a matrice e rinforzo sono, come specificato, “valori nominali”: ciò che plausibilmente avverrà nelle condizioni reali di lavoro sarà che entrambe le componenti inizieranno a deteriorarsi ben prima delle soglie indicate, e dunque anche temperature non particolarmente elevate potrebbero rivelarsi critiche per il danneggiamento delle fibre;
- Sebbene l'energia della radiazione diffonda nel materiale in ogni direzione, l'effetto ablativo attraverso lo spessore del laminato sarà completamente differente rispetto all'effetto in direzione laterale. Procedendo a rimuovere la resina in profondità la rimozione stessa diventa infatti sempre più difficile, a causa dell'effetto schermante delle fibre che vengono man mano “liberate” e che rimangono in posizione. Di conseguenza, per raggiungere una profondità prefissata potrebbe essere necessario aumentare la potenza, con il rischio di danneggiare le fibre stesse;
- Infine, l'eventuale presenza di un flusso di gas d'assistenza nella zona di lavoro può avere, di nuovo, una certa influenza a seconda di portata, pressione e natura chimica

del gas (reattivo od inerte). Ad esempio, una portata elevata potrebbe ridurre la profondità raggiunta a causa del raffreddamento indotto, mentre un raffreddamento ridotto o assente incrementerebbe la temperatura del campione, producendo dunque una maggiore ablazione ma anche maggiori danni alle fibre.

Tutti questi effetti costituiscono interessanti indicazioni su ciò che potrebbe rendere difficile l'ottenimento di una lavorazione ottimale. Tuttavia questi non sono dati di fatto completamente associati, bensì sono solamente alcune ipotesi di fenomeni che potrebbero accadere: alcune già verificate in qualche occasione rintracciabile in letteratura, mentre altre solo probabili o incerte.

Obiettivo fondamentale dello studio qui presentato è stato, perciò, quello di analizzare l'influenza dei differenti parametri di processo sulla lavorazione, nonché di verificare la presenza o meno dei fenomeni citati e l'entità dei loro eventuali effetti sulla qualità dei risultati. Naturalmente, il fine ultimo di esperienze come questa è sempre l'individuazione di eventuali condizioni ottimali di lavoro, che permettano di realizzare una asportazione della resina senza compromettere in alcun modo le proprietà meccaniche del rinforzo fibroso.

Nel prosieguo di questo capitolo verrà illustrata l'organizzazione del piano di lavoro, soffermandosi prima di tutto sulle specifiche dei materiali testati e sui dettagli delle attrezzature impiegate, per poi spiegare estesamente tutte le procedure di lavorazione, trattamento ed osservazione dei provini.

4.2 MATERIALE UTILIZZATO

L'attività sperimentale non ha riguardato un studio generalizzato degli effetti dei laser su differenti materiali, bensì è stata rivolta ad una precisa categoria di compositi. In particolare, tutte le prove sono state effettuate su campioni in CFRP, ossia materiale composito con rinforzo in fibra di carbonio e matrice in resina epossidica.

Il rinforzo è costituito da un tessuto preconfezionato di tipo *plain weave* (v. § 1.6.1), dunque con un intreccio completo tra le fibre di trama e quelle di ordito, il che conferisce maggiore resistenza ma ridotta capacità di realizzare forme complesse. In ogni caso i provini realizzati sono tutti piani, dunque quest'ultimo aspetto non rappresenta affatto un problema. Il tessuto utilizzato è identificato dalla sigla *GG 204 P*, ed è prodotto da *G. ANGELONI srl* (v. Appendice A per i dati tecnici completi). Lo spessore del singolo foglio è di 0.16 mm e la densità risulta essere pari a 220 g/m². La tessitura è di tipo bilanciato, cioè identica nelle due direzioni, con fibre *HR 3K 200 TEX* con distribuzione di 110 g/m².

La matrice è costituita da una resina epossidica modificata. Il sistema combinato resina-catalizzatore è identificato dalla sigla *IMP 505 L*, ed è prodotto da *IMPREGNATEX COMPOSITI srl* (v. Appendice B per i dati tecnici completi). La resina è caratterizzata da elevate caratteristiche meccaniche, adesività intermedia e ottimo *flow* (capacità di fluire). Il ciclo di cura può essere effettuato a temperature comprese fra 100 e 150°C. Come mostrato in tab. 4.1, la temperatura di transizione vetrosa (T_g) è strettamente legata alla temperatura alla quale viene effettuato ciclo di cura e alla durata dello stesso. Questa resina conserva le sue caratteristiche per circa 12 mesi se conservata a -18°C, ma solamente per 4 settimane se conservata a temperatura ambiente (attorno a 23°C).

Temperatura di Cura	Tempo	T_g °C (°F)
120°C (248°F)	1 ora	120 – 130 (248 – 266)
130°C (266°F)	1 ora	127 – 135 (260 – 275)
150°C (302°F)	10 minuti	130 – 135 (266 – 275)
130°C (266°F)	2 ore	140 – 150 (284 – 302)

Tabella 4.1: *Temperature di transizione vetrosa in funzione del ciclo di cura per PW*

I campioni per le prove sono tutti costituiti da 10 strati identici di tessuto (lamine), dunque secondo la nomenclatura di uso comune per i laminati possono essere indicati come segue (v. Appendice C per una nota esplicativa sulla nomenclatura dei laminati):

$$PW [0 / 90]_{5s}$$

I provini sono stati quindi realizzati utilizzando un preimpregnato con le caratteristiche descritte, e sottoponendo poi il materiale ad un ciclo di cura all'interno di una autoclave. Il ciclo impiegato, costituito da ben precisi andamenti di pressione e temperatura, è riportato in fig. 4.1. I dettagli sulle dimensioni dei provini impiegati saranno forniti più avanti nel testo.

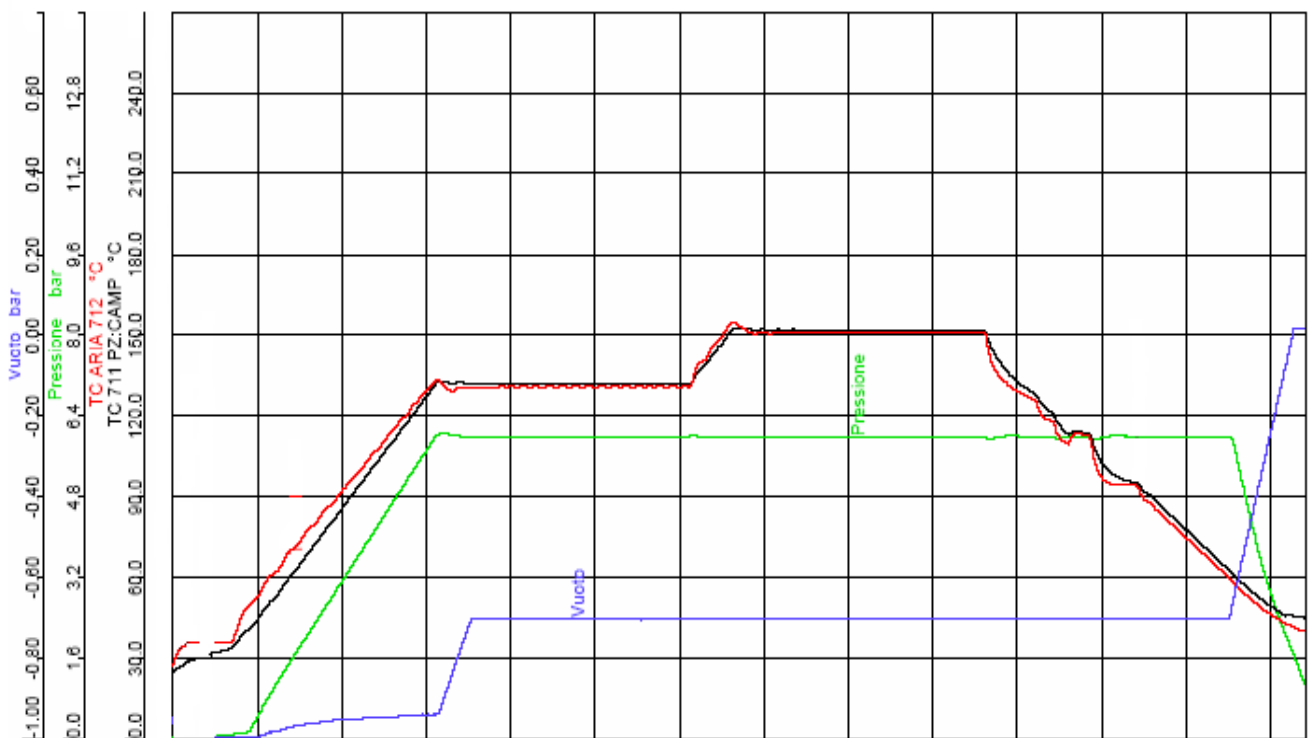


Figura 4.1: *Ciclo di cura a cui è stato sottoposto il composito utilizzato*

4.3 ATTREZZATURE IMPIEGATE

Tutte le prove presentate all'interno di questa trattazione sono state eseguite con le due sorgenti laser disponibili nei laboratori della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna.

Il primo è un laser in fibra Yb-YAG di 20 W di potenza media, con una lunghezza d'onda di 1064 nm (vicino infrarosso), funzionante in regime impulsato e in grado di generare impulsi con durate dell'ordine dei nanosecondi. Questa sorgente è stata utilizzata esclusivamente per le prove preliminari di taglio: l'elevata energia che il funzionamento impulsato permette di fornire al materiale, infatti, la rende particolarmente adatta per lavorazioni caratterizzate da ridotte dimensioni ma elevate profondità. L'impiego di questa macchina è poi stato abbandonato in seguito alla decisione di dedicarsi solamente all'ablazione della resina, pertanto non verranno qui esposti i dettagli tecnici di questo laser.

La seconda sorgente impiegata è invece di tipo Nd-YAG a stato solido, avente anch'essa una lunghezza d'onda di 1064 nm (vicino infrarosso), ma funzionante in regime continuo. In particolare questo laser è un modello TRUMPF HAAS-LASER HL 1003 D (fig. 4.2), dotato di sistema di pompaggio a lampada e capace di erogare una potenza massima di 1000 W. Esso è dotato di una lente di focalizzazione da 150 mm, un collimatore da 200 mm e una fibra ottica per il trasporto del fascio con un diametro di 300 μm . In una macchina di questo tipo la testa di lavoro ha una posizione regolabile sull'asse verticale ma fissa sul piano orizzontale, mentre la movimentazione viene eseguita sul campione ed è affidata ad una tavola a controllo numerico con sistema di riferimento cartesiano. La corsa massima consentita è di 40 cm nelle tre direzioni, e la velocità massima di spostamento può giungere fino a 10 m/min.



Figura 4.2: Sorgente laser impiegata nell'attività sperimentale

Come detto più volte in precedenza, i laser impulsati sono considerati più adatti per lavorare i compositi, poiché riescono a fornire potenze di picco molto più elevate (a parità di potenza media), pur interagendo con il materiale per tempi molto ridotti. In tal modo la cessione di energia risulta estremamente localizzata, la densità di potenza è molto elevata e sia le fibre che la matrice vaporizzano rapidamente allontanandosi dalla zona di lavoro. Così facendo asportano notevoli quantità di calore, evitando che quest'ultimo diffonda nel materiale producendo ampie zone termicamente alterate. Queste sorgenti risultano dunque particolarmente convenienti nel caso di operazioni di taglio o, più in generale, in tutte quelle lavorazioni che richiedono la rimozione congiunta di fibre e resina senza provocare eccessivi danni termici.

Nell'esperienza qui esposta è stato però impiegato un laser appartenente alla famiglia dei continui, nonostante essi siano solitamente sconsigliati proprio a causa degli elevati tempi di interazione e dei valori di densità di energia relativamente bassi che comportano. Tuttavia la scelta è stata fatta proprio per questo stesso motivo, in virtù del tipo di lavorazione da effettuare. Come già ampiamente spiegato, infatti, lo scopo

della ablazione è di rimuovere il maggiore quantitativo possibile di matrice senza danneggiare il rinforzo: ciò richiede, intuitivamente, di distribuire il calore nel materiale in maniera più diffusa e senza concentrarlo troppo (cioè l'esatto opposto di quanto detto per i laser ad impulsi). L'obiettivo è proprio quello di generare zone termicamente alterate molto ampie ma con danneggiamento non eccessivo, in cui sia stata asportata la resina ma lasciate intatte le fibre. Da questo punto di vista, i laser in regime continuo possono perciò rivelarsi una scelta interessante.

All'interno di questo discorso, lo spot del laser svolge un ruolo assolutamente determinante. Il diametro minimo teoricamente raggiungibile dalla macchina è 225 μm , ma in tutte le prove effettuate non ci si è mai nemmeno avvicinati a tale valore: con uno spot focale di dimensioni tradizionali la densità di potenza sarebbe infatti troppo elevata e finirebbe per danneggiare matrice e rinforzo, mentre con un fascio defocalizzato (con diametri dell'ordine dei mm) si può sperare di degradare la resina termoindurente senza nuocere alle fibre. In fig. 4.3 è mostrato un grafico che esprime, per la specifica sorgente laser utilizzata, la dimensione dello spot di focalizzazione ottenibile in base alla distanza della testa di lavoro dalla superficie del campione.

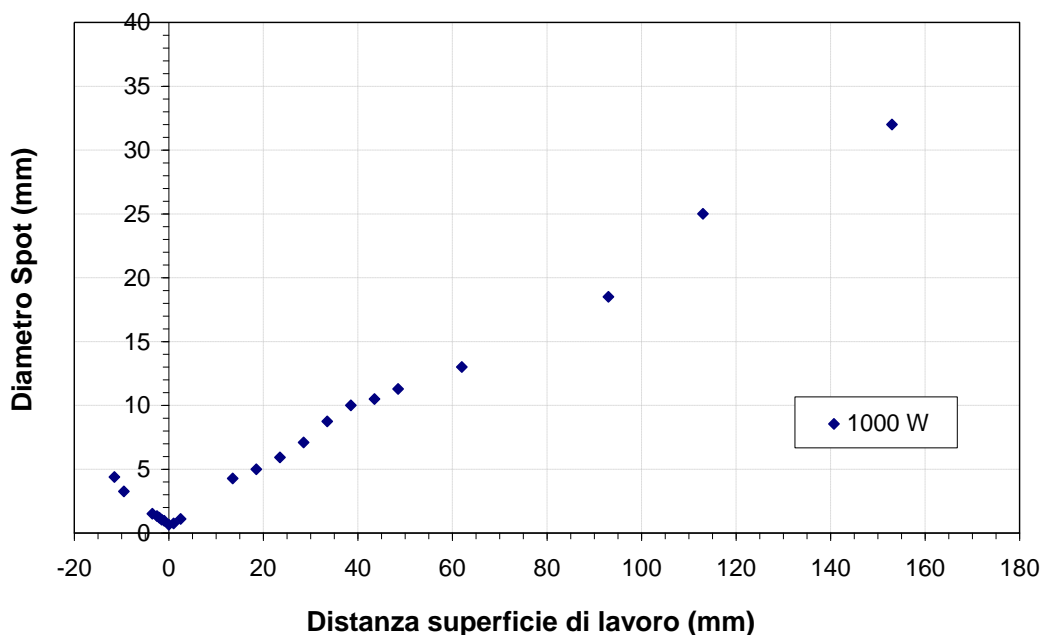


Figura 4.3: *Variazione del diametro dello spot in base alla distanza dal piano di lavoro*

4.4 PROCEDURA DI LAVORO

Come già detto in precedenza (v. § 4.1), l'intero lavoro sperimentale inserito in questa tesi è stato svolto presso i laboratori della Facoltà di Ingegneria di Bologna. Di seguito nel testo saranno illustrate nei dettagli tutte le fasi in cui si è articolata l'attività svolta, dall'ottenimento dei provini fino alle modalità di osservazione e misura dei risultati, passando naturalmente per il processo di lavorazione vero e proprio. E' doveroso premettere che l'intera procedura è stata ripetuta in modo assolutamente identico per tutti i provini studiati: per evitare ripetizioni inutili, dunque, l'intera trattazione sarà riferita ad un caso generico, senza particolari riferimenti a provini specifici (se non quando risulti indispensabile).

4.4.1 Produzione dei Provini

Le prove sono state condotte su campioni piani rettangolari tutti uguali tra loro, di dimensioni 100 x 23 mm e con spessore pari a 2.2 mm (fig. 4.4).



Figura 4.4: *Geometria dei campioni utilizzati per le prove*

Tutti i provini sono stati in realtà ricavati tagliando lastre di CFRP di dimensioni maggiori (150 x 100 mm). Il composito in fibra di carbonio è un materiale notoriamente rigido e fragile, perciò per il taglio risulta necessario l'impiego di strumenti con elevate velocità di rotazione, piccoli avanzamenti e ridotti tassi di asportazione. In particolare, lo strumento impiegato nell'attività qui presentata è un semplice disco diamantato (fig. 4.5). Questo tipo di attrezzo viene spesso impropriamente chiamato “sega circolare”, ma si tratta tecnicamente di una troncatrice metallografica (ossia una sottile mola diamantata), dunque un utensile abrasivo piuttosto che tagliente. Questa attrezzatura è anche dotata di un flusso d'acqua di raffreddamento, necessario per evitare il surriscaldamento del pezzo e dell'utensile durante l'utilizzo.



Figura 4.5: *Troncatrice metallografica utilizzata per il taglio dei provini*

Il grande vantaggio delle troncatrici rispetto ai tradizionali utensili da taglio è di non produrre alcun tipo di azione “violenta” sulle superfici del pezzo, e ciò risulta

particolarmente importante nel caso dei compositi, per evitare di strappare le fibre dalla loro sede facendole protrudere e per non creare danni o fratture interlaminari. I campioni così ottenuti non necessitano quindi di alcuna lavorazione aggiuntiva di sbavatura, e sono pronti per essere sottoposti al processo di ablazione.

4.4.2 Modalità di Esecuzione del Processo

Come si può intuire dall'immagine presentata in precedenza (fig. 4.2), la macchina laser possiede una cabina chiusa dotata di vetro schermato all'interno della quale sono contenute la sorgente e il sistema cartesiano di movimentazione a controllo numerico del pezzo. L'interno della cabina, insieme alla configurazione completa delle attrezzature utilizzate per la lavorazione (il cosiddetto *set-up*) è invece mostrato in fig. 4.6.

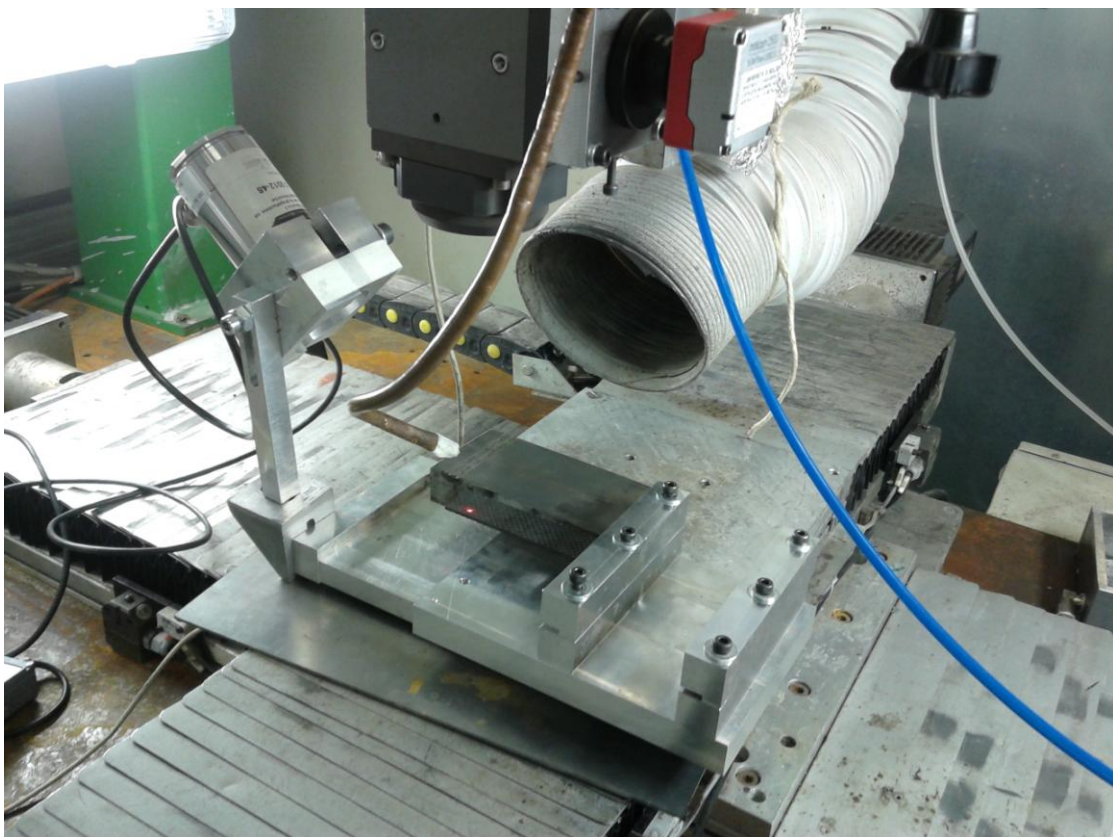


Figura 4.6: *Set-up delle attrezzature pronte per la lavorazione*

La cabina è dotata innanzitutto di un sistema di aspirazione (il grosso tubo sospeso nella parte posteriore della cabina), mantenuto sempre attivo durante tutte le prove di ablazione eseguite a causa della pericolosità e del forte odore tipicamente generato dalla vaporizzazione della resina epossidica. Il provino è riferito e fissato grazie ad un dispositivo porta-campione universale (dunque non appositamente progettato). Nella parte superiore dell'immagine si vede invece chiaramente la testa di lavoro del laser, sulla quale è inserita anche una telecamera: questa, grazie alle ottiche presenti, è perfettamente allineata con il fascio laser, e viene utilizzata per riferire in maniera precisa il campione rispetto allo spot di incidenza della radiazione.

Sulla sinistra dell'immagine è possibile vedere un pirometro, ossia un sensore termico in grado di misurare con precisione la temperatura rilevando le radiazioni infrarosse generate naturalmente dalla lavorazione. Esso possiede due puntatori laser affiancati, tra i quali può effettuare le misurazioni in termini di valore medio o massimo. Il pirometro è fissato al piano di lavoro, perciò segue il provino nel movimento ed è costantemente puntato sempre in una posizione al centro del solco di ablazione.

Al centro, sopra al campione, si può notare inoltre un sottile tubo nel quale scorre un getto di aria compressa. La funzione primaria di questo flusso è quella di realizzare la cosiddetta *copertura*, ossia la protezione della zona di lavoro dall'ambiente circostante. In secondo luogo, l'aria agisce senza dubbio in associazione con l'impianto di aspirazione nell'evacuare fumi e polveri dall'interno della cabina. Infine, non è certo se l'aria possa avere o meno anche un effetto di raffreddamento del materiale, e in tal caso quale sia l'entità di questa influenza. Questo costituisce perciò uno degli aspetti che senza dubbio è necessario investigare.

Appare chiaro, da quanto detto in precedenza, che le dimensioni dei provini sono tali per cui su ciascuno di essi è possibile realizzare numerose lavorazioni di ablazione differenti (di norma da un minimo di 3 ad un massimo di 6 a seconda della larghezza dei solchi prodotti, fig. 4.7). Anche se i campioni impiegati sono tutti identici, quindi, in realtà la loro geometria non è tecnicamente molto rilevante. Come si può notare le

prove sono state eseguite lungo la direzione del lato corto, in modo da effettuare il maggior numero possibile di operazioni su ciascun provino, evitando così di sprecare inutilmente materiale prezioso.

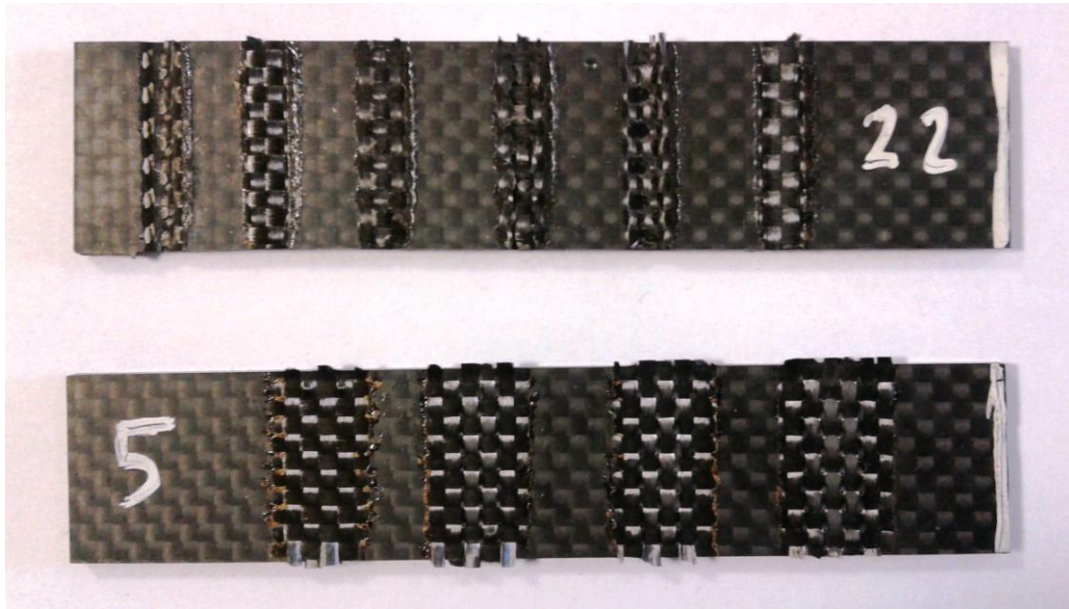


Figura 4.7: Esempi di provini su cui sono state eseguite numerose ablazioni differenti

Le prove sono state svolte effettuando diversi numeri di passate, ma sempre nello stesso verso. In altri termini, il laser non è sempre costantemente acceso mentre il campione si muove ripetutamente avanti e indietro sotto di esso, bensì è attivo solo all'andata (fase di *time-on*) e durante il ritorno viene spento (fase di *time-off*). Questo piccolo accorgimento sembra molto semplice ma è fondamentale, poiché permette di ridurre molto il tipico svantaggio di cui soffrono i laser a regime continuo: l'alternarsi della fase di *time-on* e *time-off* garantisce infatti al materiale una sorta di “pausa di raffreddamento”, la quale limita il tempo di interazione complessivo tra il fascio e il materiale e di conseguenza riduce sensibilmente il carico termico a danno del provino. Oltretutto, realizzare tutte le passate sempre nello stesso verso consente anche di definire in modo univoco, al termine della lavorazione, un lato di ingresso e un lato di uscita del fascio sul campione. Ciò può servire allo scopo di verificare, in sede di analisi dei dati, eventuali differenze tra le due estremità.

Come accennato, tuttavia, applicare questo accorgimento costringe ad attivare e disattivare continuamente l'emissione laser, il che obbliga a fare molta attenzione e a tenere in debito conto il tempo di regimazione della macchina. All'accensione, infatti, la potenza della sorgente non riesce certo a raggiungere istantaneamente il valore di regime, bensì presenta una rampa di salita (seppure molto rapida). Se l'ingresso del fascio sul provino avvenisse quando il livello di potenza desiderato non è ancora stato raggiunto, la lavorazione verrebbe ovviamente svolta in maniera errata. Per ovviare a questo problema, la corsa delle passate di lavoro è stata allungata di diversi centimetri oltre la dimensione del provino in entrambe le direzioni, così che la radiazione abbia il tempo di arrivare alla condizione di regime prima che inizi l'interazione con il materiale.

4.4.3 Osservazione dei Risultati

Una volta effettuate le prove di ablazione sui provini, è possibile procedere a tutte le misure e osservazioni necessarie. Per poter osservare in modo corretto e senza errori o ambiguità i risultati delle lavorazioni fatte, però, è necessario prima di tutto eseguire un sorta di post-trattamento su tutti i campioni. La prima cosa da fare è pulire accuratamente la superficie lavorata, in modo tale da rimuovere eventuali depositi di polveri carbonizzate rimaste sulla superficie: questa operazione, pur essendo assolutamente banale, deve essere fatta con estrema delicatezza per evitare di strappare o danneggiare eventuali fasci di fibre libere che si trovino in posizioni precarie (ad esempio totalmente estroflesse oppure in procinto di distaccarsi).

Dopo questa semplice pulizia preliminare, si può procedere alla cosiddetta *lappatura* dei provini. Questa operazione viene a volte impropriamente definita "lucidatura", ma si tratta in realtà di qualcosa di un po' differente: essa consiste infatti nel sottoporre un oggetto ad una azione abrasiva più o meno energica, allo scopo di rimuovere completamente le imperfezioni e i residui presenti negli strati superficiali, esponendo in tal modo il materiale che si trova al disotto. Lo strumento impiegato per

questo tipo di trattamento sui provini realizzati è la lappatrice di fig. 4.8. In sostanza si tratta di una macchina che, per mezzo di un pistone ad aria compressa, preme i campioni contro un disco abrasivo sottostante: entrambe le parti sono in rotazione, ma ciò che conta davvero è la velocità reciproca che intercorre tra le due. L'apparecchiatura è dotata di un timer e di un circuito ad acqua per il raffreddamento, ed ogni parametro è completamente regolabile: velocità di rotazione relativa, pressione del pistone sul disco, portata di refrigerante e tempo di trattamento.



Figura 4.8: *Lappatrice impiegata per i campioni di ablazione: a sinistra la macchina con set-up completo, a destra la lavorazione in corso*

Come si nota dalle immagini, i provini durante la lappatura sono fissati ad una attrezzatura porta-campioni di forma triangolare. Questo sistema è stato appositamente progettato in precedenza per altri studi su provini in CFRP del tutto analoghi a quelli impiegati nell'attività qui presentata. Il supporto possiede tre slot dedicati: può quindi contenere tre campioni separati oppure, impiegando apposite viti di fissaggio di lunghezza maggiorata, fino a sei campioni disposti a coppie. Il sistema

è basculante attorno al pistone della macchina, al fine di permettere un facile adattamento alla superficie del disco e la compensazione di eventuali giochi o irregolarità. Per questo stesso motivo, tuttavia, deve sempre essere usato occupando tutti e tre gli spazi disponibili, altrimenti non c'è alcun bilanciamento dei carichi in gioco.

I provini realizzati in questa tesi sono stati trattati in modo da poter poi osservare l'effetto della lavorazione sulla sezione. Per questo motivo, la lappatura non è stata eseguita sulla superficie superiore, bensì su una delle superfici laterali, in particolare sul lato di uscita del fascio laser dal pezzo. Questa scelta è stata fatta in virtù di una delle ipotesi citate all'inizio di questo capitolo (v. § 4.1): poiché il materiale si riscalda durante la lavorazione a causa della cessione di energia, ci si potrebbe attendere che l'ablazione abbia un effetto minore al momento dell'ingresso (quando il materiale è ancora "freddo") ed un effetto maggiore al momento dell'uscita (quando il materiale si è riscaldato).

Il trattamento è stato dunque eseguito sempre sul lato di uscita, al fine di avere condizioni analoghe per tutti i campioni e per essere praticamente certi di osservare le zone in cui l'ablazione raggiunge le maggiori profondità. Si è deciso, tuttavia, di sottoporre comunque alcuni provini alla lappatura su entrambi i lati proprio per verificare l'eventuale esistenza di differenze significative tra le zone di ingresso e uscita del fascio. La lappatura è stata eseguita impiegando le carte abrasive di granulometria più grossolana, per due motivi: innanzitutto al fine di rimuovere uno spesso strato di materiale ed osservare quindi le zone lavorate nella maniera migliore possibile, e in secondo luogo per evitare di far diventare troppo lucide le superfici di interesse, il che le renderebbe molto più difficili da osservare al microscopio. Nello specifico, il trattamento effettuato prevede la sequenza seguente:

- 1) Carta P 80 ad una pressione di 1.5 bar per 7 minuti (con acqua);
- 2) Carta P 180 ad una pressione di 1.5 bar per 7 minuti (con acqua);
- 3) Carta P 240 ad una pressione di 1.5 bar per 7 minuti. (con acqua).

Naturalmente non è un caso che la lappatura venga fatta procedendo in successione dalle granulometrie più grossolane verso quelle via via più fini: per prima cosa si rimuove in maniera energica la maggiore quantità possibile di materiale, dopodiché si effettua un trattamento più delicato, riducendo gradualmente il tasso di asportazione a favore dell'ottenimento di una superficie meno scabra e più uniforme. A questo punto, i campioni sono pronti per essere osservati nel dettaglio.

L'osservazione è stata fatta con lo stereo-microscopio di fig. 4.9, capace di ingrandimenti da 10x fino a 40x. Lo strumento è dotato di un sistema di illuminazione dedicato, costituito da due led montati su bracci orientabili. La piattaforma su cui vengono posizionati i provini, invece, è una attrezzatura indipendente originariamente montata su un'altra macchina: tuttavia, data la comodità della regolazione cartesiana in direzione x - y che essa possiede, è stata impiegata in associazione con il microscopio per facilitare le osservazioni.



Figura 4.9: Stereo-microscopio impiegato per l'osservazione dei provini

Per ogni campione, tutte le ablazioni eseguite sono state osservate sia in sezione che dall'alto, e di ciascuna osservazione è stata catturata una immagine. L'utilizzazione di questo microscopio al posto di strumenti più potenti è stata una scelta pressoché obbligata, a causa delle dimensioni relativamente molto grandi delle lavorazioni da osservare: con microscopi più performanti, infatti, le zone di interesse non avrebbero potuto essere contenute in singole immagini, e ciò avrebbe reso la valutazione dei risultati molto più laboriosa e difficile. Per questo stesso motivo, inoltre, anche con lo stereo-microscopio stesso è stato necessario fare quasi tutte le osservazioni al livello di ingrandimento minimo.

Una volta catturate le immagini, si è proceduto ad effettuare tutte le misurazioni necessarie: le immagini delle ablazioni in sezione sono state utilizzate per misurare le profondità raggiunte dal trattamento, mentre le immagini dall'alto sono state impiegate per ottenere le misure delle larghezze e le stime qualitative del degrado subito dalle fibre. Per maggiori dettagli in merito alle grandezze di interesse, il loro significato e la loro valutazione si rimanda al capitolo successivo (v. § 5.1).

4.5 PARAMETRI DI PROCESSO

Rientrano nella definizione di *parametri di processo* tutte le variabili della lavorazione che possono essere definite a priori, e che ne determinano l'esito. Fanno ovviamente parte di questa categoria tutti i parametri di macchina, i quali vengono impostati e regolati preventivamente in base alle esigenze di studio e al risultato che si vuole ottenere. Come già detto in precedenza (v. § 4.1), la parte iniziale dello studio qui presentato è stata rivolta ad una semplice indagine molto generale sugli effetti dei laser sui materiali compositi, dunque i parametri di processo utilizzati per le prove preliminari sono stati piuttosto arbitrari, senza particolari metodi di scelta né obiettivi precisi.

Non è stato affatto così, invece, per il vero “cuore” del lavoro svolto. In questo caso, la scelta dei particolari parametri di processo impiegati non è stata frutto di una

decisione arbitraria, bensì derivante dall'analisi della letteratura tecnica esistente, nello specifico il lavoro di R. Negarestani^[39]. Il grafico già mostrato in precedenza nel testo (v. fig. 3.3) si rivela infatti particolarmente interessante per gli scopi di questa tesi, ed è qui riproposto in fig. 4.10. In esso si può agevolmente osservare come la vaporizzazione della resina e quella delle fibre di carbonio (grafite) avvengano per condizioni di lavoro molto differenti tra loro, e questo fa ben sperare in merito alla buona riuscita di una corretta ablazione della sola matrice che non comporti significativi danni al rinforzo. Inoltre, ciò fornisce un buon punto di partenza per quanto riguarda la scelta dei parametri di processo più adatti: questi dovranno infatti essere tali da trovarsi all'interno della zona di vaporizzazione della resina, senza però avvicinarsi troppo a quella delle fibre.

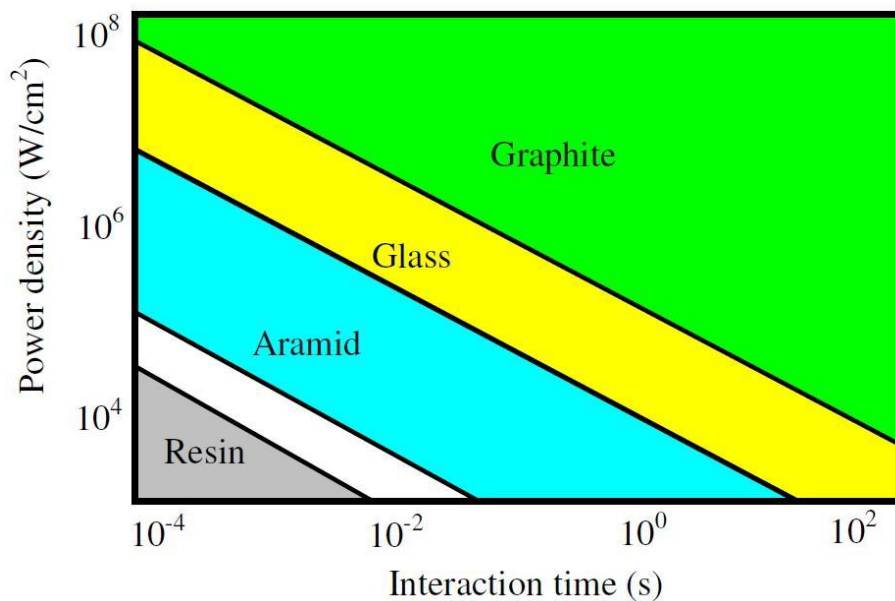


Figura 4.10: *Condizioni di vaporizzazione per resina e vari tipi di fibre in funzione di densità di potenza e tempo di interazione* ^[39]

Nello specifico, i tre parametri fondamentali della sorgente laser che possono essere regolati in maniera indipendente tra loro sono: potenza di emissione, distanza della testa di lavoro dalla superficie del pezzo e traiettoria del fascio sul campione. A tale proposito, sono però necessarie due precisazioni: innanzitutto la distanza testa-pezzo definisce in maniera matematica il conseguente diametro dello spot di focalizzazione

che si ottiene, e in secondo luogo la traiettoria decisa per la lavorazione determina univocamente il numero di passate che il fascio laser esegue sul provino. Queste due nuove variabili sono di utilizzo molto più intuitivo ed utile rispetto a quelle dalle quali sono ottenute. Di conseguenza, per gli obiettivi di questo studio, i parametri di processo “effettivi” saranno in realtà: *potenza, diametro dello spot di focalizzazione e numero di passate*.

Per quanto riguarda i valori specifici utilizzati per i parametri di processo nell’attività qui presentata, in tab. 4.2 è fornita una classificazione completa delle varie combinazioni impiegate. In particolare, le prove sono state eseguite combinando tra loro i seguenti:

- Quattro differenti livelli di potenza: 100 W, 200 W, 300 W e 400 W;
- Tre diversi diametri dello spot di focalizzazione: 4 mm, 9.5 mm e 13 mm;
- Vari numeri di passate: 1, 5, 10, 20, 40;

A questi tre parametri fondamentali deve essere inoltre aggiunta la *velocità di lavoro*, la quale è stata mantenuta sempre fissa a 1500 mm/min (cioè 25 mm/s) per tutte le prove eseguite.

POTENZA	SPOT	PASSATE
100 W	4 mm	1
		5
		10
		20
		40
	9.5 mm	1
		5
		10
		20
		40
	13 mm	5

POTENZA	SPOT	PASSATE
200 W	4 mm	1
		5
		10
		20
	9.5 mm	1
		5
		10
		20

POTENZA	SPOT	PASSATE
300 W	4 mm	1
		5
	9.5 mm	1
		5
	13 mm	5
		10
		20

POTENZA	SPOT	PASSATE
400 W	9.5 mm	5
	13 mm	5
		10

Tabella 4.2: Parametri di processo utilizzati e loro combinazioni

Come si può notare dalla tabella, non sono state eseguite tutte le combinazioni possibili. Questa decisione, tuttavia, non è stata presa a priori fin dall'inizio, bensì è stata presa "in corso d'opera", a seguito dei risultati ottenuti dalle prime prove effettuate. Alcune combinazioni di parametri hanno infatti dato origine a risultati indesiderati, e ciò ha permesso di escludere immediatamente altre combinazioni il cui esito sarebbe stato analogo o anche peggiore: si tratta, principalmente, di casi in cui la lavorazione non ha avuto alcun effetto (nemmeno sulla resina) oppure è stata troppo violenta (con danni anche alle fibre).

Dai parametri di base appena discussi derivano poi, tramite il calcolo, altre variabili essenziali il cui legame con i risultati è ancora più importante da osservare per gli scopi di questo lavoro. Si tratta delle seguenti quantità:

- Densità di potenza: rappresenta la potenza per unità di superficie dello spot di focalizzazione, ed è data dalla formula (dove P = potenza in W, A_{SPOT} = area dello spot in mm^2):

$$D.P. = \frac{P}{A_{SPOT}} \quad [W/mm^2]$$

- Tempo di interazione: rappresenta il lasso di tempo in cui il fascio laser e il materiale interagiscono tra loro durante la lavorazione, ed è dato dalla formula (in cui d_{SPOT} = diametro dello spot in mm , v_{LAV} = velocità di lavoro in mm/s , N_{PASS} = numero di passate):

$$t_{INT} = \frac{d_{SPOT}}{v_{LAV}} \cdot N_{PASS} \quad [s]$$

- Densità di energia totale: rappresenta la quantità di energia che si scarica in ogni mm^2 di superficie lavorata durante l'intera lavorazione, ed è data dalla formula (P = potenza in W , v_{LAV} = velocità di lavoro in mm/s , d_{SPOT} = diametro dello spot in mm , N_{PASS} = numero di passate):

$$D.E.T. = \frac{P}{v_{LAV} \cdot d_{SPOT}} \cdot N_{PASS} \quad [J/mm^2]$$

Riguardo a quest'ultima quantità, è necessaria una piccola precisazione. La definizione introdotta per la densità di energia totale prende spunto dal lavoro di Fischer, Romoli e Kling^[34]: al denominatore c'è un'area spazzata nell'unità di tempo, e dividendo la potenza per questa quantità si ottiene una densità di energia (misurata in J/mm^2). La quantità calcolata in [34] è però valida solamente per una lavorazione a singola passata, perciò la definizione presente in letteratura è stata modificata appositamente per questa attività moltiplicando il tutto per il numero di passate, così da ottenere il valore totale per l'intera lavorazione (anche nel caso di multi-passata).

Il capitolo seguente sarà interamente dedicato al resoconto dettagliato dei risultati ottenuti, nonché alla loro interpretazione alla luce dei principi della fisica e della teoria dei materiali compositi e dei laser.

CAPITOLO 5

DISCUSSIONE DEI RISULTATI DELLE PROVE

5.1 PARAMETRI INVESTIGATI

Come già detto nel capitolo precedente (v. § 4.5), i parametri di processo utilizzati nel lavoro presentato in questa tesi per “controllare” l’ablazione sono tre: *potenza*, *diametro dello spot di focalizzazione* e *numero di passate*. I parametri di processo, dunque, rappresentano (e quantificano) in un certo senso “le cause” della lavorazione che si ottiene, cioè tutte quelle variabili fissate preliminarmente e i cui valori determinano il modo in cui il processo avviene. All’estremo opposto si trovano invece i cosiddetti *parametri investigati* (o *grandezze di interesse*), che sostanzialmente costituiscono (e quantificano) “le conseguenze” della lavorazione, cioè il risultato conseguito. Nel contesto della attività sperimentale svolta, i parametri investigati sono quattro:

- Profondità: è l’estensione in direzione verticale, attraverso lo spessore, della zona termicamente alterata in cui si è riusciti a provocare l’asportazione della matrice, ed è misurata sulla sezione (indicata, per chiarezza, in fig. 5.1);
- Larghezza: rappresenta l’estensione in direzione trasversale della traccia di ablazione ottenuta, cioè l’ampiezza della zona trattata, ed è misurata dall’alto (indicata, per chiarezza, in fig. 5.1);

- Degrado: è inteso come una valutazione (qualitativa) del livello di danneggiamento subito dalle fibre in corrispondenza della zona di ablazione della resina;
- Temperatura: termine piuttosto auto-esplicativo, è costituita dall'andamento di temperatura rilevato nella parte centrale della zona trattata per tutta la durata della lavorazione.

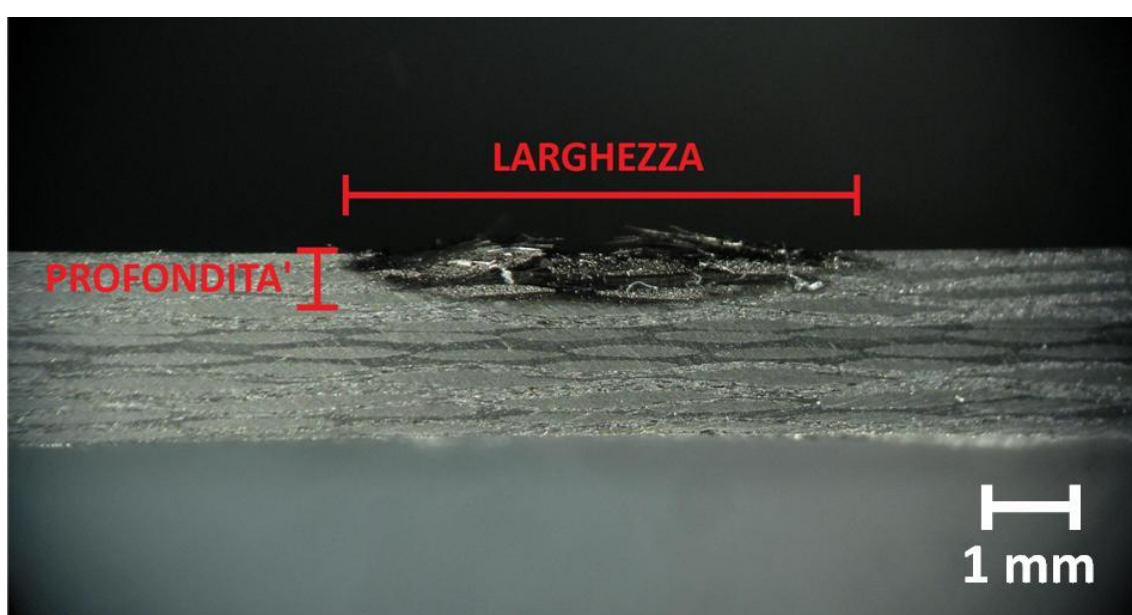


Figura 5.1: Significato dei termini “profondità” e “larghezza” per un solco di ablazione

In particolare, in merito al concetto di degrado, è necessario fare subito alcune precisazioni. Esso risulta essenziale per poter distinguere le situazioni di lavoro definibili come “ottimali”, in cui la matrice è stata correttamente rimossa e le fibre sono in ottimo stato, da tutte quelle i cui risultati si rivelano invece di pessima qualità, con fibre visibilmente rovinate in maniera non accettabile. Nonostante la sua importanza, però, risulta molto arduo definire il grado di danneggiamento in modo analitico e quantitativo. Per questo motivo, per gli scopi di questa attività si è deciso di elaborare appositamente una scala dedicata di valutazione qualitativa, basata su 6

livelli di degrado. I livelli sono identificati in base ad un numero crescente (da 0 a 5) con il danneggiamento, e sono definiti come segue:

- Livello 0: Fibre in condizioni perfette, totalmente pulite e completamente lucide;
- Livello 1: Fibre che hanno perso la loro lucidità, con eventuale presenza di lievi e piccole bruciature negli interstizi del tessuto;
- Livello 2: Tessuto con vistose bruciature negli interstizi, talvolta con la presenza di un principio di sfilacciamento delle fibre;
- Livello 3: Tessuto con vistoso sfilacciamento, a volte con bruciature negli interstizi, e spesso in associazione ad un principio di deformazione e “svasatura” dei fasci di trama e ordito (probabilmente dovute ad un inizio di carbonizzazione delle fibre);
- Livello 4: Asportazione di diversi strati superficiali di fibre, accompagnati da un notevole sfilacciamento del tessuto e un evidente stato di danneggiamento termico dei fasci di fibre;
- Livello 5: Numerosi strati di fibre asportati, con fibre completamente carbonizzate e distruzione della struttura del tessuto (talvolta presente anche sfilacciamento dei fasci di trama e ordito non del tutto carbonizzati).

Per una migliore comprensione ed una maggiore chiarezza nell'interpretazione dei risultati che saranno presentati più avanti nel testo, i livelli di degrado appena definiti sono illustrati in fig. 5.2 attraverso immagini esemplificative (tratte da campioni effettivamente ottenuti). Naturalmente, non possono rientrare nella classificazione appena esposta tutte quelle combinazioni di parametri di processo che, a causa di una

densità di potenza a valori troppo bassi, non hanno avuto alcun effetto sulla rimozione della resina.

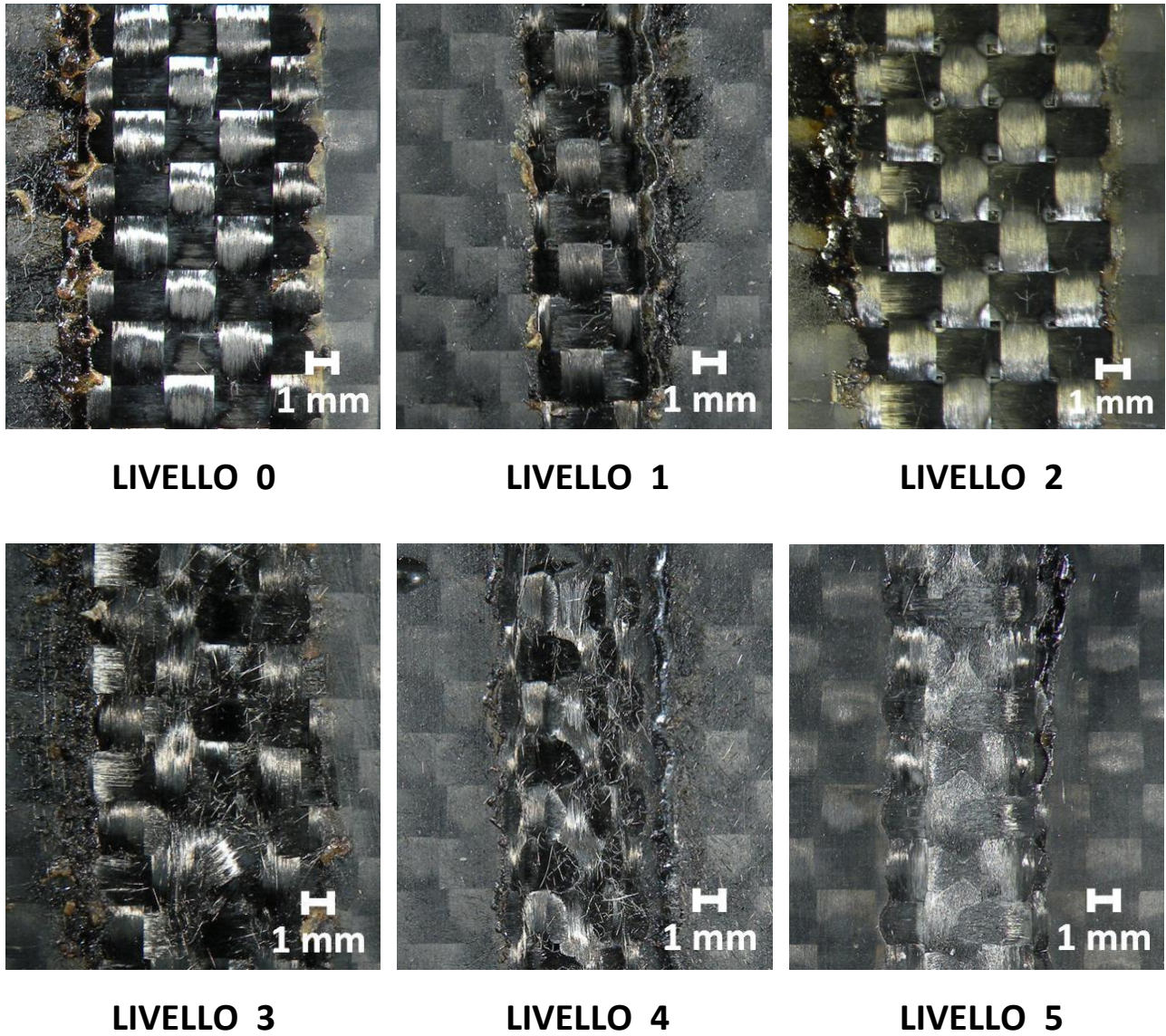


Figura 5.2: Immagini esemplificative dei differenti livelli di degrado progressivi

5.2 RISULTATI DELLE PROVE

Saranno di seguito mostrati e commentati nel dettaglio tutti i risultati ottenuti nel contesto di questa attività. Tutte le prove (cioè le varie combinazioni dei parametri di processo) sono state ripetute da un minimo di tre ad un massimo di cinque volte, al

fine di poter calcolare valori medi e deviazioni standard per la profondità, la larghezza e il degrado superficiale.

Come già accennato in precedenza lo studio qui presentato è piuttosto pionieristico poiché, sebbene l'ablazione sia già stata investigata in altre occasioni, la scelta di eseguire questa lavorazione su CFRP con un laser continuo e nelle condizioni di prova descritte non trova pressoché alcun precedente in letteratura. E' opportuno, a questo punto, ricordare che l'obiettivo fondamentale della attività sperimentale è quello di investigare gli effetti dei parametri operativi nel processo di ablazione di campioni in carboresina mediante laser. Variare i parametri e valutarne l'effetto sulla lavorazione consentirà di avere prime indicazioni sul comportamento del processo, ed eventualmente evidenziarne aspetti inattesi o fare emergere problematiche.

Di conseguenza, i risultati saranno presentati principalmente in forma di correlazioni dirette tra tutti i parametri di processo e i diversi parametri di interesse. In particolare, verrà seguito un preciso ordine logico nell'esposizione, suddividendo questo capitolo in base ai risultati ottenuti per i differenti parametri investigati: profondità, larghezza, degrado e temperatura. Infine, prima di concludere tirando le fila dell'intera trattazione, saranno discusse altre questioni accessorie ma di pari importanza.

Innanzitutto però, anche se l'argomento sarà affrontato per esteso alla fine di questo capitolo, è necessario anticipare subito un aspetto importante, riguardante il flusso di aria utilizzato come gas d'assistenza nelle prove. Infatti, nelle prime fasi del lavoro sperimentale non era assolutamente noto l'effetto del flusso d'assistenza sul processo, e le primissime prove sono state dunque effettuate con l'ugello di emissione in posizione non controllata e pressoché casuale (ma sempre nell'intorno della zona di lavoro). Solo successivamente, quando si è compreso che il getto d'aria poteva avere una influenza significativa, si è passati ad eseguire le prove "ufficiali" con l'ugello collocato sempre nella stessa posizione rispetto al provino in lavorazione.

Tutti i risultati che saranno presentati in questo capitolo sono relativi alle sole prove "ufficiali", le quali sono tutte perfettamente confrontabili e coerenti e tra loro poiché la posizione del getto è sempre identica. In ogni caso alla fine del testo saranno poi

discussi i vari effetti della presenza del getto, e sarà svolto anche un rapido confronto tra le prove ad aria controllata e quelle ad aria non controllata, al fine comprenderne le eventuali differenze.

Riguardo al flusso d'assistenza, occorre però sottolineare che l'assenza di valori di riferimento e la difficoltà nel riposizionare con precisione l'ugello tra una prova e l'altra causano serie difficoltà nel caratterizzare il reale effetto del getto sul processo. Di conseguenza, le deduzioni fatte in merito non saranno da considerare come assolutamente valide, ma solamente come ipotetiche e/o plausibili. Infine, l'elevata variabilità dei dati ottenuti è certamente causata proprio dalle incertezze sul flusso d'aria (oltre che dalla ben nota anisotropia tipica del materiale).

5.2.1 Profondità

Uno dei parametri più importanti dal punto di vista dell'utilità del processo è senza dubbio la profondità raggiunta. L'ablazione può anche essere resa ottimale, con la totale assenza di danni alle fibre ed una notevole pulizia delle stesse, ma se la profondità di rimozione della resina è irrisoria la lavorazione si rivelerà comunque piuttosto inutile. In fig. 5.3 è rappresentato l'andamento della profondità al variare del numero di passate e della dimensione dello spot per il caso della potenza a 100 W (naturalmente la situazione si presenta analoga per i 200 e i 300 W).

Si può innanzitutto vedere chiaramente che la profondità cresce all'aumentare del numero di passate. Questo accade poiché, ovviamente, ad ogni passata viene rimossa una certa porzione di materiale: di conseguenza, maggiore è il numero di passate, maggiore sarà l'asportazione prodotta e dunque la profondità. Inoltre si osserva che, ragionando a parità di passate, uno spot più ridotto produce una profondità maggiore. Anche questo è un fatto piuttosto intuitivo: infatti, riducendo lo spot a parità di potenza si va ad incrementare la densità di potenza che agisce sul materiale (i cui valori sono indicati sul grafico), perciò l'effetto della asportazione sarà via via più marcato.

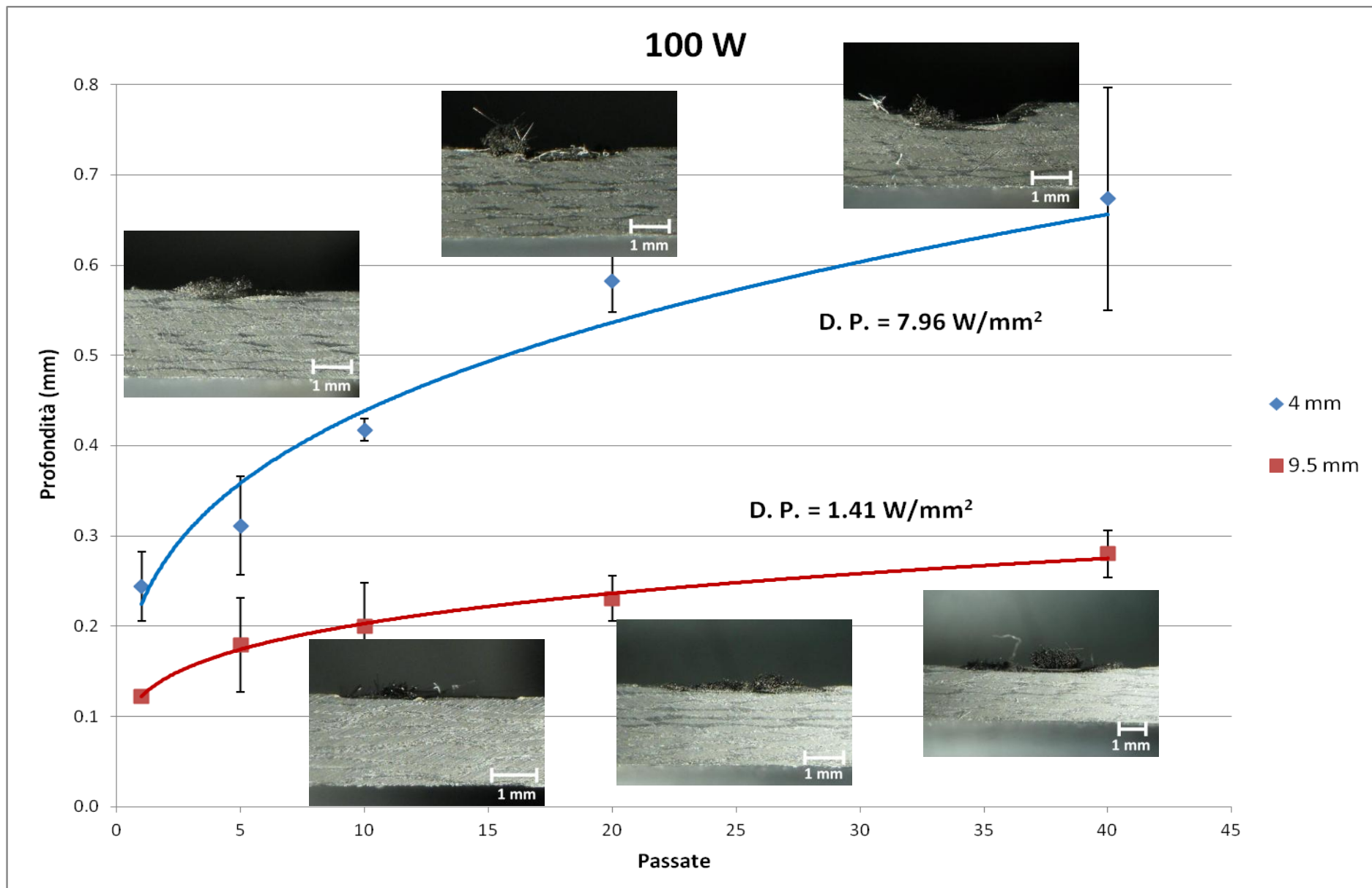


Figura 5.3: Andamento della profondità in funzione di numero di passate e diametro dello spot per il caso dei 100 W

Se invece si prova a fissare il valore del diametro dello spot di focalizzazione si ottiene il grafico di fig. 5.4, il quale mostra l'andamento della profondità in funzione del numero di passate e del livello di potenza. Di nuovo, per semplicità è mostrato in figura solamente il caso dello spot di 9.5 mm, ma il comportamento negli altri casi è del tutto analogo.

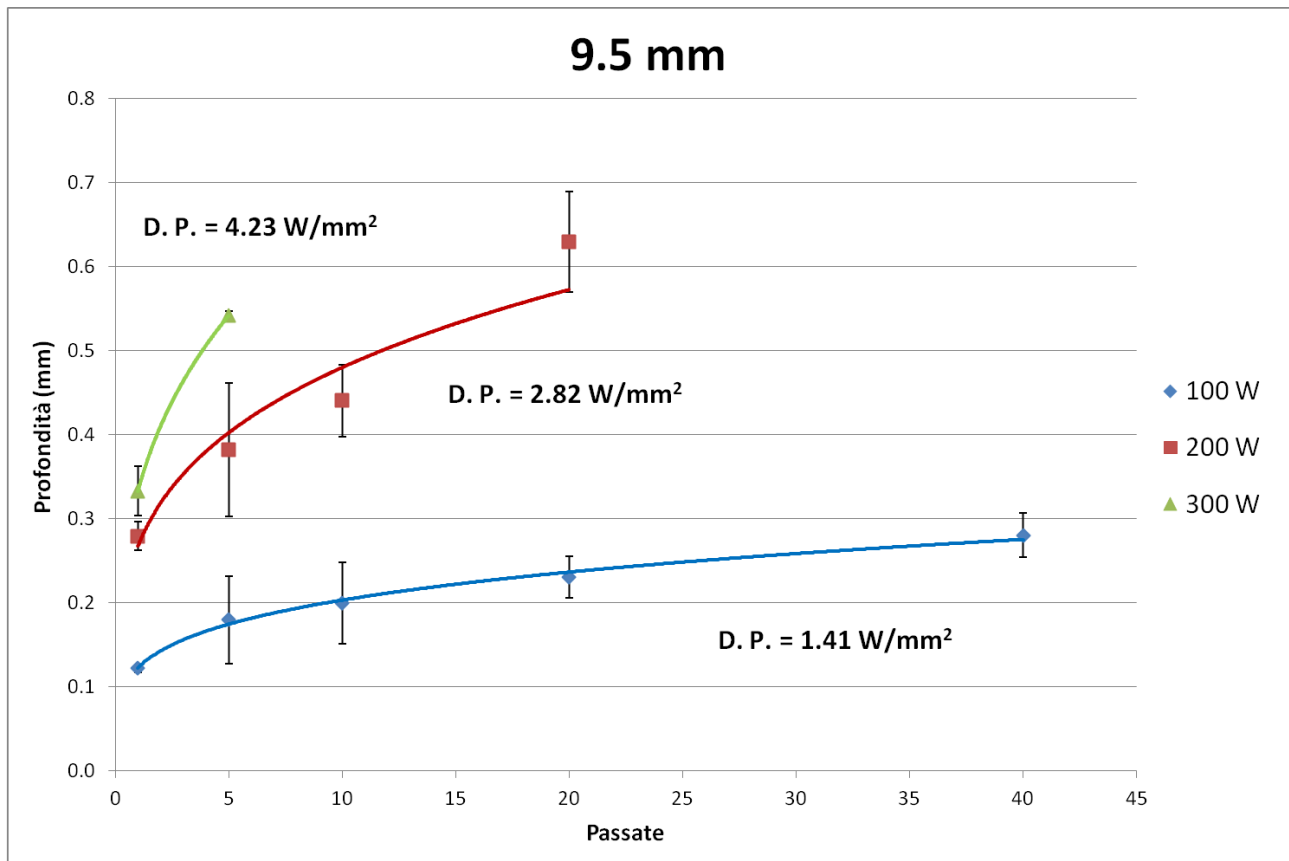


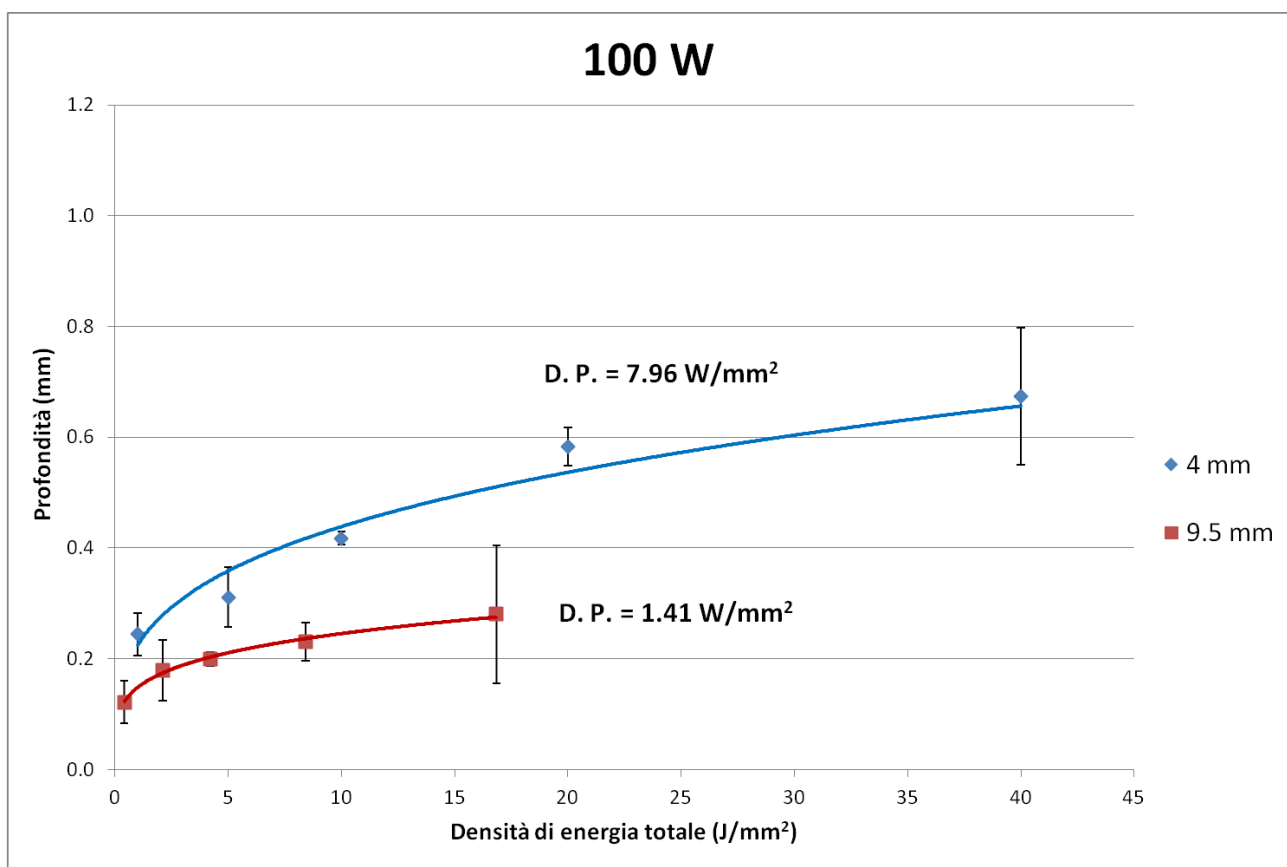
Figura 5.4: Andamento della profondità in funzione di passate e potenza per lo spot di 9.5 mm

Per prima cosa, si nota in modo evidente che la profondità aumenta al crescere della potenza impiegata: in maniera simile a quanto detto prima questo accade perché, ragionando a parità di dimensioni dello spot, un incremento di potenza produce un aumento della densità di potenza ceduta al materiale (valori indicati sul grafico).

Finora gli andamenti della profondità hanno semplicemente confermato fenomeni attesi, o quantomeno intuitivi. Se invece si prova a mettere in relazione la profondità con la densità di energia totale (come definita al capitolo precedente, v. § 4.5), si può

osservare qualcosa di molto più interessante. In fig. 5.5 sono mostrati questi andamenti, per tre livelli di potenza differenti (la famiglia dei 400 W possiede troppi pochi punti per poter fare un grafico che distingua i diversi spot).

E' essenziale ricordare che la densità di energia totale, in teoria, dovrebbe essere già normalizzata rispetto alla dimensione dello spot di focalizzazione (da cui appunto la denominazione "densità"): di conseguenza ci si aspetterebbe che, nei grafici, non sussista alcuna distinzione tra i diversi diametri dello spot. Nonostante questo, tuttavia, permane per i 100 W una evidente separazione tra gli andamenti. In realtà la densità di energia, per come è definita, non tiene conto della reale distribuzione della potenza sulla sezione del fascio laser, ma solo del valore medio valutato su tutta la sezione stessa. Tale distribuzione risulta dipendente dalle dimensioni dello spot e dalla potenza erogata, e l'impossibilità di conoscerne l'effettivo andamento rende decisamente complessa la valutazione del suo effetto sulle profondità ottenibili.



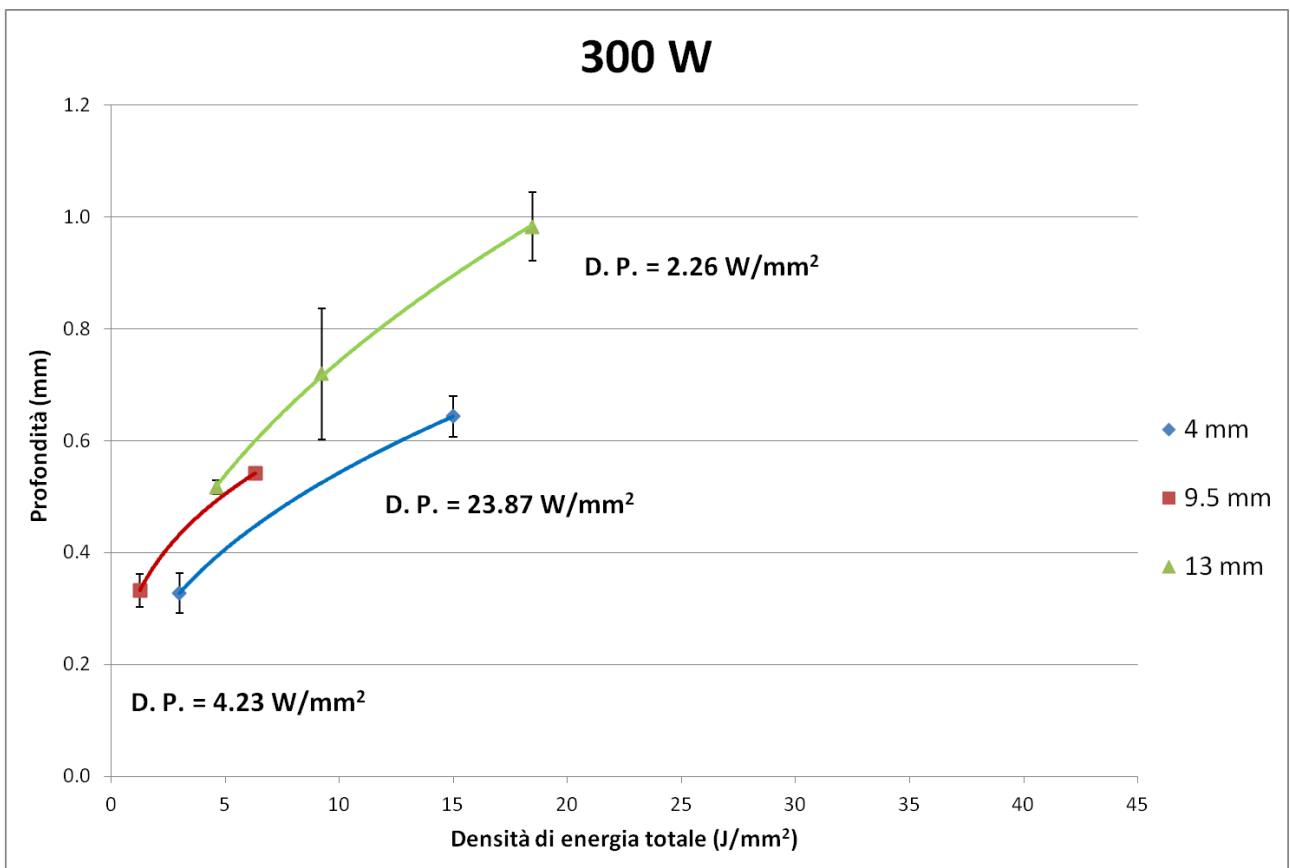
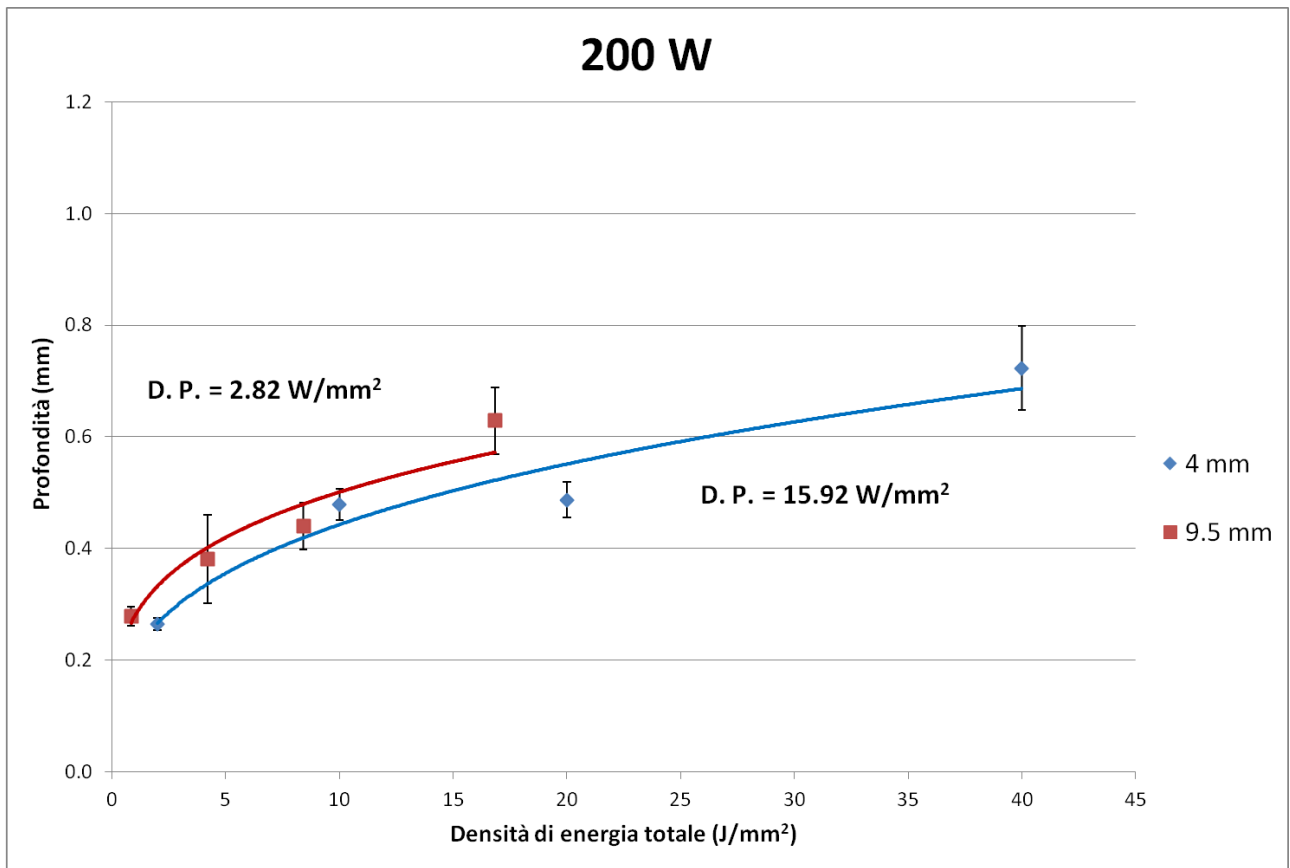


Figura 5.5: Andamenti della profondità in funzione della densità di energia totale

In ogni caso, l'inaspettato comportamento delle prove a 100 W è probabilmente dovuto proprio al basso livello di potenza il quale, unitamente alle notevoli dimensioni dello spot, genera necessariamente un valore di densità di potenza molto ridotto. Il così basso livello di energia, a sua volta, rende il comportamento della radiazione molto più sensibile alla dimensione dello spot, e un allargamento di quest'ultimo causa presumibilmente un "appiattimento" della distribuzione di potenza sulla sezione del fascio, con una consistente migrazione dell'energia verso i bordi. Ciò, in conclusione, potrebbe ridurre l'efficacia della penetrazione nel materiale nella parte centrale.

Tuttavia, come si può notare dai grafici successivi, l'entità di questo fenomeno si riduce gradualmente all'aumentare della potenza: a valori maggiori di questa gli andamenti tendono infatti a sovrapporsi, verosimilmente poiché l'elevato livello di potenza compensa senza problemi il fenomeno appena descritto. Una prova della attendibilità di queste ipotesi potrebbe derivare dalla osservazione delle temperature fatta più avanti nel testo (v. § 5.2.4): a parità di spot di focalizzazione la temperatura cresce con la potenza, e ciò significa che a 100 W essa è più bassa e produce minore asportazione.

Se si pongono in un unico grafico tutti gli andamenti appena visti in fig. 5.5, senza più distinguere le diverse dimensioni dello spot ma ragionando solo in termini di potenza, si ottiene il diagramma di fig. 5.6. Come già osservato per i grafici precedenti, il comportamento delle prove a 100 W è quello con la maggiore variabilità, mentre le altre potenze hanno andamenti lievemente più coerenti. A parità di densità di energia totale, si nota un palese aumento di profondità raggiunta al crescere della potenza, mentre a parità di potenza media la profondità cresce con la densità di energia totale. In effetti, quest'ultima tiene conto sia del livello di potenza che del numero di passate, ma queste due quantità non hanno lo stesso effetto sulla profondità: eseguire poche passate ad alte potenze oppure molte passate a basse potenze dà risultati nettamente differenti tra loro in termini di profondità raggiunta.

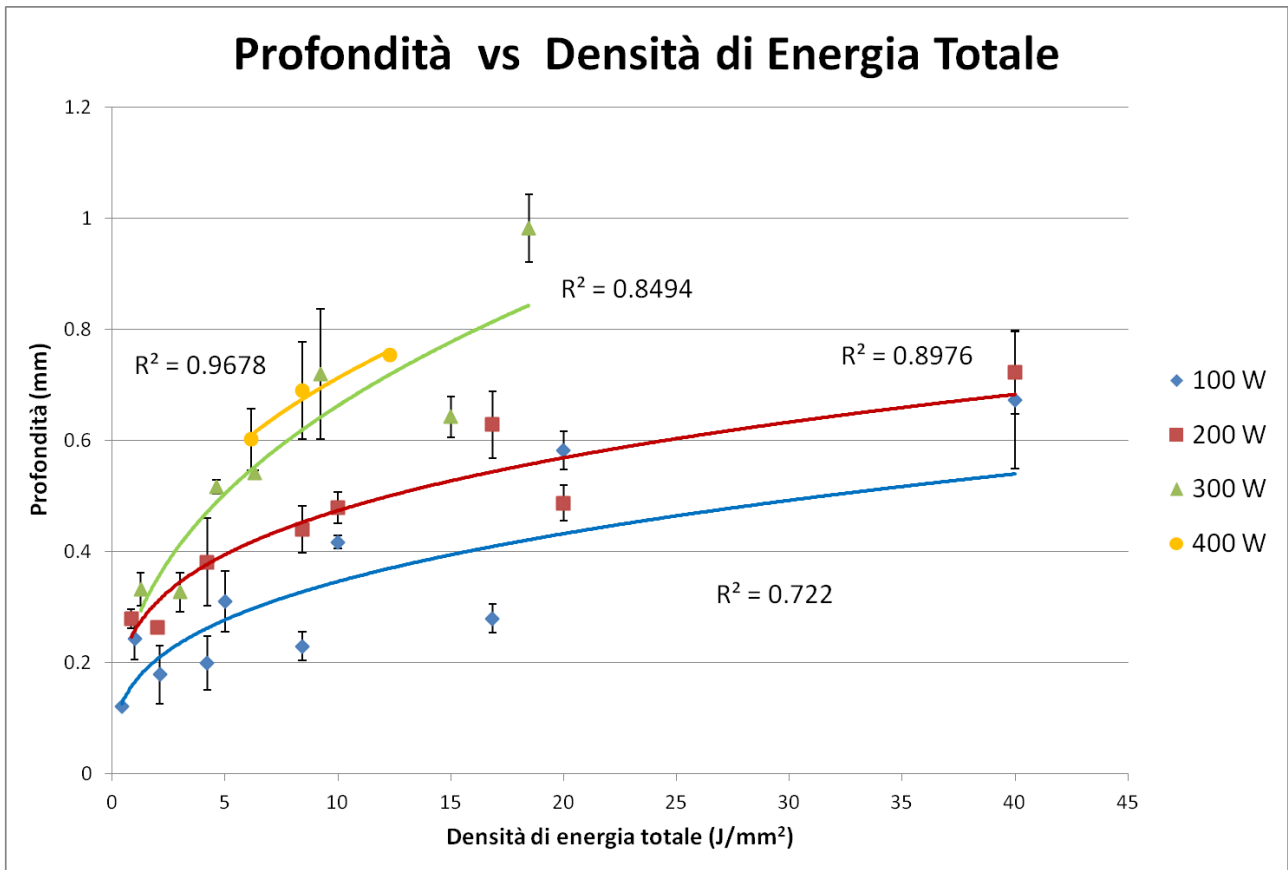


Fig. 5.6: Andamenti della profondità al variare della potenza

5.2.2 Larghezza

Il secondo parametro investigato è la larghezza dei solchi di ablazione realizzati. Procedendo in modo simile a quanto fatto per la profondità, si osservi prima di tutto l'andamento che la larghezza mostra al procedere delle passate. Per non appesantire inutilmente la trattazione, in fig. 5.7 è mostrato solo il caso della potenza a 200 W, ma gli andamenti nelle altre situazioni sono esattamente dello stesso tipo.

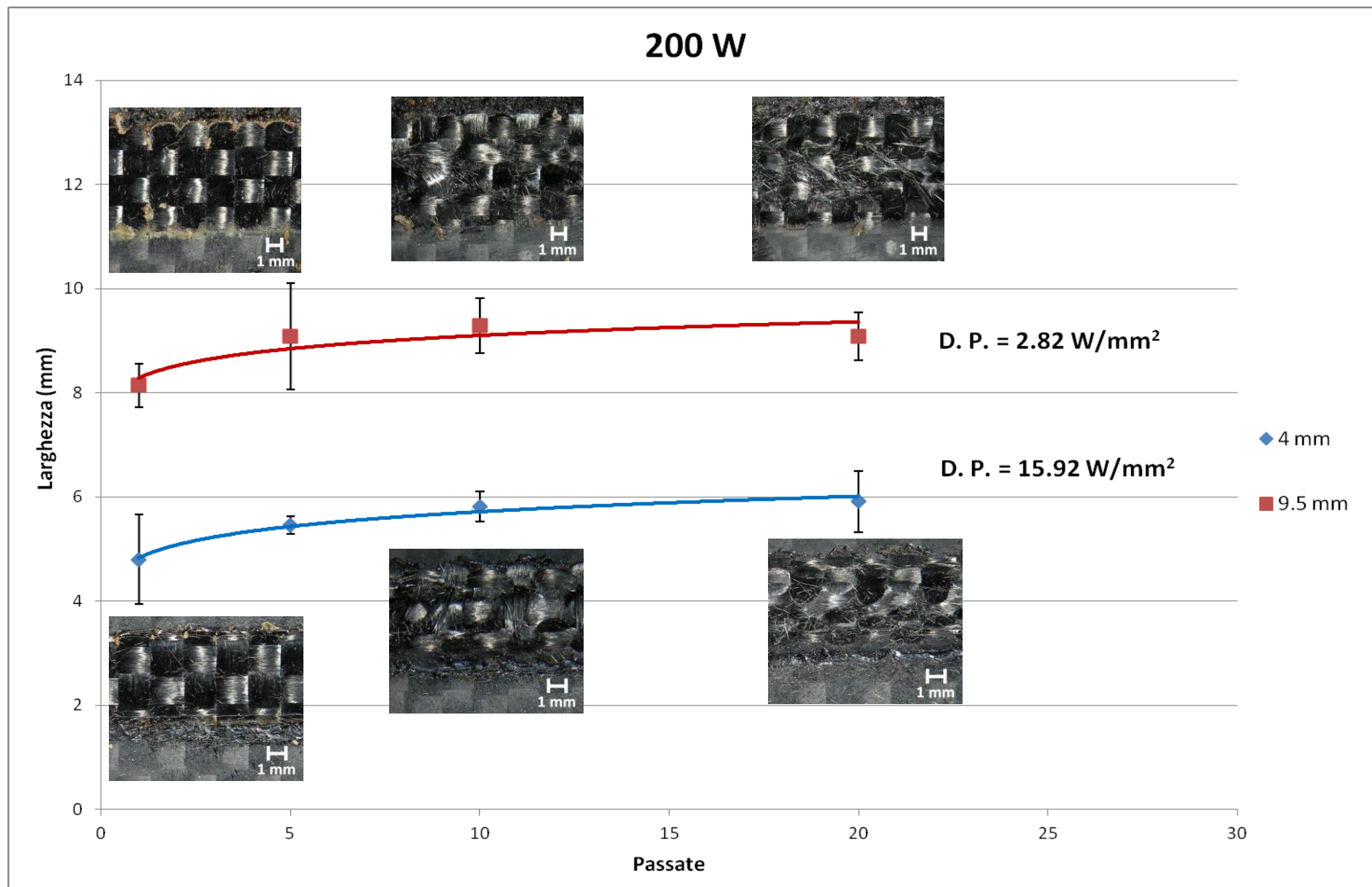


Figura 5.7: Andamento della larghezza in funzione di numero di passate e diametro dello spot per il caso dei 200 W

Innanzitutto si può vedere che, al variare del diametro dello spot di focalizzazione, il comportamento è diametralmente opposto a quello della profondità visto in precedenza: all'aumentare del diametro dello spot si ha, infatti, un netto incremento della larghezza risultante. Questo accade poiché, ovviamente, con uno spot di dimensioni maggiori si produce un allargamento della zona trattata. Al contrario di quanto avveniva per la profondità, dunque, il crollo della densità di potenza non ha molta influenza sulla larghezza.

In effetti, quando si vuole agire in profondità è essenziale avere un fascio ad energia molto concentrata (per riuscire ad asportare la resina nonostante l'effetto di schermo offerto dalle fibre), mentre in direzione laterale questi fenomeni non sono presenti e prevale l'effetto dimensionale dello spot. Inoltre, sebbene si possa notare che anche la larghezza aumenta con il procedere delle passate, questo effetto va riducendosi in maniera evidente per elevati numeri di passate: si può addirittura intuire una specie di comportamento asintotico (comunemente definito "plateau"), il quale non si verifica per la profondità.

Se invece si prova a fissare la dimensione dello spot di focalizzazione, si può valutare il comportamento della larghezza al variare del livello di potenza impiegato (fig. 5.8). Come prima, per semplicità è mostrato solo il caso dello spot di 9.5 mm, ma gli andamenti si ripetono sostanzialmente analoghi anche per gli altri valori testati. Così come accade per la profondità, anche nel caso della larghezza si può vedere un chiaro aumento di dimensione al crescere della potenza, seppure con una coerenza lievemente inferiore. Queste piccole irregolarità sono presumibilmente dovute a minime perturbazioni dell'ambiente di lavoro, alle quali la larghezza è certamente molto più sensibile rispetto alla profondità (perché molto più esposta).

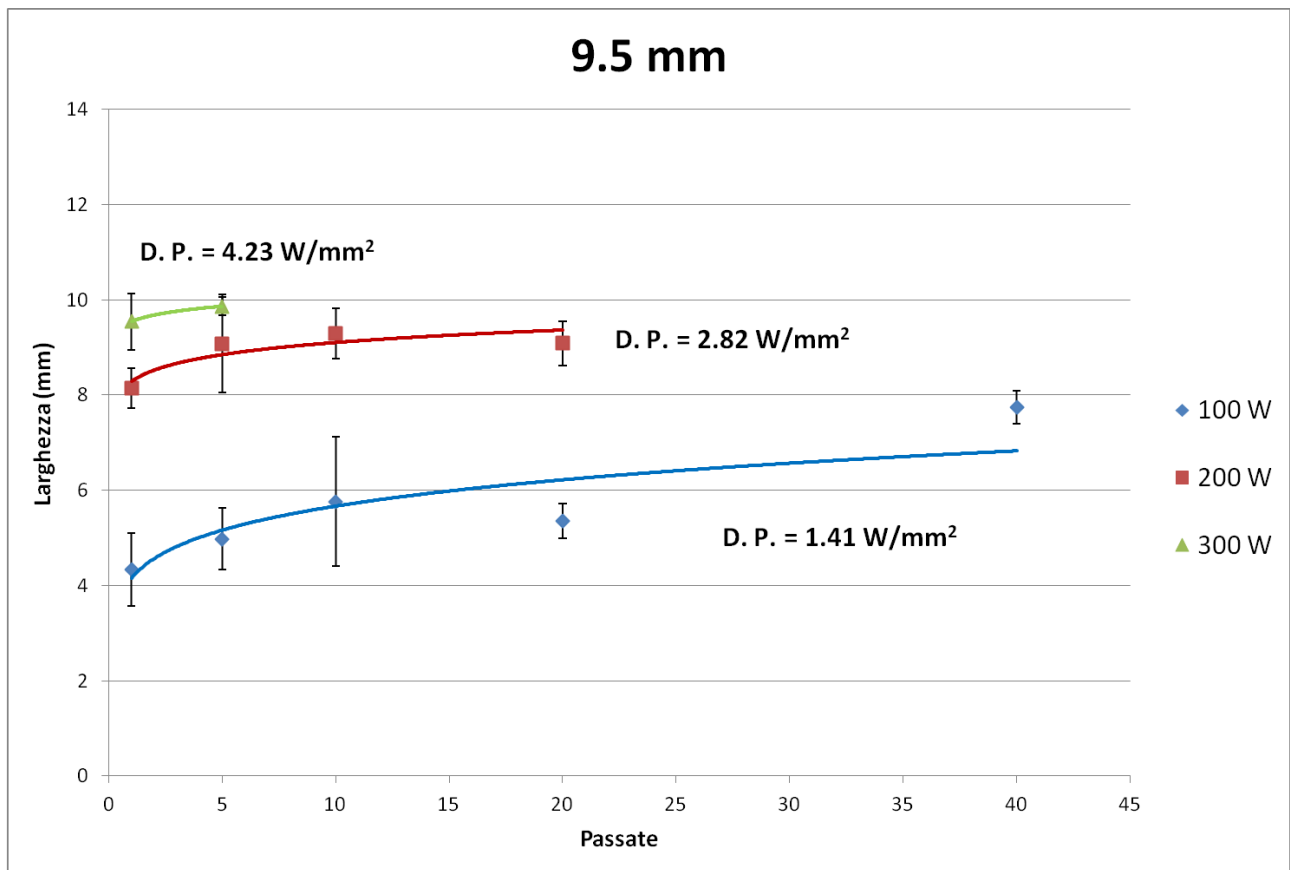
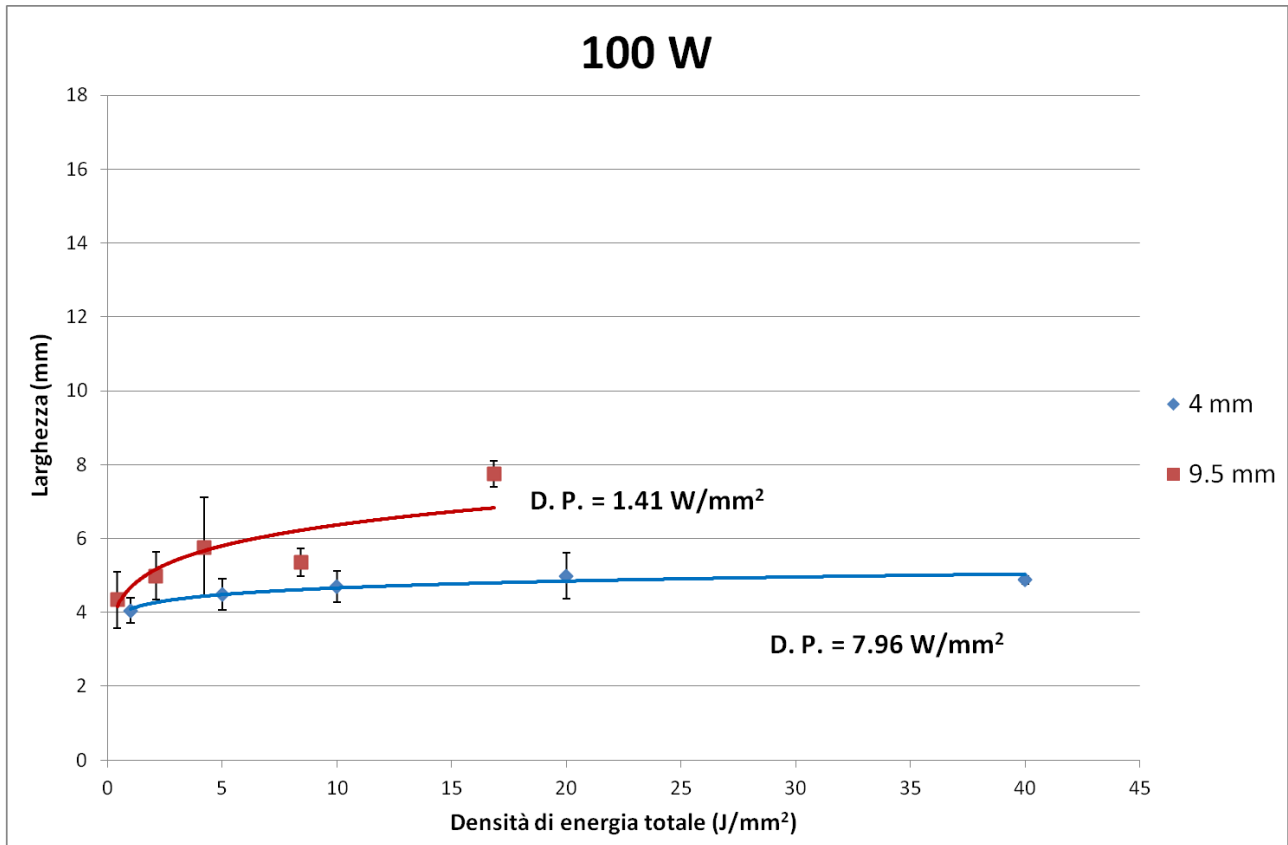


Figura 5.8: Andamento della larghezza in funzione di passate e potenza per lo spot di 9.5 mm

Inoltre, nello stesso grafico si nota di nuovo un fenomeno insolito consistente nel fatto che, come prima, nonostante il diametro dello spot sia pari a 9.5 mm, con una potenza di 100 W si ottengono solchi non più larghi di 4 – 7 mm. Questo inatteso effetto è certamente dovuto al basso livello di potenza in gioco: operando con spot relativamente grandi, solo la porzione centrale del fascio possiede una densità di potenza sufficiente a realizzare l'ablazione, mentre il contributo della parte periferica è trascurabile e in quella zona non si riesce nemmeno ad asportare la resina. A conferma di questa ipotesi, si può osservare che ad una potenza di 200 W la larghezza è maggiore e appena al disotto della dimensione dello spot, mentre a 300 W è ancora più elevata e finalmente pari al diametro dello spot. Ciò, in ultima analisi, significa che una densità di potenza di 4.23 W/mm^2 è il valore minimo per ottenere una ablazione corretta di larghezza pari al diametro dello spot impiegato: per valori inferiori i solchi saranno più stretti dello spot impiegato, mentre per valori superiori saranno più ampi.

Osservando invece come varia la larghezza in funzione della densità di energia totale (come definita al capitolo precedente, v. § 4.5), si possono ottenere ulteriori grafici decisamente interessanti (fig. 5.9).



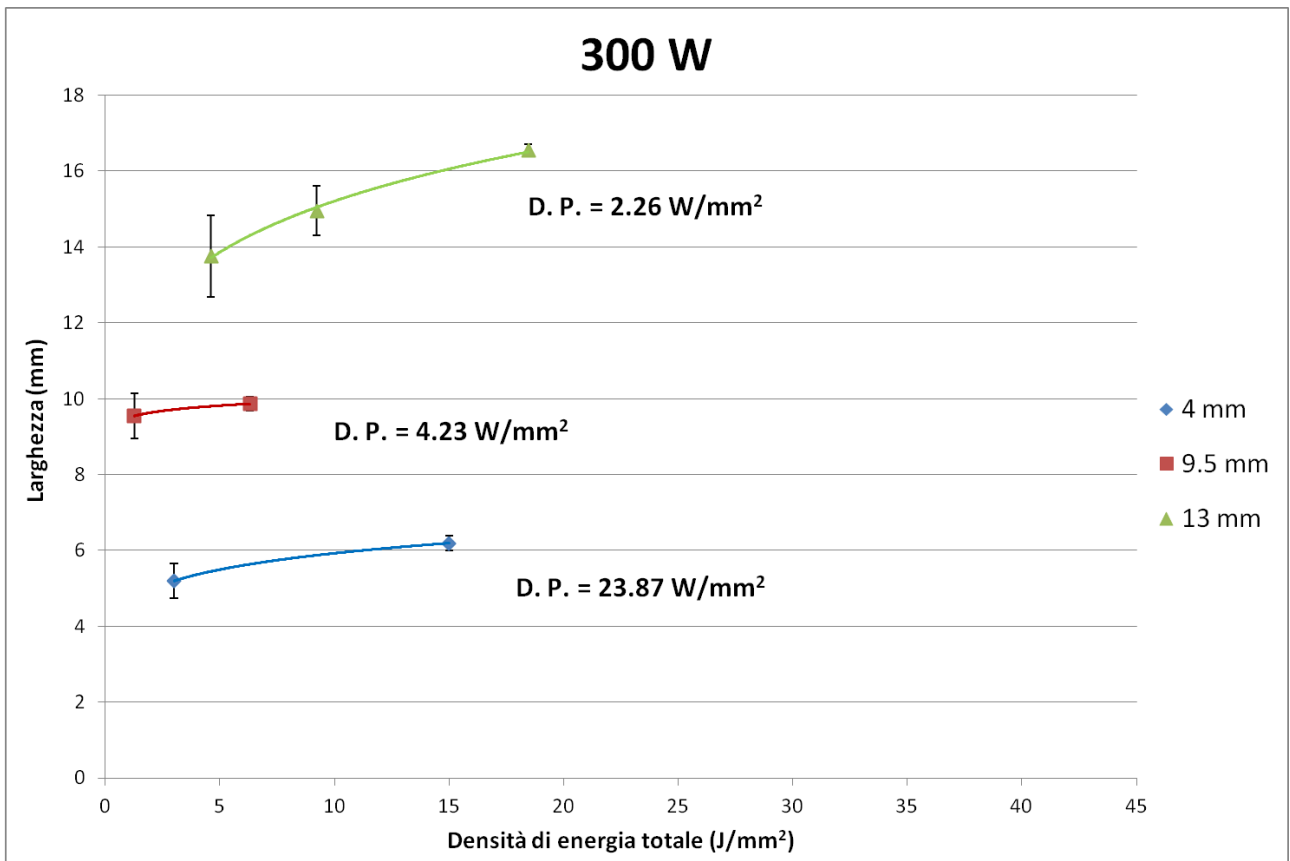
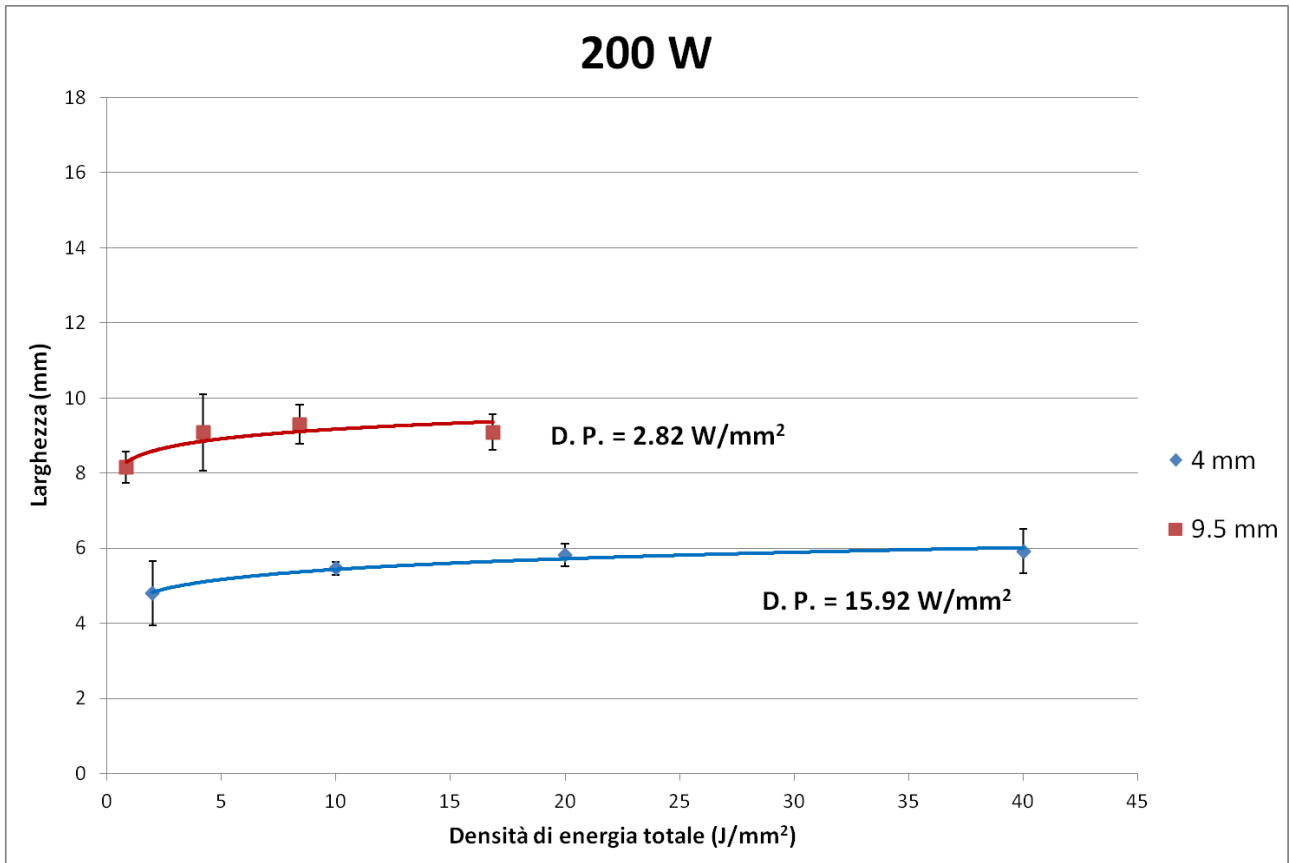


Figura 5.9: Andamenti della larghezza in funzione della densità di energia totale

Innanzitutto, l'incremento di larghezza all'aumentare della densità di energia totale è appena percettibile, o comunque enormemente più ridotto rispetto a quanto avveniva per la profondità. In secondo luogo, il comportamento al variare della dimensione dello spot di focalizzazione risulta, di nuovo, esattamente opposto a quello della profondità. Poiché, come detto in precedenza, la densità di energia totale è già normalizzata rispetto al diametro dello spot, ci si aspetterebbe che non sia visibile alcuna distinzione tra gli andamenti dei diversi spot. Anche stavolta questo non avviene, però in questo caso è la potenza a 100 W ad avere un andamento simile a quello atteso, con le curve dei diversi diametri molto vicine tra loro.

Ciò sicuramente accade, di nuovo, a causa del ridotto livello di potenza in gioco: anche allargando lo spot, solamente il "nucleo" del fascio riesce a concentrare sufficiente energia per far avvenire effettivamente l'ablazione, e la larghezza non cresce di molto. Invece, all'aumentare del livello di potenza le curve dei diversi spot si allontanano sempre più l'una dall'altra. Questo probabilmente avviene in virtù del fatto che, all'aumentare della potenza, sulla sezione del fascio l'energia tende a migrare verso l'esterno, generando così una distribuzione appiattita alla sommità e pressoché uniforme fin quasi ai bordi. In queste condizioni, è chiaro che un netto incremento di diametro dello spot avrà una influenza senza dubbio prevalente, rispetto alla densità di energia, sulla larghezza del solco di ablazione.

Infine, se si prova ad esaminare la relazione che intercorre tra la larghezza e la profondità, si possono fare alcune altre considerazioni abbastanza intuitive (fig. 5.10, esempio del solo caso dei 100 W). In generale, la relazione è evidentemente di proporzionalità diretta: se l'energia è tale da raggiungere profondità più elevate, infatti, sarà anche tale da produrre larghezze maggiori. Nel grafico sono anche indicati i numeri di passate corrispondenti ai vari punti.

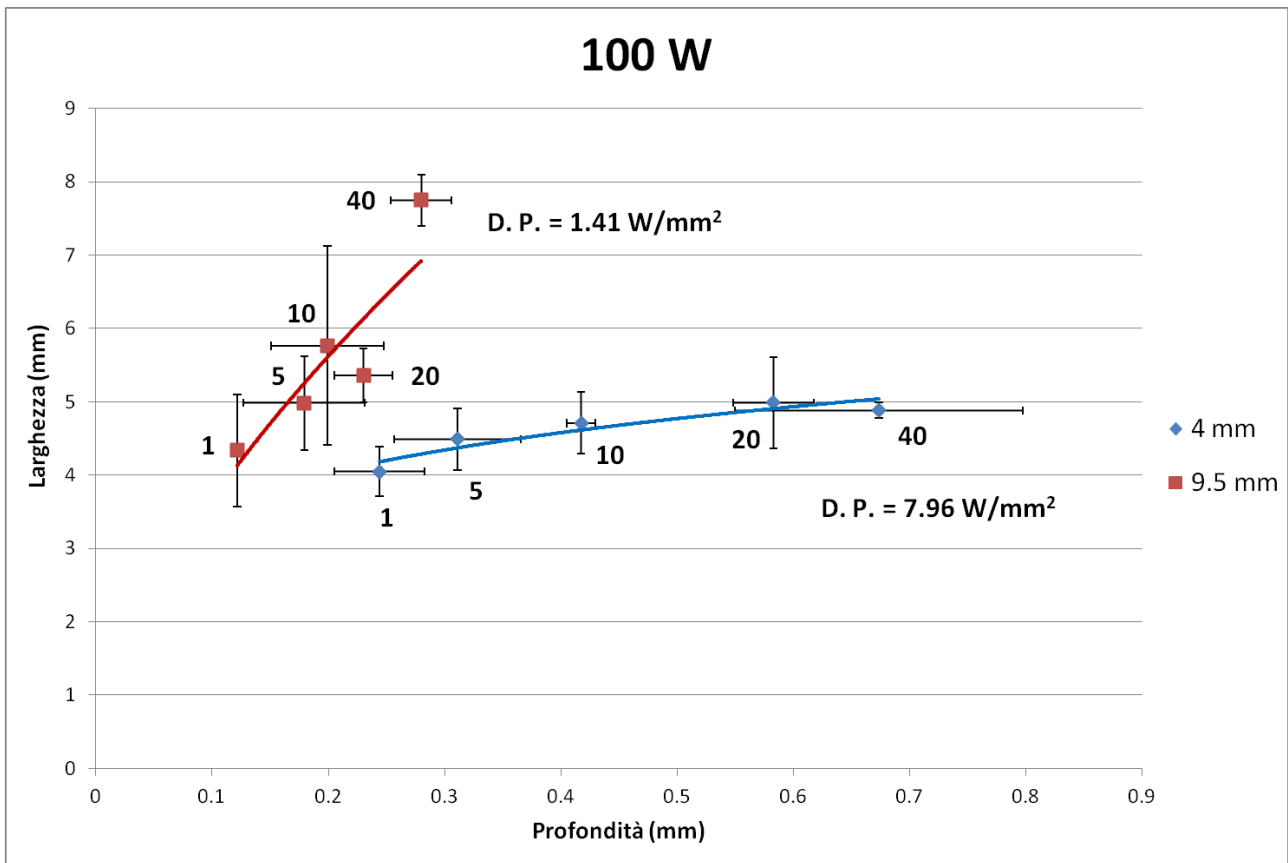


Figura 5.10: Relazione tra larghezza e profondità per il caso dei 100 W

In secondo luogo si può osservare che, incrementando il diametro dello spot di focalizzazione, si ottengono solchi sempre meno profondi ma progressivamente più ampi, cioè i punti tendono a spostarsi gradualmente verso l'alto e verso sinistra nel grafico. Questo risultato non è altro che una conferma di quanto già detto in precedenza: aumentando la dimensione dello spot si provoca un calo della densità di potenza (dunque una riduzione della profondità raggiunta), ma parallelamente si estende l'area trattata (dunque un aumento di larghezza).

Fissando invece il diametro dello spot, e costruendo il grafico larghezza-profondità al variare della potenza, si ottiene ciò che è mostrato in fig. 5.11 (solo per il caso dello spot di 9.5 mm). Di nuovo, si ha una conferma di quanto già detto in precedenza: aumentando la potenza si provoca una crescita della densità di potenza (a parità di dimensione dell'area trattata), dunque un incremento simultaneo di profondità e larghezza. Inoltre, sembra quasi che i due livelli di potenza si pongano sulla stessa curva, la quale naturalmente procede con un comportamento asintotico poiché la

profondità aumenta continuamente, mentre la larghezza ben presto si stabilizza ad un valore prossimo al diametro dello spot utilizzato.

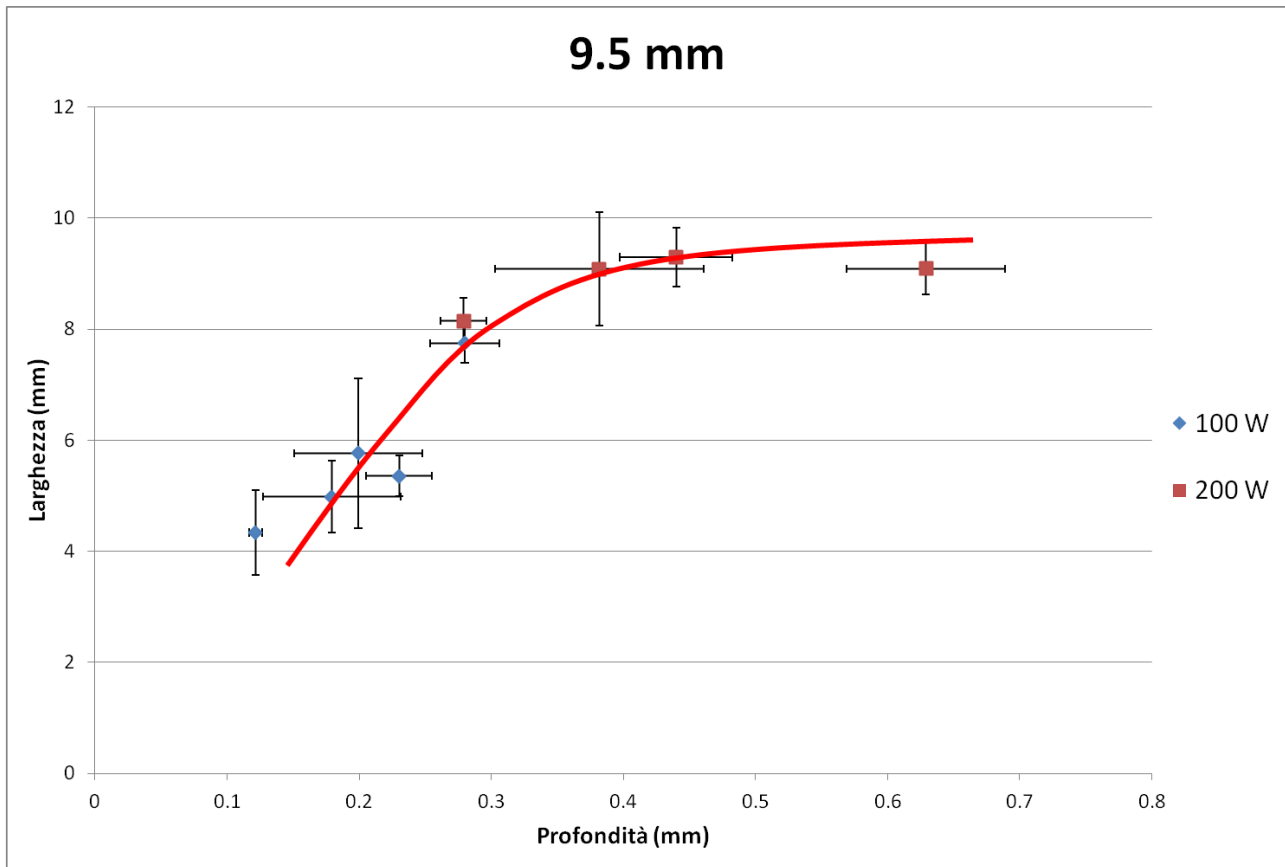


Figura 5.11: Relazione tra larghezza e profondità per il caso dello spot di 9.5 mm

5.2.3 Degrado

E' già stata estesamente spiegata (v. § 5.1) la classificazione dei livelli di degrado delle fibre appositamente concepita per questo studio. Poiché l'obiettivo dell'intera attività è il conseguimento di una ablazione possibilmente ottimale, ne segue che l'assenza di danni sarà l'unico requisito fondamentale nella valutazione dell'accettabilità del livello di degrado. Se si provasse a porre in un grafico le lavorazioni ottenute in modo che siano suddivise in base al degrado, si potrebbe ottenere qualcosa di molto utile ed interessante. Prima di tutto, però, per semplificare la classificazione esposta in precedenza e facilitare l'interpretazione dei dati, è

consigliabile riorganizzare i valori di degrado (mediati sulle tre ripetizioni di ogni prova) in tre semplici classi:

- Degrado Basso: riunisce i livelli di degrado compresi tra 0 e 1;
- Degrado Medio: riunisce i livelli di degrado compresi tra 1.1 e 3;
- Degrado Elevato: riunisce i livelli di degrado compresi tra 3.1 e 5.

Fuori da questa classificazione rimane ancora la categoria “Nessun Effetto” in cui, come già accennato in precedenza, rientrano quei i parametri con i quali non si riesce nemmeno ad ottenere la rimozione della sola matrice. A questo punto, è possibile inserire in un grafico i dati così suddivisi, ottenendo ciò che è mostrato in fig. 5.12. Si può osservare, innanzitutto, una suddivisione piuttosto chiara in zone di lavoro associate all’entità del danneggiamento delle fibre: il degrado aumenta sia al crescere della densità di potenza, che al crescere del tempo di interazione. In realtà questo fenomeno è abbastanza intuitivo poiché è dovuto al fatto che, in entrambi i casi, si ha un incremento dell’energia complessivamente fornita al materiale (e dunque un danno maggiore).

Poiché, come detto, lo scopo dell’intero lavoro è di ottenere la asportazione della resina senza rovinare le fibre, l’unica area di interesse sarà quella corrispondente al degrado di livello basso, mentre le altre sono da considerare inaccettabili. Inoltre, come si vede, le zone di interesse sul grafico sono sostanzialmente due: alte densità di potenza e bassi tempi di interazione, oppure alti tempi di interazione e basse densità di potenza.

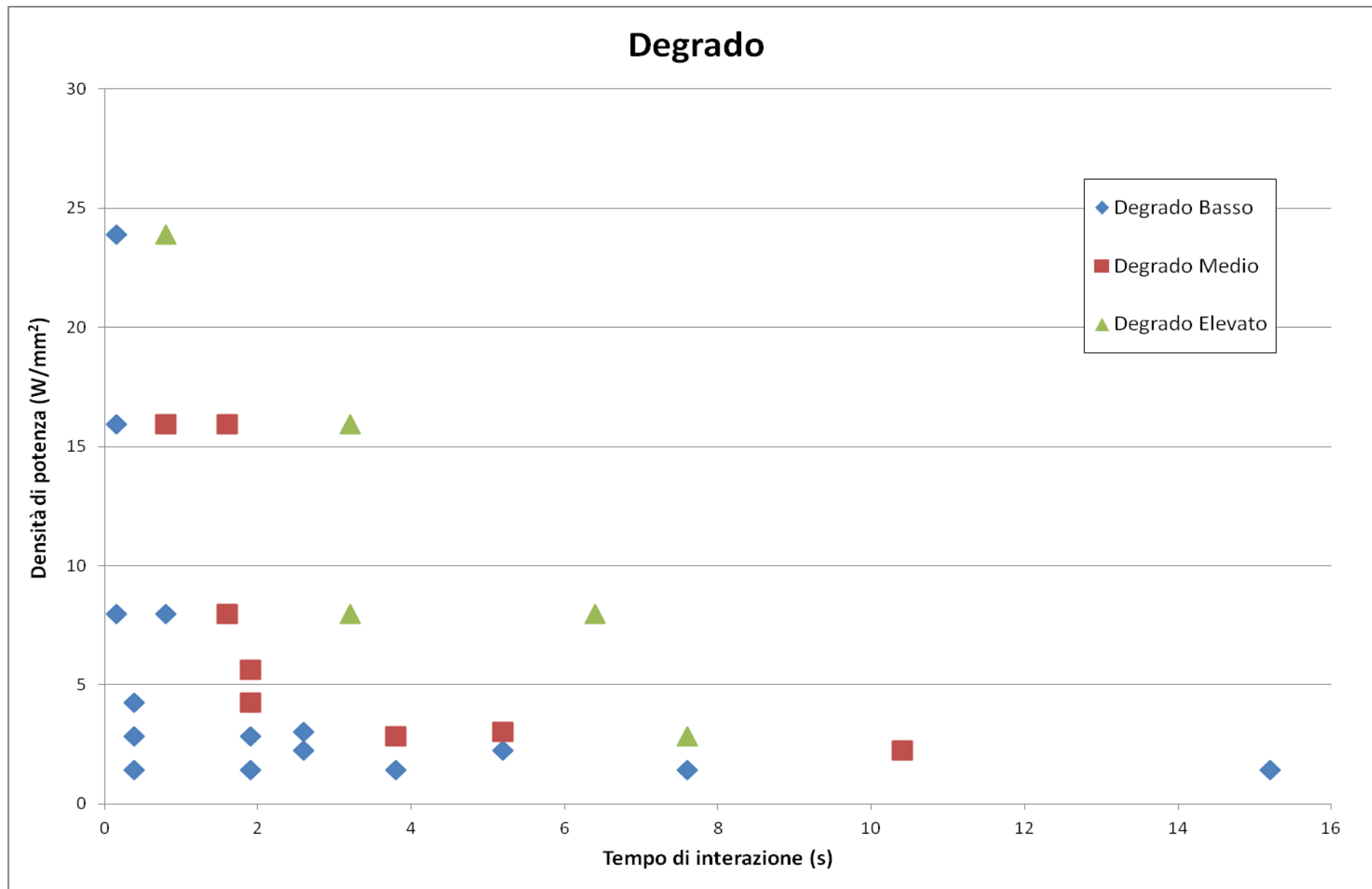


Figura 5.12: Aree di lavoro ottenute in base al livello di degrado

5.2.4 Temperatura

Come spiegato al capitolo precedente (v. § 4.4.2), durante le lavorazioni è stata costantemente monitorata anche la temperatura. Ciò è stato possibile grazie ad un pirometro puntato sempre al centro dei solchi di ablazione, cioè la zona che in teoria subisce maggiormente l'influenza del fascio senza essere soggetta a rilevanti effetti di bordo. Nonostante questo accorgimento, in realtà le temperature misurate non sono da considerare valori certi, ma solo indicazioni qualitative, poiché sussistono una serie di incertezze: il pirometro è un misuratore senza contatto, dunque molto sensibile a variazioni dell'ambiente, e il flusso di aria d'assistenza impiegato può avere ulteriormente influito su di esso, come spiegato meglio più avanti (v. § 5.3.2). Per prima cosa, al fine di comprendere in modo chiaro il tipico andamento di temperatura che si verifica durante un processo di ablazione multi-passata, si riporta in fig. 5.13 un grafico esemplificativo temperatura-tempo relativo ad un generico campione (in particolare una lavorazione a 100 W, con spot di 9.5 mm e 10 passate).

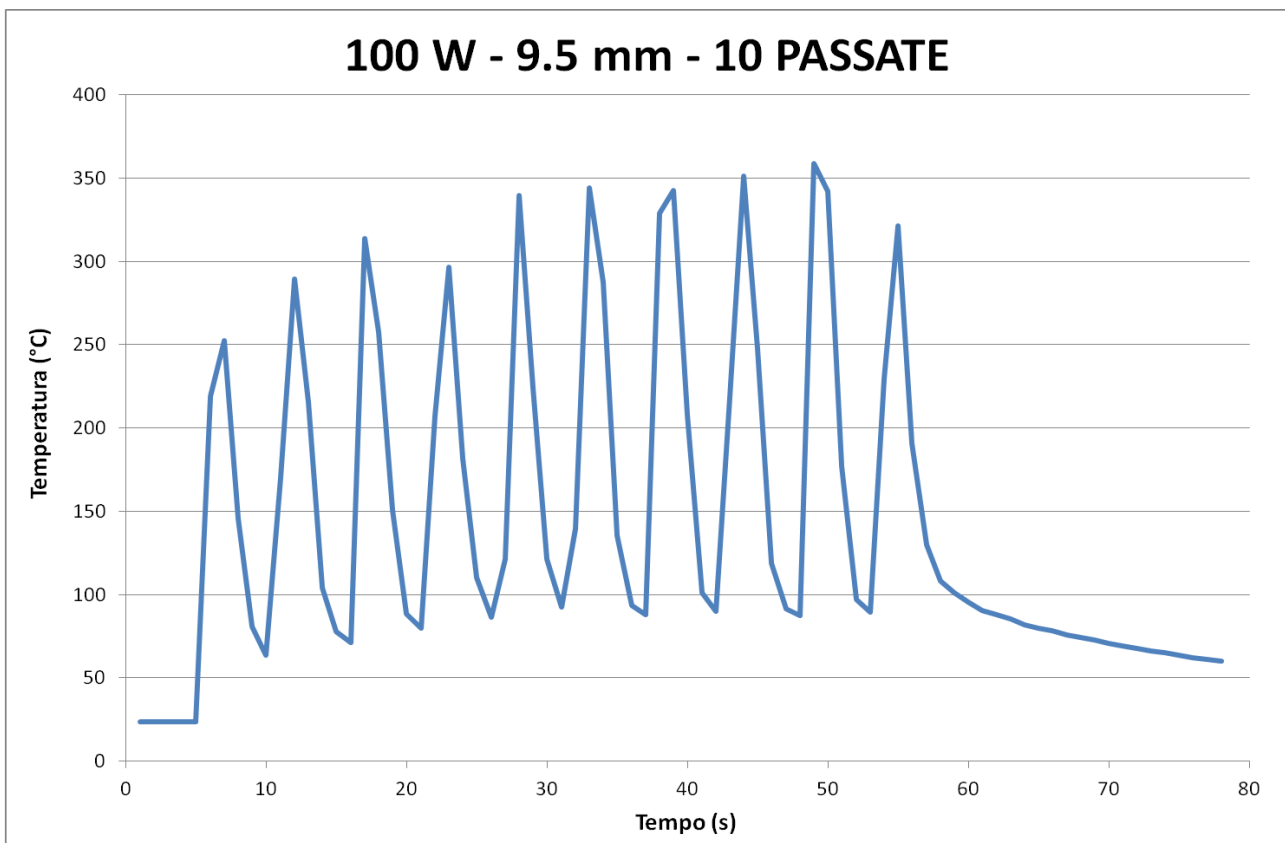


Figura 5.13: Esempio di andamento della temperatura durante il processo

Si nota immediatamente che con il procedere delle passate il materiale si riscalda progressivamente, e sia i picchi che i ventri della curva aumentano pian piano la loro temperatura. Questo fenomeno, tuttavia, va smorzandosi piuttosto rapidamente nel tempo, tanto che in corrispondenza delle ultime passate i valori dei massimi e dei minimi sono pressoché stabilizzati.

Confrontando tra loro i diversi livelli di potenza, a parità di diametro dello spot e numero di passate, si ottiene invece un diagramma come quello di fig. 5.14 (nel quale, per semplicità di rappresentazione, sono considerate solo le temperature di picco). Come ci si potrebbe aspettare, all'aumentare della potenza in gioco si produce un visibile incremento delle temperature massime, a causa del fatto che la densità di potenza agente sul materiale cresce. Inoltre, si nota di nuovo facilmente che l'incremento di temperatura con il procedere delle ripetizioni tende velocemente ad estinguersi, fino ad avere un comportamento che già in precedenza è stato definito "plateau".

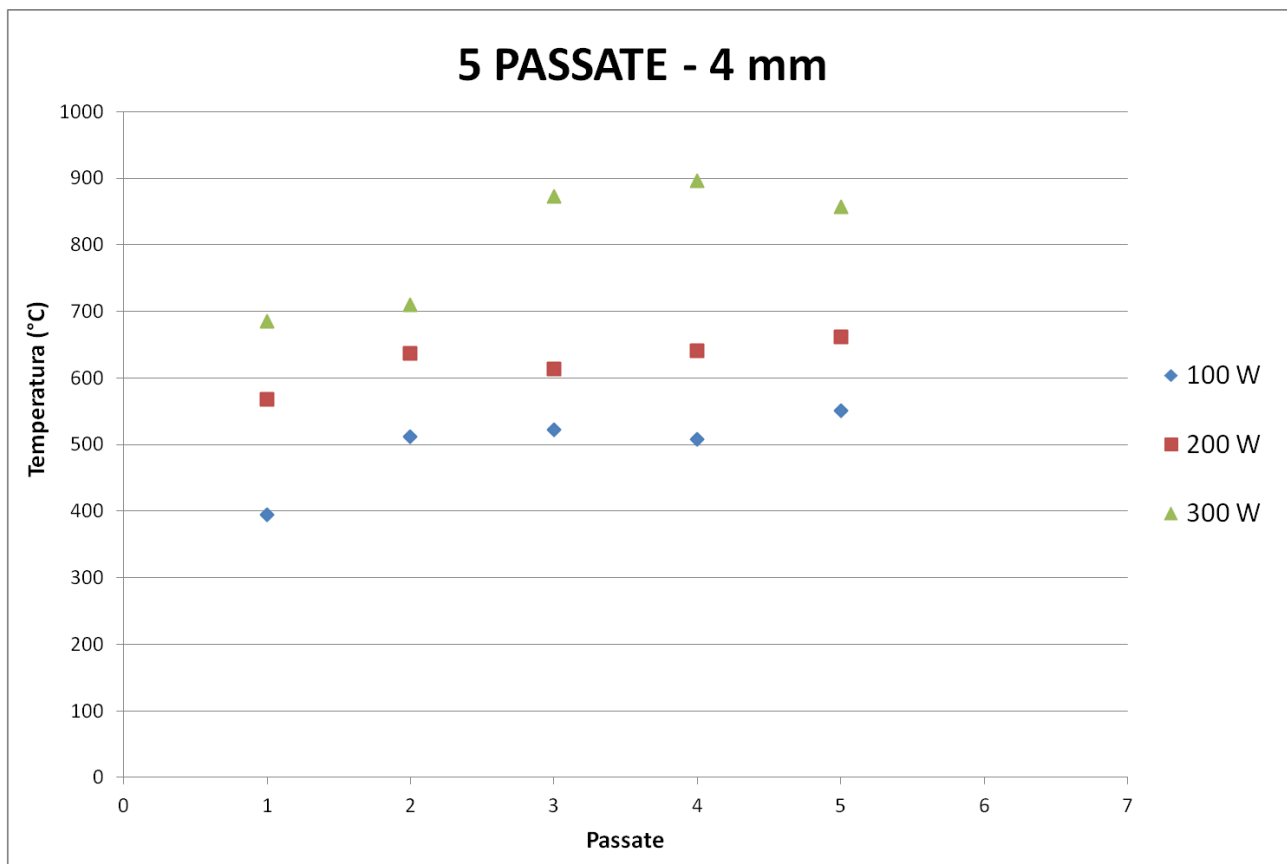


Figura 5.14: Temperature di picco per i differenti livelli di potenza

Se invece si vuole fissare il livello di potenza ed osservare il comportamento delle temperature al variare delle dimensioni dello spot di focalizzazione, si può fare riferimento all'esempio riportato in fig. 5.15. Nuovamente, si ha la conferma di un fenomeno atteso: all'aumentare del diametro dello spot le temperature massime tendono via via a ridursi, poiché cala nettamente la densità di potenza fornita al campione. Come indicato sul grafico, inoltre, di pari passo con le temperature si riduce ovviamente anche il degrado delle fibre. Si noti, infine, che emerge ancora il cosiddetto comportamento "a plateau".

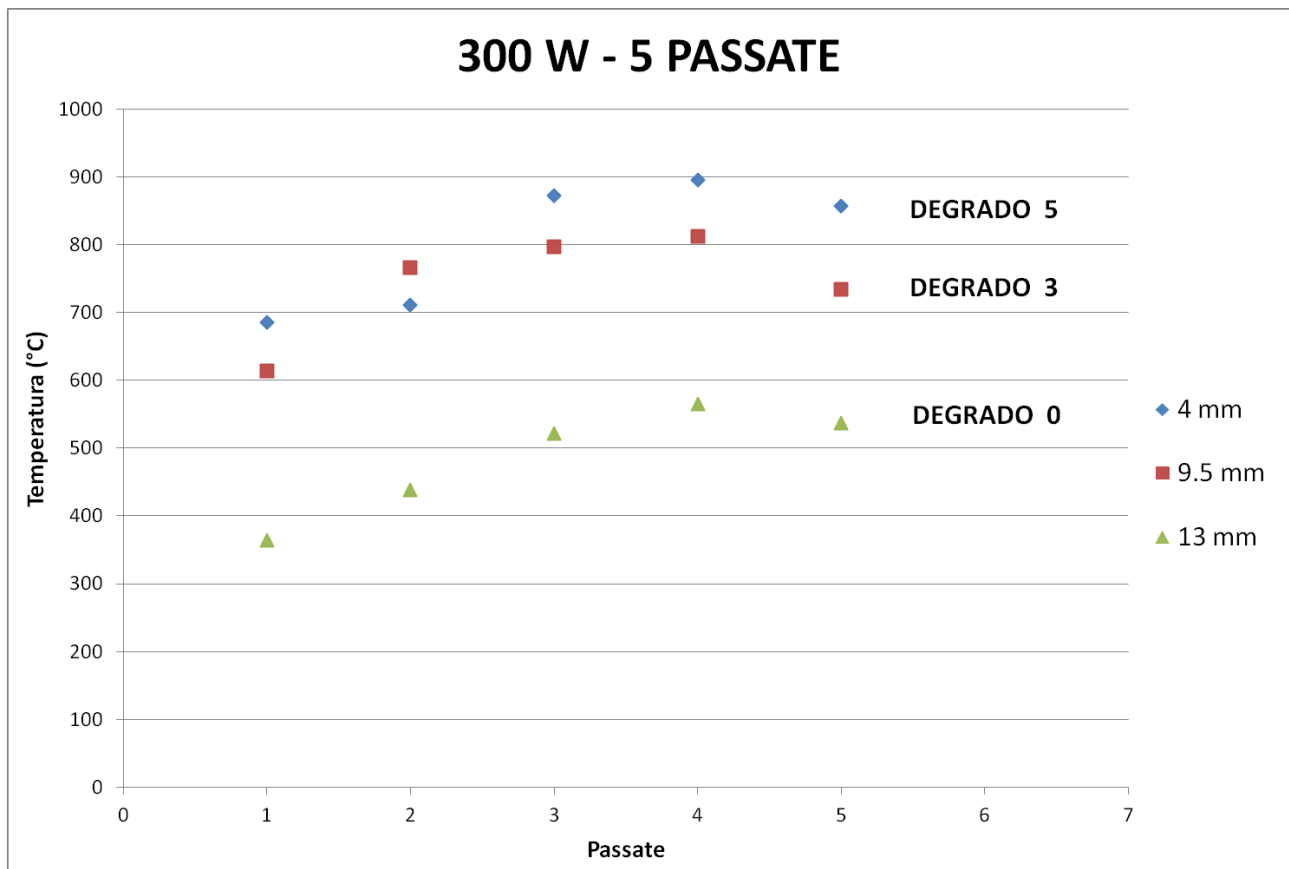


Figura 5.15: Temperature di picco per i differenti diametri dello spot di focalizzazione

Si osservi ora un ultimo ma interessante fenomeno. Monitorando la temperatura durante lo svolgimento del processo ci si è accorti che, in molte delle lavorazioni con i più alti livelli di degrado delle fibre, essa manifesta un comportamento apparentemente insolito, un esempio del quale è mostrato in fig. 5.16. Con le prime

passate la temperatura aumenta gradualmente mentre il materiale si riscalda, dopodiché essa rimane approssimativamente stabile per tutta la durata della parte intermedia. Procedendo verso le ultime passate, tuttavia, è impossibile non notare un deciso crollo della temperatura.

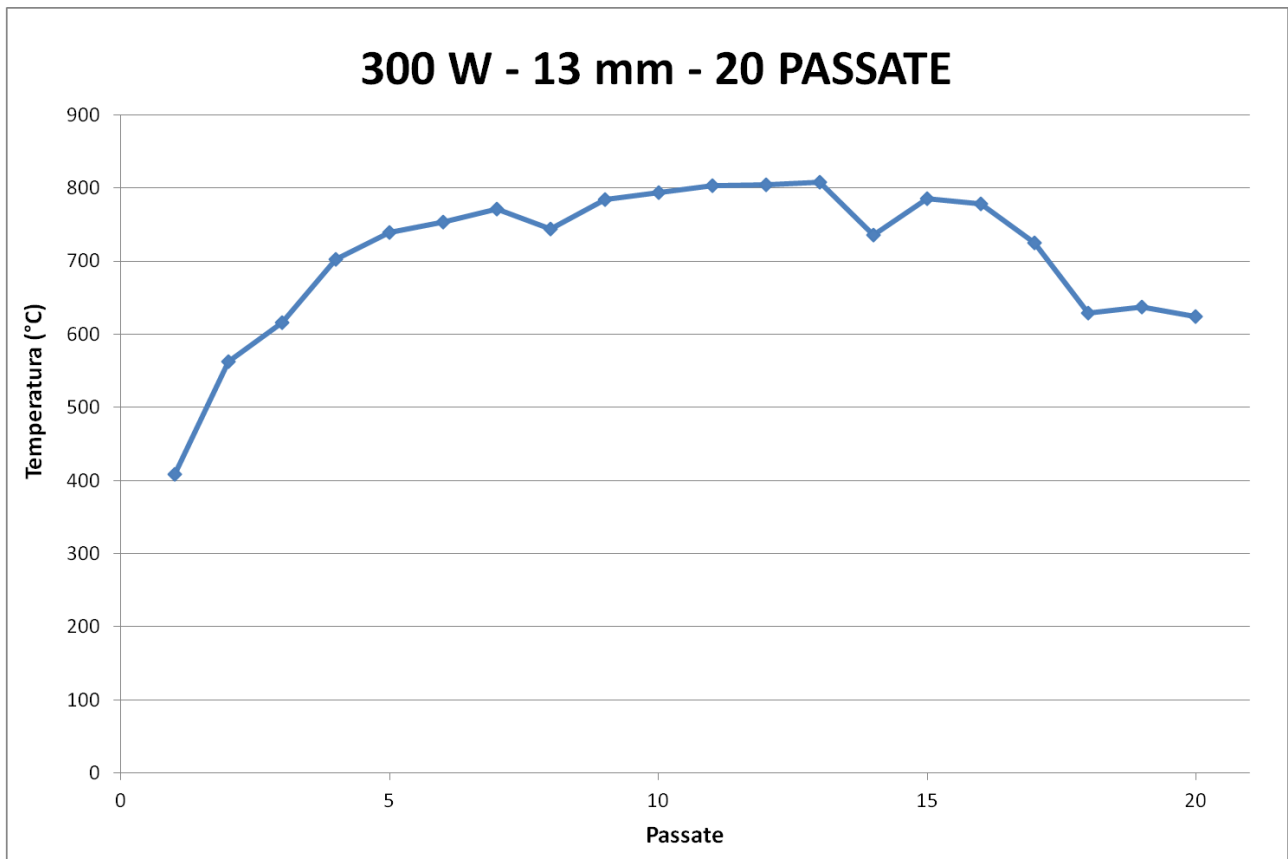


Figura 5.16: Esempio di fluttuazione delle temperature di picco a causa del degrado delle fibre

Poiché questo fenomeno è stato rilevato esclusivamente per i casi di degrado più elevato, mentre è completamente assente nelle situazioni a degrado basso, la possibile spiegazione di un comportamento di questo genere è senza dubbio da ricercare proprio nel danneggiamento stesso delle fibre. Quando queste ultime vengono danneggiate in maniera eccessiva, infatti, possono subire una vera e propria vaporizzazione, a seguito della quale si allontanano poi dalla zona di lavoro asportando una notevole quantità di calore (che trattengono sottoforma di calore latente di vaporizzazione). Tutto ciò, ovviamente, porta ad una netta riduzione del

calore complessivo contenuto nel campione, e dunque ad un calo della sua temperatura.

Infine, in alcune delle lavorazioni che manifestano questo crollo di temperatura si è anche osservato un ulteriore aspetto di questo particolare fenomeno. Come si può notare nell'esempio riportato in fig. 5.17, talvolta il crollo avviene con un certo anticipo (nel caso rappresentato dopo le prime 10 passate), ma proseguendo con il processo si intuisce poi una lenta risalita della temperatura.

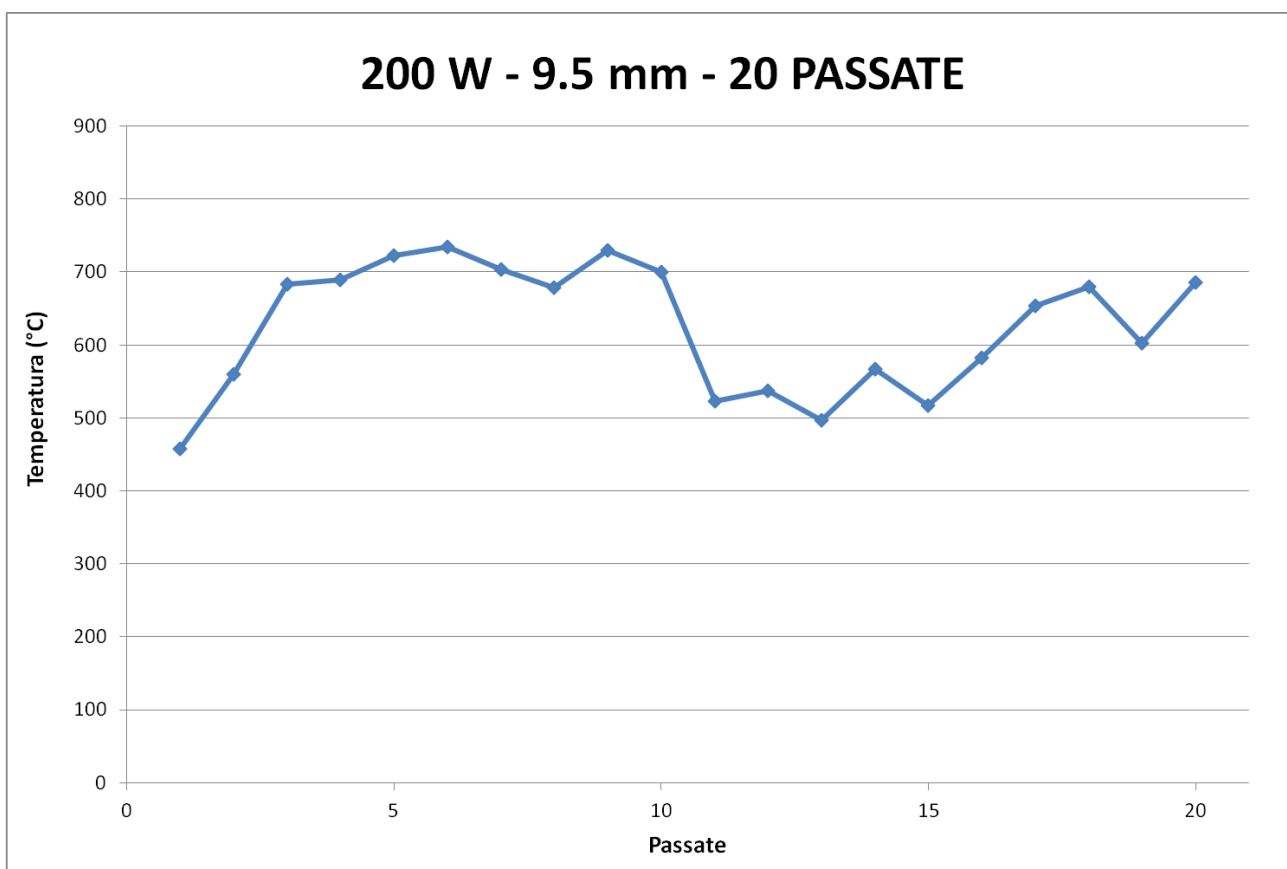


Figura 5.17: Esempio di fluttuazione delle temperature di picco a causa del degrado delle fibre

Ciò è quasi certamente da intendersi come una conferma dell'ipotesi della vaporizzazione delle fibre: la risalita, infatti, probabilmente indica che un intero strato di fibre è stato completamente vaporizzato, così da scoprire la lamina sottostante la quale, a sua volta, riprende poi lentamente a riscaldarsi nella maniera consueta. Una schematizzazione del processo appena descritto è data in fig. 5.18.

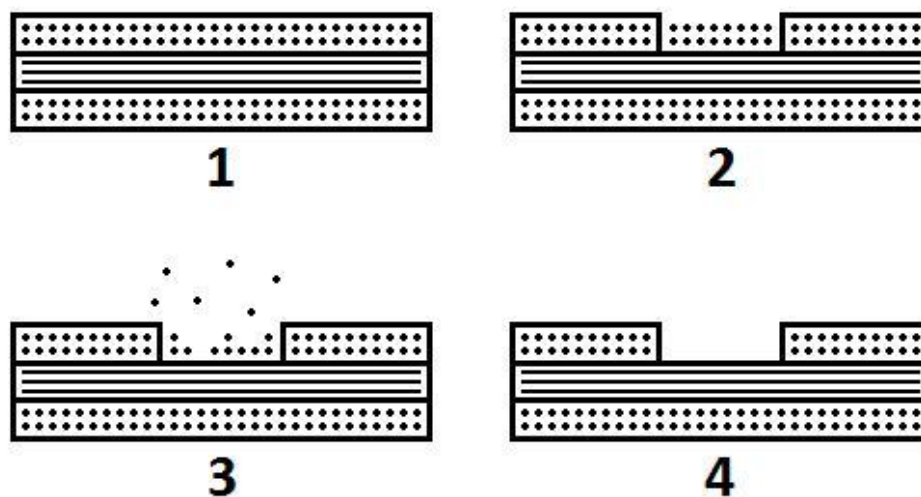


Figura 5.18: *Schematizzazione del processo di vaporizzazione delle fibre, che asporta calore ed eventualmente scopre le lamine inferiori*

5.3 CONSIDERAZIONI AGGIUNTIVE

Prima di concludere la trattazione e tirare le fila dell'intera attività qui presentata, è fondamentale fare alcune ultime osservazioni in merito alle lavorazioni eseguite. In particolare, rimangono ancora da chiarire alcuni aspetti relativamente ad eventuali indicazioni che possono emergere da questo studio sui parametri ottimali di lavoro, e relativamente all'utilizzo ed alla funzione dell'aria compressa durante il processo.

5.3.1 Indicazioni sui Parametri Ottimali

Quando si è discusso dei risultati delle prove in termini di degrado delle fibre (v. § 5.2.3), si è precisato il fatto che solo le lavorazioni i cui parametri generano degrado basso sono da considerare accettabili, in virtù dell'obiettivo di *laser-based composite repair* che fa da sfondo a questa tesi. In realtà, però, è necessario a questo proposito distinguere nettamente il concetto di "accettabile" da quello di "ottimale". In questo contesto si potrebbe definire una lavorazione "accettabile" se non crea particolari problemi, mentre "ottimale" se si rivela effettivamente utile e ben funzionante.

Tra tutte le combinazioni di parametri accettabili, dunque, non tutte possono essere definite realmente ottimali: per quanto una ablazione possa dare un risultato accettabile in termini di degrado delle fibre, infatti, se la profondità che raggiunge è irrisoria essa si rivelerà alquanto inutile da un punto di vista applicativo. Da tutto ciò segue che non tutti i punti a degrado basso in fig. 5.12 saranno da considerare ottimali, poiché dal grafico non si evince alcuna informazione sulla profondità. Per verificare in maniera più chiara il legame tra degrado e profondità, quindi, si può pensare di osservare il diagramma di fig. 5.19, nel quale è stata impiegata la stessa catalogazione in tre classi utilizzata in precedenza.

Anche in questo caso si può notare una suddivisione piuttosto chiara in aree di lavoro, ma ciò che più conta è la relazione che intercorre tra queste zone e la profondità: come si vede, se si vuole essere sicuri di mantenere un basso livello di degrado delle fibre (in modo che il risultato sia accettabile), si deve pagare il prezzo di una profondità di ablazione massima raggiungibile non superiore a circa 700 μm . Questo valore ottenuto non è affatto irrisorio, anzi è sicuramente significativo, non solo per applicazioni di *laser-based composite repair*, ma anche per eventuali applicazioni di *surface preparation* (preparazione delle superfici) in un contesto di incollaggio di materiali compositi.

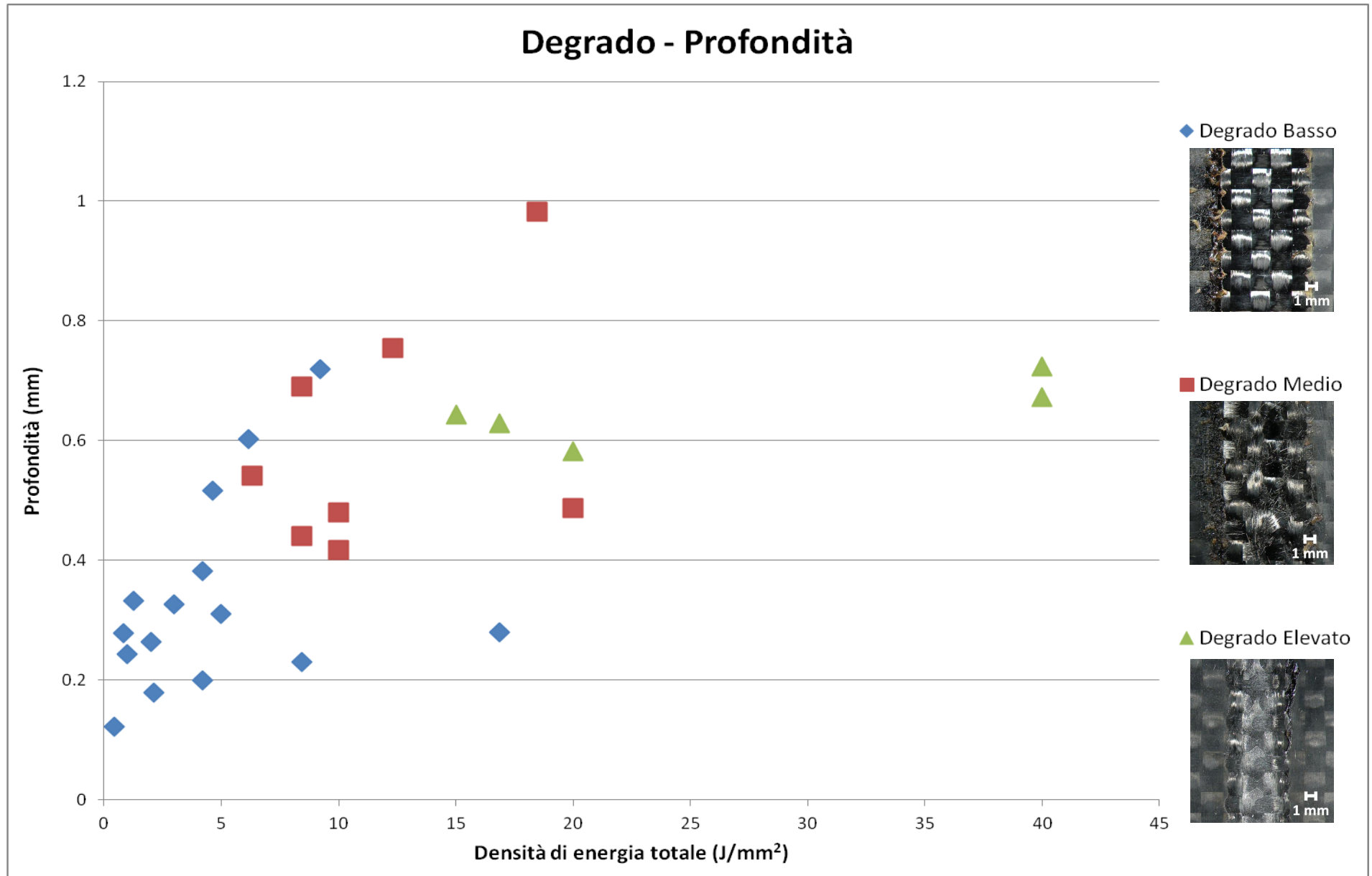


Figura 5.19: Relazione tra la profondità raggiunta e il degrado delle fibre

Nella specifica circostanza della attività qui esposta, le combinazioni di parametri di processo che corrispondono ai punti a maggiore profondità tra quelli a degrado basso sono quelle riportate in tab. 5.1. Come si può vedere, si tratta sostanzialmente dei casi a potenza elevata, spot di grandi dimensioni e numeri di passate non eccessivi (ma comunque superiori ad uno). Si noti inoltre che questi punti, nello specifico, sul grafico di fig. 5.12 si trovano nella zona a basse densità di potenza e tempi di interazione medio-alti: è dunque questa, apparentemente, la zona di lavoro più promettente per massimizzare le profondità raggiunte (in eventuali studi futuri).

POTENZA	SPOT	PASSATE	PROFONDITA'
300 W	13 mm	10	0.7193 mm
400 W	13 mm	5	0.6023 mm
300 W	13 mm	5	0.5170 mm

Tabella 5.1: *Combinazioni ottimali di lavoro*

Queste indicazioni numeriche non hanno naturalmente alcuna pretesa di valore quantitativo concreto, bensì sono da considerare solamente come indicazioni qualitative da utilizzare come punto di partenza per orientarsi in eventuali studi futuri sull'argomento. Inoltre, nel caso si sia disposti ad accettare un livello di danneggiamento anche maggiore, è evidente che si può sperare in una profondità ancora più elevata (fino ad un ordine di grandezza di circa 1 mm). Nell'ottica di

5.3.2 Problematiche del Flusso d'Aria

Come già accennato (v. § 4.4.2), tutte le lavorazioni di ablazione effettuate sono state eseguite in presenza di un getto di aria compressa diretto sul campione. Le funzioni che questo flusso svolge non erano affatto chiare all'inizio dell'attività, ma a seguito dei risultati delle prove è stato possibile fare qualche considerazione qualitativa al riguardo. E' essenziale comunque ripetere che, non essendo stati individuati in

letteratura valori di riferimento per orientarsi e non essendo sempre riusciti a posizionare in maniera precisa l'ugello per tutte le prove, le deduzioni esposte di seguito non possono essere considerate assodate, bensì costituiscono solamente ipotesi più o meno plausibili.

Un getto di questo genere ha innanzitutto una funzione di *copertura*, cioè di protezione della piccola area di lavoro in cui il fascio e il materiale interagiscono tra loro. Inoltre, poiché il tubo è appositamente orientato in direzione del condotto di aspirazione dei fumi, il flusso può anche coadiuvare l'aspirazione stessa amplificandone l'efficacia. Questi primi due aspetti sono però quelli più ovvi. Decisamente più interessanti, invece, sono le osservazioni sperimentali in merito ad una eventuale influenza dell'aria sulla qualità delle lavorazioni risultanti.

Prima di tutto, si considerino ancora alcune questioni relative al degrado delle fibre: il grafico di fig. 5.12 ottenuto in questa attività è del tutto analogo a quello, proveniente dal lavoro di R. Negarestani^[39], già mostrato più volte nel testo (v. fig. 3.3 e fig. 4.10). Uniformando le unità di misura e ponendoli uno accanto all'altro (fig. 5.20), tuttavia, si può osservare una cosa a dir poco inaspettata: confrontando i valori lungo gli assi, tutte le combinazioni di parametri impiegate ricadono nell'area delimitata dalla linea rossa, ossia palesemente valide per la vaporizzazione della resina e senza minimamente avvicinarsi alla zona di vaporizzazione delle fibre di carbonio. In queste condizioni, appare dunque quasi assurdo che moltissime delle lavorazioni eseguite abbiano prodotto un notevole degrado delle fibre.

La causa di questo strano comportamento è probabilmente da imputare proprio alla presenza del getto d'aria. In teoria un flusso gassoso dovrebbe avere anche una funzione di raffreddamento della zona di lavoro, poiché favorisce sensibilmente l'asportazione del calore. Di conseguenza, come già accennato (v. § 5.2.4) la presenza del getto ha sicuramente influito sulle misurazioni di temperatura effettuate con il pirometro: il flusso d'aria, asportando calore, potrebbe infatti avere causato la rilevazione di temperature più basse rispetto a quelle effettive, dando quindi una indicazione probabilmente fuorviante sul livello di degrado delle fibre.

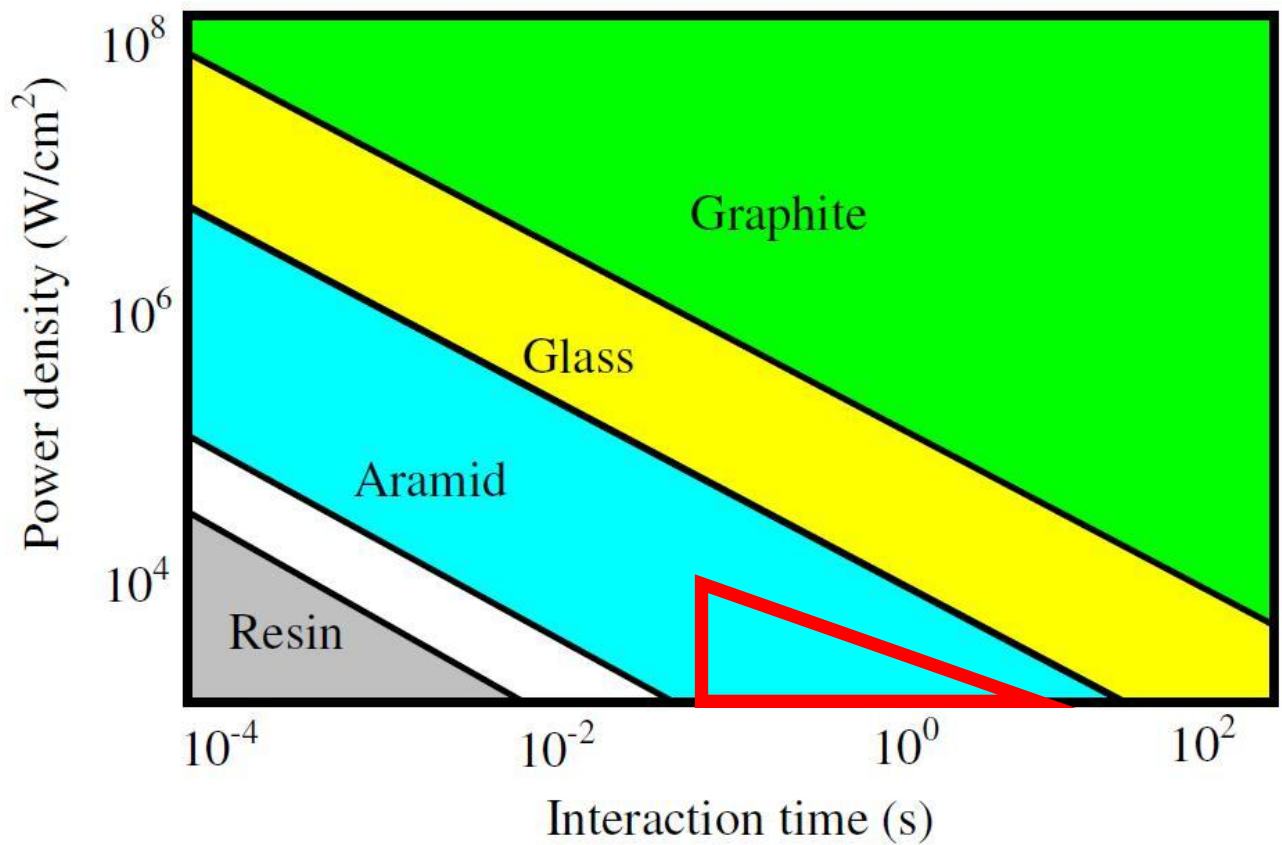
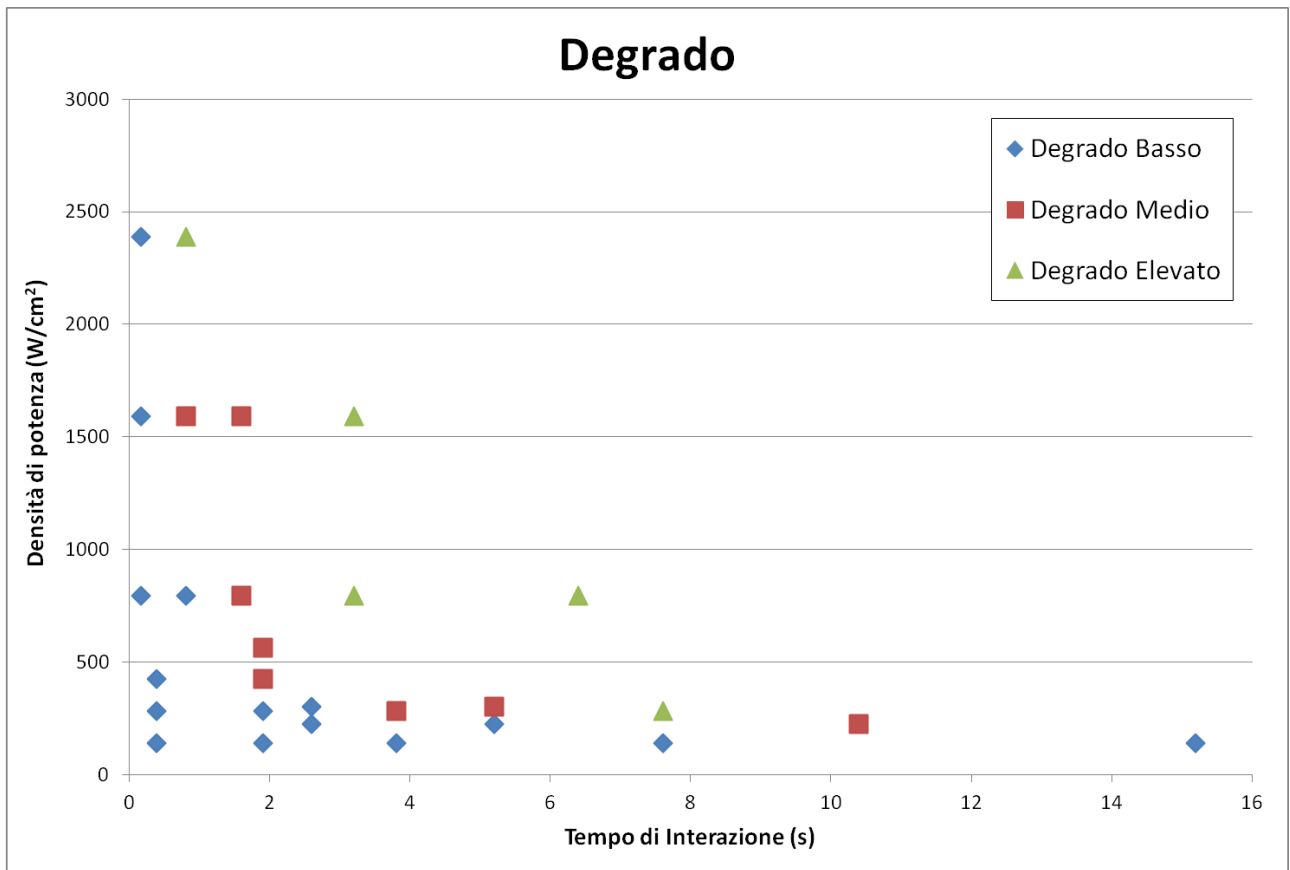
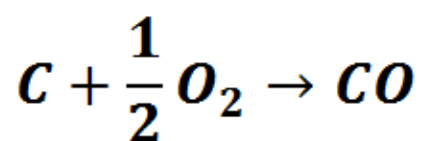
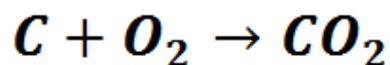


Figura 5.20: Confronto tra il degrado effettivamente ottenuto e il degrado teoricamente atteso

Inoltre, la funzione di raffreddamento è solitamente svolta molto bene nel caso si utilizzino gas inerti, come ad esempio l'azoto o l'argon, ma l'aria non fa parte di questa famiglia: l'aria contiene infatti circa il 21% di ossigeno, il quale notoriamente è una sostanza molto reattiva e comburente. Di conseguenza, è plausibile che l'ossigeno contenuto nel flusso d'aria abbia reagito facilmente con il materiale, causando un consistente effetto ossidante e producendo così un incremento della temperatura oltre la norma. Questo anomalo aumento di temperatura, naturalmente, avrà poi generato molti più problemi alle fibre di quanto in teoria ci si sarebbe aspettato basandosi sui soli parametri energetici.

Una possibile conferma della validità di questa ipotesi proviene ancora una volta dalla letteratura, in particolare da uno studio compiuto da Negarestani, Li, Sezer, Whitehead, e Methven^[40]. Nella loro attività, volta ad ottimizzare gli effetti del flusso di assistenza, sono stati utilizzati tre differenti gas: ossigeno puro, azoto puro ed una miscela con 50% di ossigeno e 50% di azoto. Ciò che ne è emerso è innanzitutto che l'ossigeno favorisce visibilmente il processo di decomposizione del materiale composito a causa delle reazioni esotermiche a cui dà origine, le quali però permettono il vantaggio di incrementare il tasso di asportazione. L'azoto, invece, essendo inerte non provoca alcun tipo di reazione, ed anzi svolge ottimamente la funzione di raffreddamento riducendo sensibilmente i danni termici di lavorazione. In un ambiente ossidativo, dunque, la decomposizione delle fibre nei CFRP è estremamente favorita, a causa dal verificarsi delle due seguenti reazioni fortemente esotermiche:



In fig. 5.21 sono riportati alcuni esempi di effetti della presenza di ossigeno sui risultati di una lavorazione di taglio laser. Come si può vedere, in effetti, maggiore è la quantità di ossigeno presente nel gas d'assistenza, maggiori risultano i danni termici prodotti sui bordi (principalmente sottoforma di pull-out delle fibre). Allo stesso tempo, tuttavia, si osserva anche un incremento del tasso di asportazione del materiale, il che è un aspetto positivo. In conclusione, poiché l'aria impiegata nell'attività sperimentale di questa tesi non è altro che una miscela di azoto e ossigeno (circa 79% del primo e 21% del secondo) ne segue subito una conferma dell'ipotesi precedentemente spiegata.

Riassumendo, il materiale composito è soggetto ad una decomposizione più rapida e intensa se si utilizza come flusso d'assistenza l'aria piuttosto che un gas inerte, poiché la reattività dell'ossigeno fa sì che i danni provocati alle fibre siano superiori a quelli che ci si dovrebbe attendere a livello teorico. Tutto questo fornisce, in ultima analisi, una giustificazione al fatto che le fibre risultino danneggiate anche quando i parametri energetici si mantengono lontani dai valori critici per le fibre stesse.

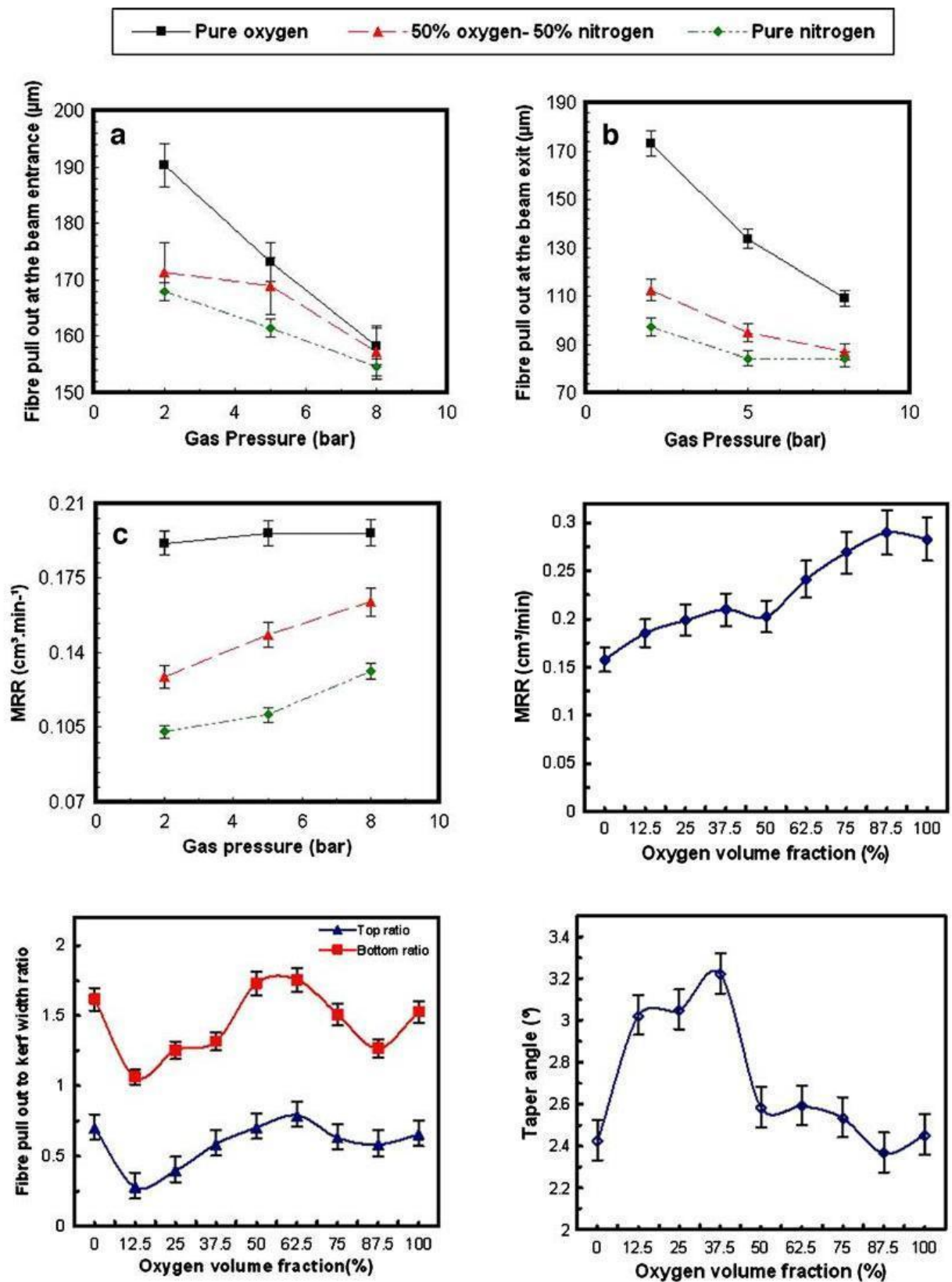


Figura 5.21: *Varie relazioni tra la quantità di ossigeno presente nel gas d'assistenza e le caratteristiche della lavorazione*

Si consideri ora un'ultima questione in merito al flusso d'aria di assistenza: il getto impiegato possiede una pressione di circa 8 bar, cioè un valore molto alto rispetto ai tipici flussi lenti di copertura, e questo consente di fare due considerazioni fondamentali. La prima osservazione è che un getto così potente produce sicuramente una sensibile asportazione meccanica di quelle fibre, libere dalla resina, presenti nella zona lavorata. Di conseguenza l'asportazione di fibre, e più in generale il degrado, potrebbero in alcuni casi essere stati sovrastimati: il danno valutato, cioè, potrebbe essere superiore a quello realmente causato dal solo processo di ablazione.

La seconda osservazione riguardo alla potenza del flusso d'aria, invece, è che in queste condizioni risulta molto difficile valutare in maniera chiara l'entità dell'influenza dell'aria sulla lavorazione. Infatti (come detto in precedenza, v. § 5.2), non essendo chiaro fin dall'inizio l'effetto del flusso sul processo, le prime prove sono state svolte con l'aria in posizione non controllata, e solo successivamente sono state effettuate le prove "ufficiali" con l'ugello di emissione in posizione fissa e determinata.

Ciò che è stato esposto finora (in termini di profondità, larghezza, temperatura e degrado) è tutto quanto relativo alle sole prove "ufficiali" con aria controllata, però un rapido confronto tra queste ultime e le prove ad aria non controllata può a questo punto risultare utile (fig. 5.22). Come si può vedere, nel caso di aria non controllata le aree di lavoro si sono rivelate decisamente più confuse e sovrapposte tra loro, e alcuni punti appartenenti a classi di degrado distinte appaiono praticamente coincidenti. Questo, naturalmente, non può che essere un sintomo dell'influenza del flusso d'assistenza: l'unica spiegazione sensata del fatto che punti con parametri energetici praticamente identici manifestino livelli di degrado nettamente differenti, è infatti che la posizione del potente getto d'aria sia stata modificata tra questi punti.

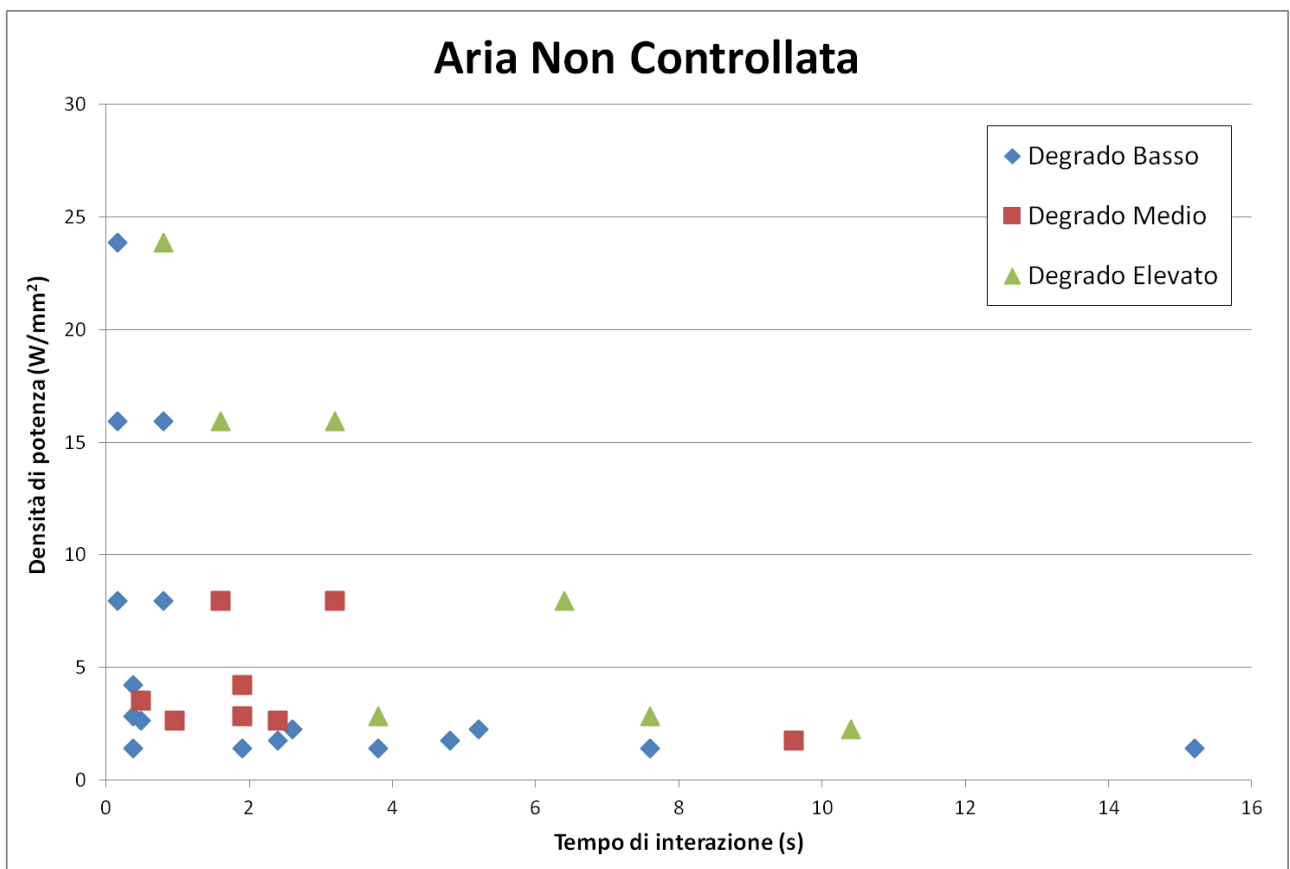
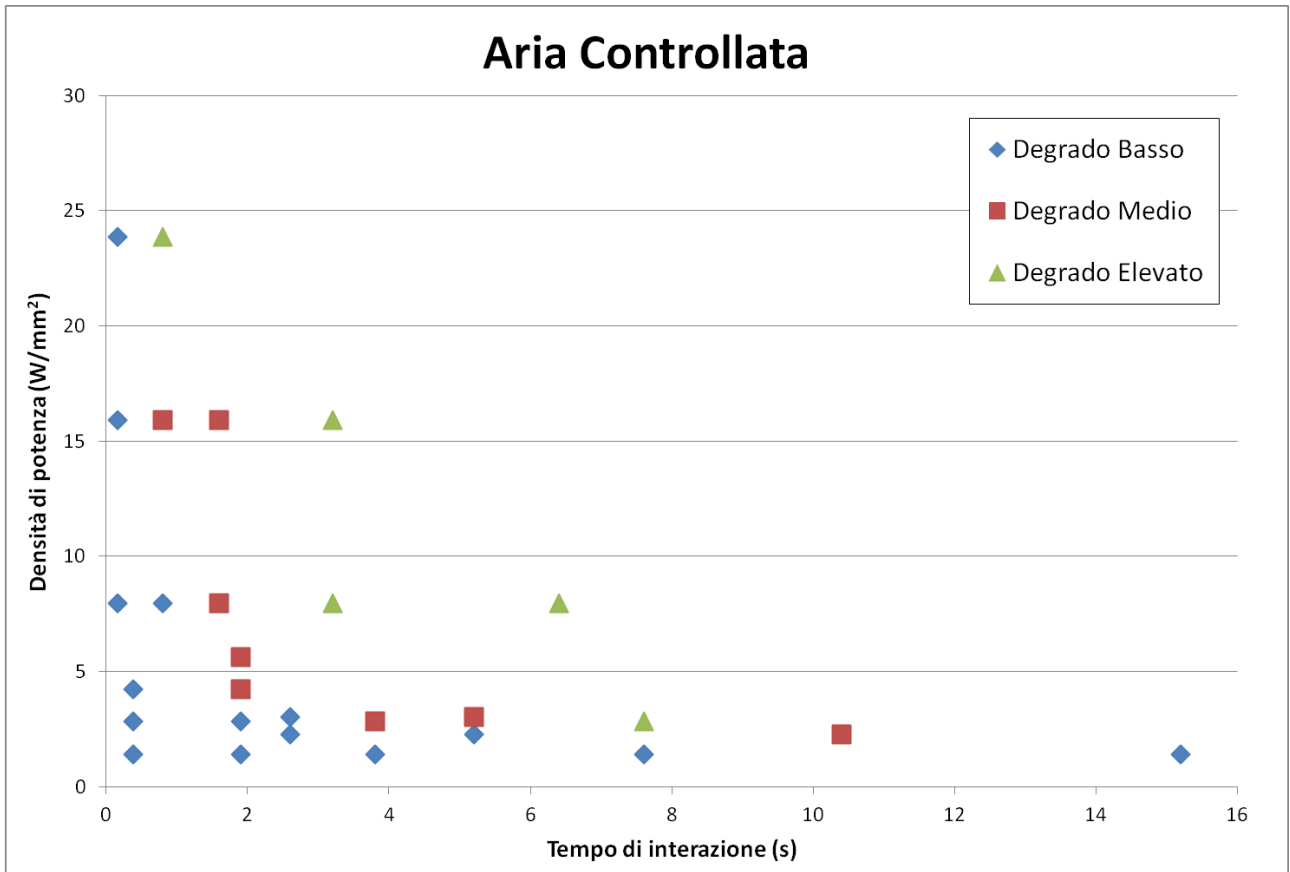


Figura 5.22: Confronto tra le aree di lavoro per le prove ad aria controllata e non controllata

Nonostante queste irregolarità aggiuntive, però, la suddivisione in zone di lavoro è ancora intuibile piuttosto agevolmente. Questo conduce dunque a pensare che l'effetto della posizione flusso d'aria, sebbene presente, non sia in realtà particolarmente significativo. In conclusione, per quanto riguarda la scelta e il dimensionamento di un flusso gassoso d'assistenza per un processo di ablazione della resina su CFRP, le linee guida che emergono dall'attività svolta sembrano essere fondamentalmente tre:

- E' preferibile l'impiego di un gas inerte piuttosto che normale aria, per evitare la presenza di ossigeno reattivo che potrebbe causare danni alle fibre;
- E' preferibile che pressione, velocità e potenza del getto non siano eccessive, per evitare una asportazione meccanica eccessiva delle fibre libere;
- Una volta soddisfatti i primi due requisiti, è consigliabile (ma non essenziale) mantenere sempre costante la posizione dell'ugello di emissione, per assicurarsi una maggiore regolarità del comportamento del materiale.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le prove di ablazione effettuate hanno fornito risultati decisamente interessanti. E' necessario ricordare, comunque, che questo studio è piuttosto pionieristico poiché, sebbene l'ablazione sia già stata investigata in altre occasioni, la scelta di eseguire questa lavorazione su CFRP con un laser continuo emettente nel vicino infrarosso, e nelle condizioni di prova descritte, non trova pressoché alcun precedente in letteratura.

Innanzitutto, in merito al flusso di assistenza impiegato durante le lavorazioni, si sono dedotte alcune ipotesi che, se verificate, possono essere molto utili. Per prima cosa l'utilizzo di normale aria, contenente ossigeno, può dare origine a reazioni di ossidazione che innalzano la temperatura del processo e causano alle fibre più danni del dovuto. In secondo luogo, la potenza e la pressione del getto impiegato si sono rivelate eccessive, e ciò ha generato un ulteriore incremento dei danneggiamenti meccanici prodotti sulle fibre. In terzo luogo, la posizione dell'ugello sembra avere un qualche effetto sulla coerenza dei dati (anche perché possiede una elevata potenza), ma questa influenza si rivela comunque di entità piuttosto ridotta.

Fatte queste premesse, dai dati ottenuti emerge come l'entità della profondità raggiunta non dipenda più di tanto dalla potenza impiegata o dalla dimensione dello spot di focalizzazione prese singolarmente. Piuttosto, la profondità è estremamente legata alla densità di potenza, cioè il rapporto tra le due quantità appena citate: la profondità cresce visibilmente all'aumentare della densità di potenza, indipendentemente dal modo in cui si agisce su quest'ultima (o aumentando P o riducendo d_{SPOT}). Inoltre, al ridursi del livello di potenza il comportamento del fascio diventa via via più sensibile alla dimensione dello spot, e ciò produce una maggiore dispersione e variabilità dei dati alle basse potenze.

La larghezza, invece, mostra un comportamento differente nei confronti della densità di potenza. Se questa viene incrementata riducendo lo spot di focalizzazione, allora la

larghezza si riduce (al contrario della profondità) poiché è estremamente sensibile alla dimensione dello spot. Se invece la densità di potenza viene incrementata aumentando la potenza, allora anche la larghezza cresce (come la profondità). Inoltre, all'aumentare del livello di potenza, sulla sezione del fascio l'energia tende a migrare verso i bordi, e ciò produce una maggiore sensibilità della larghezza alla dimensione dello spot alle alte potenze. Infine, si osserva un fenomeno inatteso: a basse potenze le larghezze ottenibili possono rivelarsi nettamente inferiori alla dimensione dello spot di focalizzazione usato, poiché in tali condizioni solo la porzione centrale del fascio riesce ad avere un effetto significativo.

Per riassumere, confrontando tra loro larghezza e profondità si ottiene la conferma di tutto quanto appena spiegato: aumentando la densità di potenza tramite riduzione dello spot si ottengono solchi più profondi ma meno larghi, mentre aumentandola tramite incremento della potenza si ottengono solchi più profondi e più larghi (con il limite dato dal comportamento asintotico sulla larghezza).

Per quanto riguarda la temperatura durante il processo, si è capito che anch'essa cresce all'aumentare della densità di potenza, indipendentemente da come si agisce su quest'ultima (o aumentando la potenza o riducendo lo spot). Si è poi osservato un fenomeno molto interessante: il calo improvviso di temperatura che si verifica quando il degrado delle fibre è talmente elevato da causarne la vaporizzazione, con conseguente asportazione di calore dal pezzo ed eventuale rimozione di interi strati di fibre.

Infine, sono fondamentali le deduzioni qualitative che si è riusciti a fare in merito allo scopo centrale dell'intera trattazione, ossia la possibilità di realizzare l'ablazione della resina in maniera corretta cercando di conciliare due esigenze fondamentali:

1. Massimizzare per quanto possibile la profondità e la larghezza raggiungibili;
2. Evitare tassativamente di danneggiare il rinforzo fibroso durante la lavorazione.

A questo proposito, osservando prima di tutto il degrado delle fibre, si può agevolmente individuare una suddivisione in aree di lavoro. Ciò consente di volgere l'attenzione solamente alle situazioni di degrado ridotto, cioè quelle che si ottengono per bassi valori di tempo di interazione o densità di potenza (o di entrambi). Tuttavia tra queste situazioni, che in termini di danneggiamento sono "accettabili", solo poche sembrano rivelarsi effettivamente "ottimali", cioè capaci di raggiungere profondità significative ed utili.

In particolare lo studio effettuato sembra suggerire che siano preferibili potenze relativamente elevate, spot di focalizzazione di grandi dimensioni e numeri di passate non eccessivi (ma comunque superiori ad uno). Nel caso particolare della attività svolta, si è riusciti ad ottenere ablazioni perfette senza alcun degrado delle fibre raggiungendo una profondità massima di 0.7193 mm. Naturalmente queste sono indicazioni del tutto qualitative, il cui vero scopo è di fornire un punto di partenza per orientarsi in eventuali studi futuri sull'argomento. Inoltre, nell'ottica di aumentare ulteriormente le profondità raggiunte, l'attività svolta sembra suggerire che sia più adatta per questo scopo la zona di lavoro costituita da ridotti valori di densità di potenza e tempi di interazione medio-alti.

Concludendo, per ciò che riguarda eventuali futuri sviluppi di studi di questo tipo, gli aspetti più interessanti da investigare potrebbero essere principalmente due:

- Perfezionare le indicazioni sui parametri ottimali, e in particolare cercare di massimizzare sempre più profondità e larghezze investigando ulteriormente nella direzione qui intrapresa (cioè potenze elevate e spot di grandi dimensioni, soprattutto nella zona a basse densità di potenza e tempi di interazione medio-alti);
- Studiare in modo più approfondito l'influenza dei flussi di assistenza, orientandosi preferibilmente verso l'utilizzo di gas inerti invece che normale aria, e utilizzando pressioni e velocità del getto più ridotte.

APPENDICE A

TESSUTO *PLAIN WEAVE*



Balanced Carbon Fabric

WOVEN FABRIC DATA SHEET

G. Angeloni
REFERENCE

GG 204 P

CHARACTERISTICS		Nominal	Tolerance	Normative
Mass per unit area	g/m ²	220	± 5%	ISO 4605
Weave		Plain		ISO 2113
Width	mm	1000/1200	± 2,5%	ISO 22198
Thickness	mm	0,16	± 2,5%	ISO 5084(**)
Other informations		Loomstate		

Nominal Construction		WARP		WEFT	
Fiber Description		HR Carbon Fiber 3K 200 tex		HR Carbon Fiber 3K 200 tex	
Thread Count	ends/cm	5,5	ISO 4602	5,5	ISO 4602
Weight Distribution	g/m ²	3K Carbon	110	3K Carbon	110
	%		50%		50%
Selvages		Weaving style	LENO	Type of Fiber	HM polyester 22 tex

(**) Theoretical thickness for an epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Date of Issue	05/10/2012	No. of Pages	1
---------------	------------	--------------	---

Note : Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

G. Angeloni srl
via Abate Tommaso , 72/A5 - 30020 Quarto d'Altino (VE) - ITALY
Tel. +39 0422 823801 - 780580 Fax +39 0422 782782
E-Mail : info@g-angeloni.com

APPENDICE B

RESINA EPOSSIDICA

**Impregmatex
compositi**
Prepregs for advanced composites

Distributed by



Prepreg Product Data

IMP 505L

Descrizione

Il sistema IMP 505L è prodotto con una speciale matrice a base di resina epossidica modificata. Il ciclo di cura può essere effettuato ad una temperatura compresa tra 100 e 150 °C (212 - 302 °F).

Il sistema IMP 505L è stato sviluppato per il settore dell'automotive e dell'articolo sportivo e sposa ottime caratteristiche di qualità superficiale sul pezzo finito e ottime caratteristiche meccaniche.

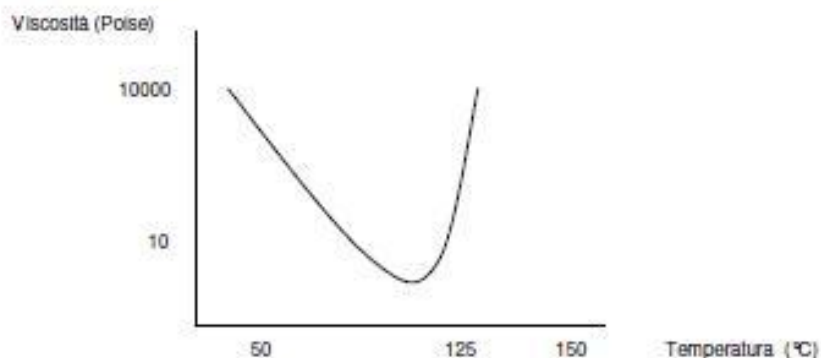
Caratteristiche principali

- → elevate caratteristiche meccaniche
- → stampaggio in autoclave, sottovuoto in forno oppure con pressa a caldo.
- → buon tack
- → ottimo flow della resina
- → lunga durata del materiale a temperatura ambiente
- → ciclo di cura flessibile e rapido (per stampaggio in pressa 8-10 minuti a 150 C°)
- → elevato tg

Proprietà

Colore	Unità	Trasparente
Densità	g/cm ³	1,18
Gel Time @ 125 °C (257 °F)	minuti	11±3
Tg (DSC) (°)	°C (°F)	110 ÷ 150 (230 ÷ 302)
Tg dopo 2 ore @ 130 °C (266 °F) – DMA Tan δ	°C (°F)	150 °C (302 °F) Dry 120 °C (248 °F) Wet (7 days @ 70 °C (158 °F) –UR 100%)
Flexural Strength (ISO 178)	MPa	148 ÷ 170
Modulo (ISO 178)	MPa	3500 ÷ 4000
Tensile Strength (ISO 527)	MPa	68 ÷ 78
Allungamento (ISO 527)	%	2.0 ÷ 3.0
Modulo (ISO 527)	MPa	3500 ÷ 4000
Assorbimento d'acqua 60 min 100 °C (212 °F)	%	0.52 ÷ 0.58

GRAFICO VISCOSITA VS TEMPERATURA

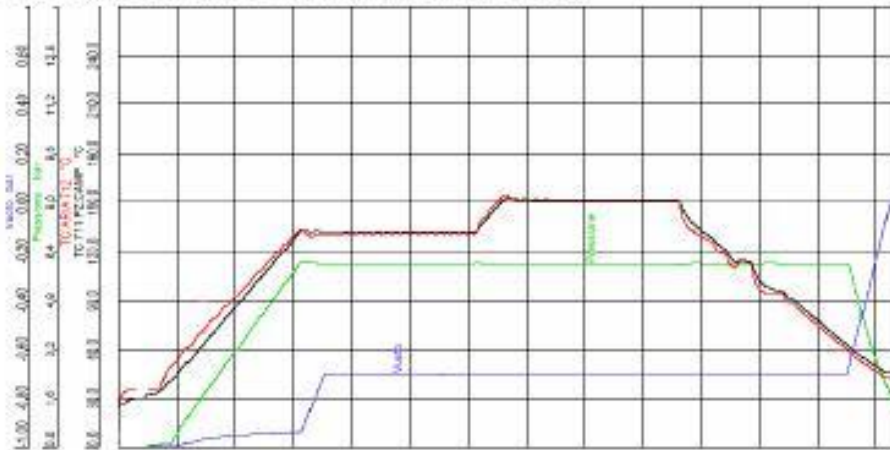


Ciclo di Cura

Il ciclo di cura del sistema IMP 505L può essere effettuato ad una temperatura compresa fra 100 e 150°C (212 - 302°F). La temperatura di transizione vetrosa è strettamente legata alla temperatura alla quale viene effettuato il ciclo di cura: nella seguente tabella sono indicati i Tg raggiungibili con diversi cicli.

Temperatura di Cura	Tempo	Tg °C (°F)
120 °C (248 °F)	1 ora	120÷130 (248÷266)
130 °C (266 °F)	1 ora	127÷135 (260÷275)
150 °C (302 °F)	10 minuti	130÷135 (266÷275)
130 °C (266 °F)	2 ore	140÷150 (284÷302)

Come esempio si riporta nella tabella sottostante il tipico ciclo di cura.



Condizioni di stoccaggio

Il pre-preg va' stoccato a temperatura controllata (-15 ÷ -18 °C) ed ha una durata di:

- 12 Mesi a -18 °C
- 6 Mesi a 0°C
- 2 Mesi a 10°C
- 4 Settimane a 23 °C

Prima dell' utilizzo si raccomanda di tenere il prodotto a temperatura ambiente per alcune ore (6-7), senza aprire il sacco di polietilene che lo tiene sigillato. In questo modo si evita che la condensa vada a bagnare il prodotto e si consente alla resina di stabilizzarsi fino ad avere un adeguato tack.

Prima di un'eventuale nuovo stoccaggio in cella frigo il prodotto deve essere adeguatamente sigillato per difenderlo dall'umidità.

Precauzioni all'uso

Raccomandiamo agli utilizzatori di osservare tutte le prescrizioni di legge previste nella lavorazione e movimentazione di resine e fibre per materiali compositi.

Gli operatori dovranno indossare adeguati dispositivi per la sicurezza personale per evitare il contatto con la pelle e prevenire contaminazioni del materiale.

Note

I valori riportati sono indicazioni di laboratorio e non possono essere utilizzati per calcoli strutturali. Impegnatex si riserva di apportare migliorie e modifiche al prodotto sopra descritto.

APPENDICE C

NOMENCLATURA DEI LAMINATI

Brevissima nota tecnica sulla nomenclatura più comunemente usata per la classificazione dei materiali compositi laminati. Consideriamo come esempio proprio il caso in esame in questa trattazione (v. § 4.2):

$$PW [0 / 90]_{5s}$$

- La sigla iniziale indica la tipologia di tessuto: nell'esempio, "PW" implica lamine in *plain weave*. In altri casi si possono avere lamine unidirezionali, indicate con la sigla "UD";
- I numeri tra parentesi esprimono gli angoli di orientamento delle lamine rispetto al sistema di riferimento (0° = lungo la direzione del carico, 90° = ortogonale al carico) e caratterizzano l'unità che si ripete. Nel caso di unidirezionale "[0 ; 90]" implicherebbe una alternanza di lamine unidirezionali con fibre a 0° e a 90° . Nel caso dell'esempio, trattandosi di *plain weave*, ogni lamina contiene fibre in due direzioni, dunque "[0 / 90]" significa singoli strati sovrapposti tutti identici tra loro, ciascuno contenente fibre in due direzioni ortogonali;
- Il pedice numerico indica il numero di ripetizioni delle lamine tra parentesi: nell'esempio, "5" significa che la lamina [0 ; 90] è ripetuta cinque volte;
- Il pedice "s", quando presente, significa che il laminato è simmetrico rispetto al piano mediano, e di conseguenza il numero effettivo degli strati raddoppia:

nell'esempio si hanno cinque ripetizioni $[0 / 90]$ ma il laminato è simmetrico, dunque gli strati in realtà sono 10;

- Il numero di strati complessivo è quindi dato dal prodotto:

“numero di lamine tra parentesi” x *“pedice numerico”* (x 2 se c'è il pedice “s”);

- Nell'esempio, la stratificazione complessiva ($1 \times 5 \times 2 = 10$ strati) risulta dunque:

$0/90 - 0/90 - 0/90 - 0/90 - 0/90 - 0/90 - 0/90 - 0/90 - 0/90 - 0/90$.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Arcangeli, *Determinazione del comportamento a crashworthiness di laminati in composito con differenti sequenze di sostituzione*, Tesi di Laurea, Università di Bologna, Seconda Facoltà di Ingegneria (a.a. 2009/2010).
- [2] G. Caligiana, Cesari, *I materiali compositi*, Pitagora Ed., Bologna.
- [3] C. De Leo, P. Ferrero, Tesi di Laurea – capitolo 1.
- [4] C. Scarponi, C. Andreotti, *Tecnologie delle costruzioni aerospaziali – Compositi Parte 1*, Università di Roma.
- [5] F. Grasso, C. Calabretta, *I materiali compositi nei mezzi di trasporto*, Università di Catania.
- [6] A. Licciulli, A. Chiechi, *Corso di scienza e tecnologia dei materiali ceramici*, Università del Salento.
- [7] http://it.wikipedia.org/wiki/Materiale_composito,
http://it.wikipedia.org/wiki/Fibra_di_carbonio.
- [8] R. Troli, *Le fibre di carbonio nei materiali ad altissime prestazioni*, Enco Srl,
<http://www.enco-journal.com/journal/ej17/frp.html>.

- [9] F. Tomei, *Studio di fattibilità di una protesi di piede a basso costo realizzata in fibra di carbonio* – capitolo 3, Tesi di Laurea, Università di Bologna, Seconda Facoltà di Ingegneria (a.a. 2009/2010).
- [10] L. Donati, *Corso di tecnologie speciali – X.1: I materiali compositi*, materiale didattico, Università di Bologna, Seconda Facoltà di Ingegneria, (Revisione 30/11/2012).
- [11] A. Fortunato, *Modelli analitici ed analisi sperimentali nelle lavorazioni laser di: taglio, saldatura, saldature ibride laser mig/mag, ed ablazione finalizzate ad applicazioni industriali innovative*, Tesi di Dottorato di Ricerca, Università di Bologna (2006).
- [12] N. Pagano, *Applicazioni dei sistemi laser in processi di taglio innovativi*, Tesi di Dottorato di Ricerca, Università di Napoli (a.a. 2009/2010).
- [13] A. Califano, *Laser di alta potenza per applicazioni di marcatura: Progettazione e realizzazione di un amplificatore in fibra per “seed” laser* – capitolo 1, Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Torino (2011).
- [14] B. Reggiani, N. Pagano, *Corso di tecnologie speciali LM – Introduzione al laser*, materiale didattico, Università di Bologna.
- [15] D. Batani, *Il rischio da laser: cosa è e come affrontarlo; analisi di un problema non così lontano da noi*, seminario, Università di Milano – Bicocca.
- [16] TLP Parte 2 – *Laser: proprietà dei fasci laser*.

- [17] Politecnico di Milano, *Lavorazioni mediante laser: light amplification by the stimulated emission of radiation, parte II.*
- [18] <http://criticalpoint.altervista.org/chimica-generale/atomo/radiazione.html>.
- [19] <http://anniluce.wordpress.com/2012/01/13/viaggio-attraverso-lo-spettro-elettromagnetico/>.
- [20] http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M01_C03/co/OPI_ang_M01_C03_web_2.html.
- [21] F. Schneider, N. Wolf, D. Petring, *High power laser cutting of fiber reinforced thermoplastic polymers with cw- and pulsed lasers*, Lasers in Manufacturing Conference (2013).
- [22] I. Shyha, *An investigation into CO2 laser trimming of CFRP and GFRP composites*, The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC (2013).
- [23] A. Goeke, C. Emmelmann, *Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality*, LANE (2010).
- [24] J. Mathew, G. L. Goswami, N. Ramakrishnan, N. K. Naik, *Parametric studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites*, Journal of Materials Processing Technology 89 – 90 (1999) 198 – 203

- [25] Z. L. Li, H.Y. Zheng, G. C. Lim, P. L. Chu, L. Li, *Study on UV laser machining quality of carbon fibre reinforced composites*, Elsevier Ltd., Composites: Part A 41 (2010) 1403 – 1408.
- [26] A. Riveiro, F. Quintero, F. Lusquiños, J. del Val, R. Comesaña, M. Boutinguiza, J. Pou, *Experimental study on the CO2 laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite*, Elsevier Ltd., Composites: Part A 43 (2012) 1400 – 1409.
- [27] A. N. Fuchs, M. Schoeberl, J. Tremmer, M. F. Zaeh, *Laser cutting of carbon fiber fabrics*, Lasers in Manufacturing Conference 2013.
- [28] K. B. Katnam, L. F. M. Da Silva, T. M. Young, *Bonded repair of composite aircraft structures: a review of scientific challenges and opportunities*, Elsevier Ltd., Progress in Aerospace Sciences 61 (2013) 26 – 42.
- [29] H. Dittmar, F. Gäbler, U. Stute, *UV-laser ablation of fibre reinforced composites with ns-pulses*, Lasers in Manufacturing Conference (2013).
- [30] P. Moreno, C. Méndez, A. García, I. Arias, L. Roso, *Femtosecond laser ablation of carbon reinforced polymers*, Elsevier B.V., Applied Surface Science 252 (2006) 4110 – 4119.
- [31] N. Schilling, A. Lasagni, U. Klotzbach, *Energy dependent processing of fiber reinforced plastics with ultra short laser pulses*, Lasers in Manufacturing Conference (2013).
- [32] Q. Bénard, M. Fois, M. Grisel, P. Laurens, *Surface treatment of carbon/epoxy and glass/epoxy composites with an excimer laser beam*, International Journal of Adhesion & Adhesives 26 (2006) 543 – 549.

- [33] F. Völkermeier, F. Fischer, U. Stute, D. Kracht, *Laser-based approach for bonded repair of carbon fiber reinforced plastics*, LiM (2011).
- [34] F. Fischer, L. Romoli, R. Kling, *Laser-based repair of carbon fiber reinforced plastics*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 (2010) 203 – 206.
- [35] W. Knapp, S. Clement, C. Franz, M. Oumarou, J. Renard, *Laser-bonding of long fiber thermoplastic composites for structural assemblies*, LANE (2010).
- [36] P. Amend, T. Frick, M. Schmidt, *Experimental studies on laser-based hot-melt bonding of thermosetting composites and thermoplastics*, LiM (2011).
- [37] P. Amend, B. Pillach, T. Frick, M. Schmidt, *Laser-based hot-melt bonding of thermosetting GFRP*, LANE (2012).
- [38] <http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/recent-developments-in-abrasive-jet-software>
- [39] R. Negarestani, *Laser cutting of carbon fibre-reinforced polymer composite materials*, PhD Thesis, University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering (2010).
- [40] R. Negarestani, L. Li, H. K. Sezer, D. Whitehead, J. Methven, *Nano-second pulsed DPSS Nd:YAG laser cutting of CFRP composites with mixed reactive and inert gases*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. (2010) 49:553–566, Springer-Verlag London Limited 2009.