

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II  
FONDO SOCIALE EUROPEO - F.S.E.



Unione europea  
Fondo sociale europeo

Programma Operativo Nazionale 2000/2006  
“Ricerca Scientifica, Sviluppo Tecnologico, Alta Formazione”  
Misura III.4 – “Formazione Superiore e Universitaria”

Dottorato di ricerca in Ingegneria Chimica, dei Materiali e della  
Produzione

indirizzo in  
*Tecnologie e Sistemi Intelligenti per l'Automazione della Produzione*  
XVIII ciclo

**TESI DI DOTTORATO**

MODELLI PER L'OTTIMIZZAZIONE DEI PROCESSI INDUSTRIALI:  
INCISIONI LASER

**COORDINATORE**  
CH.MO PROF. ING.  
NINO GRIZZUTI

**CANDIDATO**  
DOTT. SILVIO GENNA

**TUTOR**  
CH.MA PROF.<sup>SSA</sup> ING.  
ISABELLA DE IORIO PAGANO

Anno Accademico 2004-2005

*Ringrazio sentitamente la Prof.ssa Isabella De Iorio, l'Ing. Caludio Leone, e il personale del laboratorio TIBI, che mi hanno seguito con pazienza e disponibilità durante la preparazione del presente lavoro.*

*Silvio Jenna*

## **Indice**

<b>Introduzione</b>	p. 6
<b>I. I laser</b>	p. 8
I.1. Principi di funzionamento del laser	p. 9
I.2. Le caratteristiche del fascio laser	p. 18
I.2.1. Monocromaticità	p. 18
I.2.2. Coerenza	p. 19
I.2.3. Caratteristiche energetiche	p. 19
I.2.4. Profilo spaziale	p. 20
I.2.5. Diametro del fascio (TEM)	p. 21
I.2.6. Profilo temporale	p. 24
I.2.7. Polarizzazione	p. 26
I.2.8. Geometria di un fascio laser e sua divergenza	p. 28
I.3. Classificazione dei laser	p. 32
I.4. Sistemi di trasporto	p. 34
I.5. Sistemi di focalizzazione	p. 36
I.6. Il laser a CO <sub>2</sub>	p. 38
I.7. Il laser a Nd:YAG	p. 42
I.8. Il laser a Diodi	p. 48
I.9. Applicazioni industriali	p. 54
I.10. Considerazioni sulla sicurezza	p. 56
<b>II. Marcatura laser</b>	p. 59
II.1. Nozioni generali	p. 60
II.2. Tipologie di sorgenti per la marcatura laser	p. 61
II.3. Meccanismo di marcatura	p. 66
II.4. Sorgenti laser per la marcatura	p. 68
II.5. I materiali marcati con il laser	p. 70
II.5.1. Materiali metallici	p. 70
II.5.2. Materiali polimerici	p. 71

II.5.3. Materiali organici	p. 72
II.5.4. Materiali amorfi	p. 73
II.6. Vantaggi della marcatura	p. 74
II.7. Sviluppi futuri	p. 76
<b>III. Materiali ed attrezzature sperimentali</b>	p. 77
III.1. Descrizione del sistema laser	p. 78
III.2. Descrizione del materiale e specifiche	p. 92
III.3. Descrizione delle prove	p. 93
III.4. Parametri utili e metodiche utilizzate	p. 96
III.4.1 Misura delle caratteristiche geometriche	p. 96
III.4.1.1 Il Rugosimetro Surtronic 3+	p. 98
III.4.1.2 Il Rugosimetro Talysurf pgi plus 0.8nm	p. 100
III.4.2 Misura del contrasto	p. 104
<b>IV. Risultati sperimentali</b>	p. 108
IV.1. I risultati sperimentali	p. 109
IV.2. Prove su Acciaio AISI 304	p. 110
IV.2.1. AISI 304 – 35A	p. 110
IV.2.2. AISI 304 – 45A	p. 120
IV.2.3. AISI 304 – 55A	p. 125
IV.3. Prove su Acciaio AISI 430	p. 132
IV.3.1. AISI 430 – 35A	p. 132
IV.3.2. AISI 430 – 45A	p. 137
IV.3.3. AISI 430 – 55A	p. 142
IV.4. Modello teorico	p. 148
IV.4.1. Validità del modello teorico	p. 152
IV.6. Modello empirico	p. 153
<b>V. Conclusioni</b>	p. 163

<b>Appendice</b>	p. 166
A.1 AISI 304 15A	p. 167
A.2 AISI 304 25A	p. 176
A.3 AISI 304 35A	p. 184
A.4 AISI 430 15A	p. 196
A.5 AISI 430 25A	p. 204
A.6 AISI 430 35A	p. 212
<b>Bibliografia</b>	p. 223

# **Introduzione**

## **Introduzione**

Nel 1958 Charles Townes e Arthur Schawlow pubblicarono la teoria necessaria per arrivare alla generazione di un fascio laser; solo due anni dopo Theodore Maiman mise in funzione il primo laser (al rubino).

Dal 1960 ad oggi l'impiego del laser ha avuto una crescente diffusione, basta pensare ai lettori CD o DVD, alle stampanti laser, agli autovelox della polizia ed alle molteplici applicazioni industriali. In particolare in campo industriale ha contribuito al miglioramento della qualità del prodotto, all'incremento del livello di automazione ed alla riduzione degli scarti.

L'utilizzo delle sorgenti laser in ambito industriale è dovuto ai suoi numerosi vantaggi, tra cui l'elevato livello di densità potenza e la possibilità di focalizzazione in aree ristrette determinata dalla qualità del fascio.

A tal fine occorre elaborare modelli accurati dei fenomeni fisici che governano i processi ed un modo possibile è lo studio delle caratteristiche geometriche delle superfici risultanti dai parametri utilizzati nel processo di lavorazione.

In questo contesto, e con la recente introduzione sul mercato di nuovi tipi di laser da marcatura (ai nanosecondi), è stato sviluppato il lavoro oggetto della presente tesi.

L'obiettivo di tale lavoro è quello di caratterizzare il processo di marcatura di lamiera in acciaio inox, utilizzando un laser Nd:YAG di recente produzione (dicembre 2004), variando alcuni parametri di processo, quali la velocità di marcatura, la corrente di alimentazione dei diodi e la frequenza degli impulsi del laser. Sono state studiate le correlazioni tra i parametri di processo impiegati nella

marcatura e gli aspetti geometrici misurati sulle superfici marcate. Inoltre è stato sviluppato un modello empirico, basato sui risultati sperimentali, per poter prevedere la profondità di marcatura in funzione dei parametri prima menzionati.

Per realizzare tale tesi, il lavoro è stato articolato nelle seguenti fasi:

- a. formazione relativa al funzionamento del laser Nd:YAG da marcatura della *Lasit*;
- b. marcatura di provini con differenti parametri (potenza, frequenza, velocità di marcatura)
- c. misure della geometria delle superfici dei provini ottenuti mediante differenti parametri di marcatura;
- d. analisi dei risultati conseguiti nella sperimentazione e correlazione dei parametri di marcatura laser con gli aspetti geometrici delle superfici risultanti;
- e. sviluppo del modello empirico di tipo analitico.

# **Capitolo I**

## **I laser**

## I.1. Principi di funzionamento del laser

Il termine *LASER* è acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, cioè amplificazione della luce mediante emissione stimolata di radiazioni.

Parliamo di luce perché il laser ha frequenze nel visibile ( $f=4 \cdot 10^{14} \div 8 \cdot 10^{14}$  Hz, e lunghezza d'onda  $\lambda=0.38 \div 0.78 \mu\text{m}$ ) o a cavallo di queste, tra l'infrarosso e l'ultravioletto.

La luce non è altro che una radiazione elettromagnetica, caratterizzata da una natura ondulatoria.

Le onde elettromagnetiche sono onde energetiche in cui l'energia trasportata è ripartita tra un campo elettrico (generalmente indicato con il vettore  $\mathbf{E}$  che rappresenta l'*intensità del campo elettrico*) ed uno magnetico (indicato dal vettore  $\mathbf{B}$  che rappresenta la *densità del campo magnetico*) che variano nel tempo e nello spazio con legge sinusoidale. Una variazione del campo  $\mathbf{E}$  è sorgente del campo  $\mathbf{B}$  e viceversa, di conseguenza non ha senso considerare i due campi separatamente. In Figura (I.1) è rappresentata un'onda elettromagnetica i cui vettori  $\mathbf{E}$  ed  $\mathbf{B}$  giacciono nei piani  $y,x$  e  $x,z$  rispettivamente, e che si propaga lungo la direzione  $x$ .

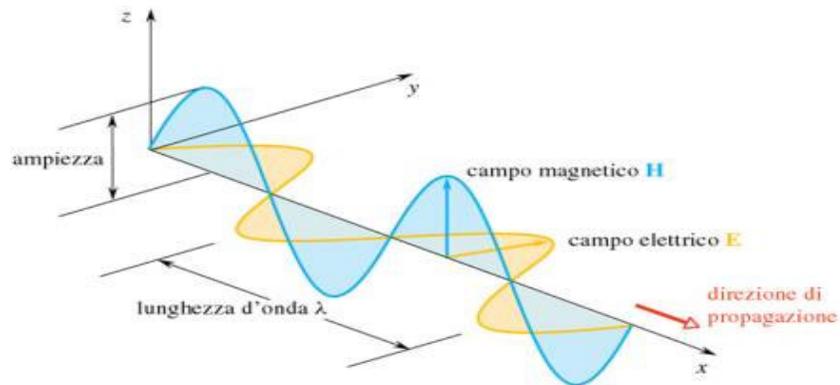


Figura I.1 – Rappresentazione schematica di una radiazione elettromagnetica

Le onde elettromagnetiche sono caratterizzate da un periodo temporale  $T$  e da uno spaziale  $\lambda$  detto lunghezza d'onda.

L'inverso del periodo è la frequenza:

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{I.1})$$

Queste grandezze sono legate dalle seguenti relazioni:

$$\frac{\lambda}{T} = \lambda f = v \quad (\text{I.2})$$

dove  $v$  è la velocità di propagazione nel mezzo.

La fig. I.2 mostra lo spettro elettromagnetico, dove sono evidenziate le regioni spettrali più note, con una scala di frequenza ed una in lunghezza d'onda.

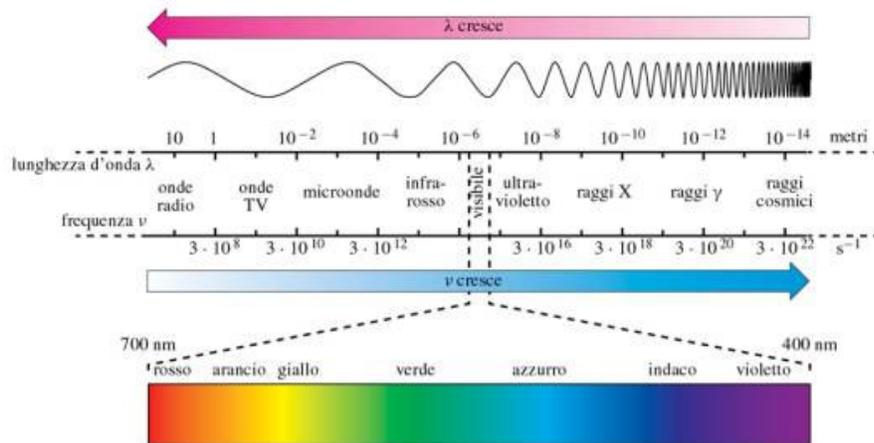


Figura I.2 – Spettro delle radiazioni elettromagnetiche.

Le onde elettromagnetiche, diversamente da quelle acustiche e marine, sono in grado di propagarsi nel vuoto senza alcun supporto materiale.

Un mezzo, anzi, costituisce una sorta di ostacolo alla loro propagazione, in quanto esso assorbe parte dell'energia delle onde dissipandola sotto forma di calore per effetto Joule; la velocità di propagazione nel vuoto è maggiore di quella in qualsiasi altro mezzo e risulta:

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

In aggiunta alle sue caratteristiche ondulatorie, la radiazione elettromagnetica presenta anche un carattere corpuscolare; in alcuni casi la luce agisce come se fosse composta da quanti discreti di energia, chiamati fotoni.

I fattori che caratterizzano un fotone sono la frequenza e la fase, mentre l'ampiezza dell'onda è legata al flusso di fotoni (numero di fotoni per unità di area e di tempo) trasportati dall'onda.

Dato che un'onda elettromagnetica è un'onda di energia, anche i fotoni possiedono un'energia. L'energia  $E$  associata ad un fotone di frequenza  $f$  è pari a:

$$E=hf \quad (I.3)$$

dove  $h$  è la costante di *Planck* ( $6.63 \cdot 10^{-27}$  Js).

Per comprendere il principio in base al quale si ha emissione di luce laser, bisogna considerare l'interazione tra radiazione elettromagnetica e materia.

Il fenomeno è molto complesso ma può essere scisso in tre fenomeni più semplici che avvengono in concomitanza (fig. I.3):

- *Assorbimento*: si faccia riferimento ad un atomo in condizioni d'equilibrio. Gli elettroni si dispongono in modo da minimizzare l'energia potenziale. Sia  $n_1$  la numerosità della popolazione di elettroni al livello 1 ed  $n_2$  quella del livello 2, tali che  $E_1$  (energia associata al livello 1) sia minore di  $E_2$  (energia associata al livello 2).  
  
In condizioni di riposo  $n_1 > n_2$ , ma se forniamo energia al sistema l'atomo assorbe energia permettendo agli elettroni di passare dal livello 1 al livello energetico 2. Dalla teoria quantistica sappiamo però che gli atomi possono assumere solo determinati livelli energetici, compatibili con la struttura dell'atomo in esame. Quindi il livello energetico che l'atomo raggiunge, assorbendo il fotone, deve essere compatibile con uno dei livelli quantici

disponibili per l'atomo: la frequenza del fotone deve soddisfare l'equazione

$$hf = \Delta E = E_2 - E_1 \quad (I.4)$$

dove  $E_1$  ed  $E_2$  sono i livelli energetici fondamentali. Avremo un decremento della popolazione del livello 1 che è in funzione dell'intensità della radiazione incidente, del materiale e di  $n_1$ .

- *Emissione spontanea:* si faccia riferimento ad un atomo in condizioni di eccitazione, di un atomo cioè che ha subito un precedente assorbimento, per cui si ha  $n_2 > n_1$ . Dopo un certo periodo, più o meno lungo, il sistema tende a ritornare in equilibrio spontaneamente e in maniera casuale. Gli elettroni, quindi, ritornano al livello energetico  $E_1$ , emettendo fotoni d'energia di frequenza  $f$  ed energia  $\Delta E$  tale da soddisfare l'equazione (I.4). Si ha un decremento della popolazione del livello 2, dipendente dal solo materiale [1].
- *Emissione stimolata:* consideriamo un sistema eccitato ( $n_2 > n_1$ ) a cui mandiamo un fotone in risonanza, ovvero un fotone la cui frequenza sia compatibile con uno dei livelli quantici disponibili per l'atomo, tale cioè da soddisfare l'equazione (I.4). Il sistema non può fare altro che diseccitarsi ovvero emettere un fotone d'energia  $\Delta E = hf$ . Questa volta l'emissione non è spontanea ma determinata dal fotone in risonanza. All'uscita dal sistema avremo due fotoni: uno è quello d'entrata, l'altro è quello emesso dal sistema. I due fotoni sono identici in termini di direzionalità e cromaticità e formano quindi un fascio coerente. Poiché il

sistema è costituito da più atomi e da più elettroni può innescarsi un fenomeno a catena: un fotone inviato colpisce un atomo eccitato e questo si diseccita ottenendo così due fotoni che colpiranno altri atomi eccitati che emettono altri fotoni e così via. Quello che si è ottenuto in sostanza è un'amplificazione della radiazione attraverso emissione stimolata, ovvero luce laser.

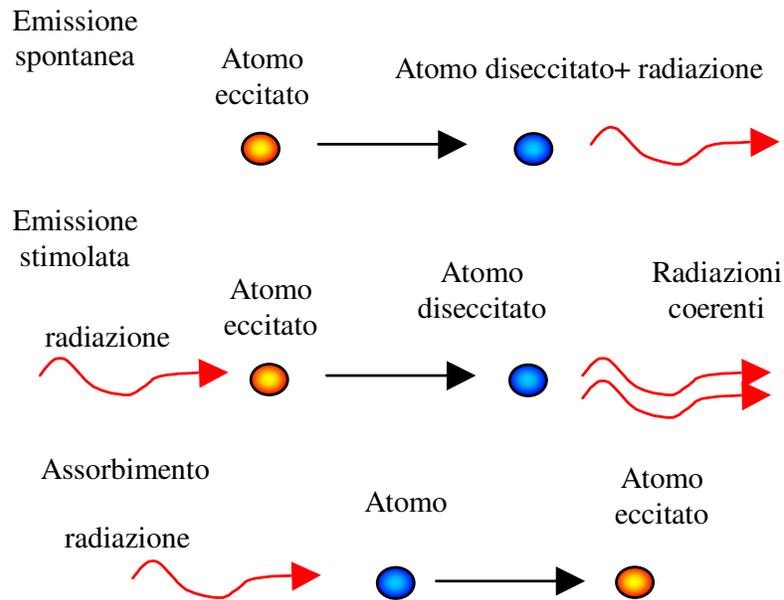


Figura I.3 - Fenomeni di interazione tra radiazione e materia.

I tre fenomeni di interazione radiazione-materia sono sempre presenti contemporaneamente ma uno dei tre può essere più probabile rispetto agli altri. Quando risulta  $n_1 > n_2$ , il fenomeno più probabile è l'assorbimento, mentre se  $n_2 > n_1$  si deve avere emissione. Quella spontanea risulta più probabile della stimolata in un range di temperature attorno alla temperatura ambiente e per frequenze a cavallo del visibile. Per avere un sistema laser, si deve rendere più

probabile l'emissione stimolata, e cioè si deve agire sul sistema stesso imponendo un'*inversione di popolazione* ( $n_2 > n_1$ ). Si prenda in considerazione un sistema a due livelli energetici (non intendiamo un sistema costituito da due soli livelli energetici ma sono solo due i livelli energetici interessati alle transizioni elettroniche) e mandiamo una radiazione.

Se il sistema è in equilibrio i livelli più bassi saranno più popolati per cui mandando fotoni in risonanza l'evento più probabile sarà l'assorbimento. Se il sistema assorbe energia,  $n_1$  inizierà a diminuire ed  $n_2$  tenderà a crescere.

Al passare del tempo e al diminuire di  $n_1$ , l'assorbimento diviene meno probabile mentre lo diviene sempre più l'emissione. Si giungerà, allora, la condizione di equilibrio dinamico  $n_1 = n_2$  (i tre fenomeni sono isoprobabili) e non si riuscirà ad ottenere *inversione di popolazione*. Questo significa che un sistema a due livelli non può essere un sistema in grado di emettere luce laser; abbiamo quindi bisogno di un sistema ad almeno tre livelli energetici, ovvero un sistema in condizioni tali che le transizioni possibili siano almeno tra tre livelli. Tali livelli devono soddisfare particolari requisiti, cioè il livello che si riempie per pompaggio (tecnica di fornire energia per ottenere inversione di popolazione) deve essere a rapido decadimento mentre quello che si riempie per decadimento del precedente deve essere metastabile, ovvero a lento decadimento.

Un materiale che presenti queste caratteristiche viene detto **materiale attivo** [2].

Se confrontiamo un sistema a tre livelli con uno a quattro, si nota che il secondo è più facilmente eccitabile mediante pompaggio: il sistema a tre livelli ha lo svantaggio che lo stato 1 è quello fondamentale, per cui un gran numero di

elettroni deve essere portato al livello 2 ed è necessario un forte pompaggio; un sistema a quattro livelli non ha questo vincolo, per produrre inversione di popolazione è necessario portare un piccolo numero di elettroni al livello 3 [1]. La maggior parte dei laser utilizzati sono sistemi a quattro livelli ( vedi Fig.I.4).

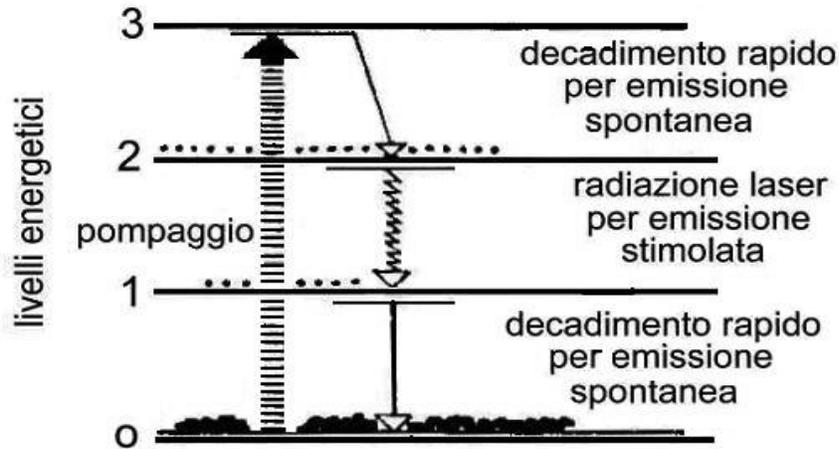


Figura I.4 – Schema di laser a quattro livelli.

La camera in cui avviene il pompaggio è detta *cavità risonante*. In figura I.5 vi è raffigurata una rappresentazione schematica di un laser a stato solido pompato otticamente. Tale cavità è costituita da due specchi paralleli in modo tale che la luce possa fare più passaggi attraverso il mezzo attivo. La figura I.5 mostra tutti gli elementi necessari per il laser: il materiale ottico, il sistema per produrre l'inversione di popolazione (la lampada flash) e la cavità risonante (gli specchi sulle facce terminali della barretta).

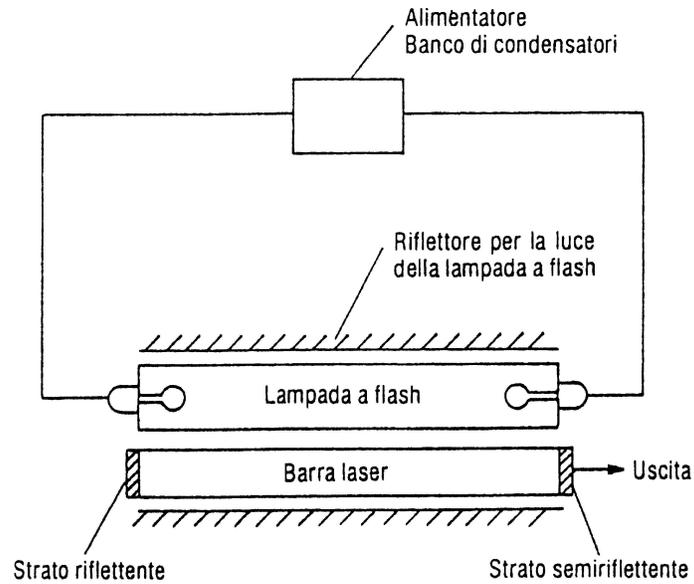


Figura I.5 – Rappresentazione schematica di un laser a stato solido pompato otticamente.

Su i due specchi riflettenti di figura I.6 impattano i fotoni emessi spontaneamente e per tale motivo fotoni aventi frequenza, fase e direzione del tutto casuali (a); d'altra parte, quando uno di tali fotoni colpisce perpendicolarmente la parete, esso viene riflesso e torna a eccitare il materiale con frequenza tale da produrre l'emissione stimolata (b). I fotoni così emessi vengono riflessi migliaia e migliaia di volte tra gli specchi che delimitano la cavità risonante, amplificandosi (c, d) ed infine, attraversando la parete resa parzialmente riflettente (e), vengono convogliati da un'apposita *lente di focalizzazione* andando a costituire il fascio laser [3].

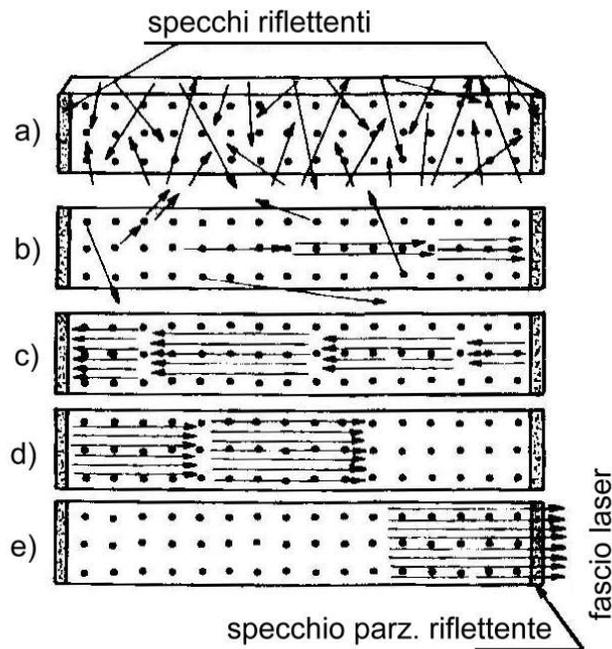


Figura I.6 - Schema di funzionamento dell'oscillatore (laser).

## I.2. Le caratteristiche del fascio generato

### I.2.1. Monocromaticità

Si definisce monocromatica una radiazione caratterizzata da un'unica frequenza: nel campo del visibile ciò si traduce in un sol colore. In realtà nessuna radiazione può essere definita monocromatica; il Principio di indeterminazione di Heisenberg, infatti, afferma che non è possibile conoscere contemporaneamente e con precisione la posizione e la quantità di moto di un elettrone.

Il discorso allora va affrontato in termini probabilistici: la probabilità che un'onda abbia una data frequenza piuttosto che un'altra è fornita da una distribuzione gaussiana. Per il laser la curva ha una dispersione molto piccola così che possiamo parlare di monocromaticità.

## I.2.2. Coerenza

La coerenza può essere di due tipi (vedi Fig.I.7):

- **Temporale:** è legata alla frequenza. Un fascio di onde caratterizzato da coerenza temporale è un fascio costituito da onde tutte con la stessa frequenza ovvero un fascio monocromatico.
- **Spaziale:** è legata alla direzione. Un fascio di onde caratterizzato da coerenza spaziale è un fascio costituito da onde tutte parallele ovvero un fascio unidirezionale

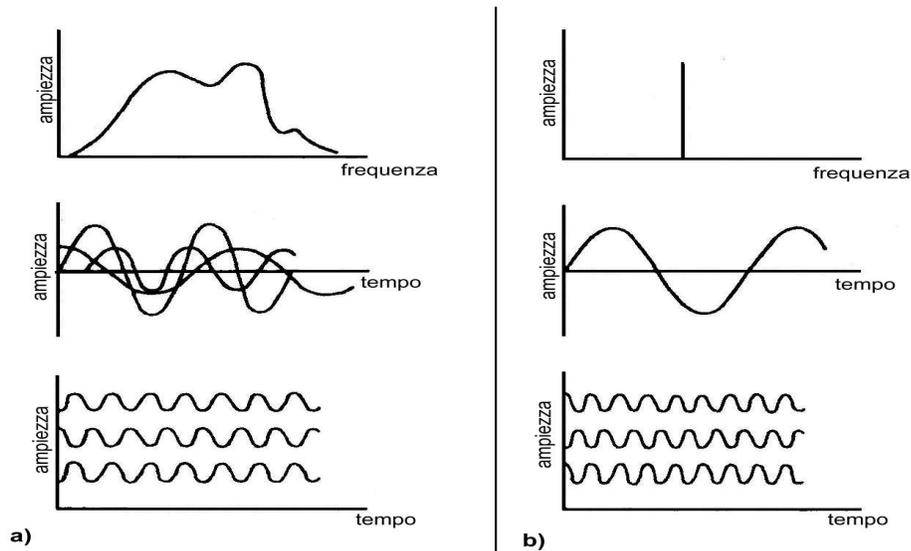


Figura I.7 – Radiazione non coerente (a) e coerente (b).

## I.2.3. Caratteristiche energetiche

Il fascio generato dalla sorgente possiede una determinata luminosità o, equivalentemente, una determinata potenza  $P$  [W]. L'energia trasportata dal fascio nel tempo  $\tau$  è ovviamente [4]:

$$Q=P\tau \quad (I.5)$$

Si definisce *fluenza* ( $F$ ) del fascio il rapporto:

$$F = \frac{Q}{S} \quad (I.6)$$

dove  $S$  è l'area della sezione trasversale del fascio (ottenuta sezionando idealmente il fascio con un piano normale alla direzione di propagazione). Per come è definita nel sistema SI la fluenza si misura in  $J \cdot m^{-2}$ .

Invece la *irradianza* ( $I$ ), o *densità di potenza* o *irradiamento*, di un fascio laser è data da:

$$I = \frac{P}{S} \quad (I.7)$$

L'unità di misura nel sistema SI dell'irradianza è di  $W/m^2$ , ma nel settore laser, a causa degli elevatissimi valori raggiunti, si preferisce usare un multiplo:  $W/cm^2$

#### **I.2.4. Profilo spaziale**

Il valore di  $I$  rappresenta il valore medio su tutta la sezione del fascio laser, in quanto la densità di potenza del fascio, non è costante nella sezione trasversale, ma varia da punto a punto. Il fatto che la densità di potenza sia più elevata in alcune zone della sezione del fascio rispetto ad altre dipende principalmente dalle dimensioni e dalla geometria della cavità risonante. Al variare della geometria degli specchi è possibile concentrare la densità di potenza del fascio sull'asse, ottenendo un massimo di potenza centrale o, al contrario, ripartirla in modo più omogeneo. Una distribuzione di densità di potenza molto importante dei laser è la *distribuzione gaussiana* (figura I.8) [4].

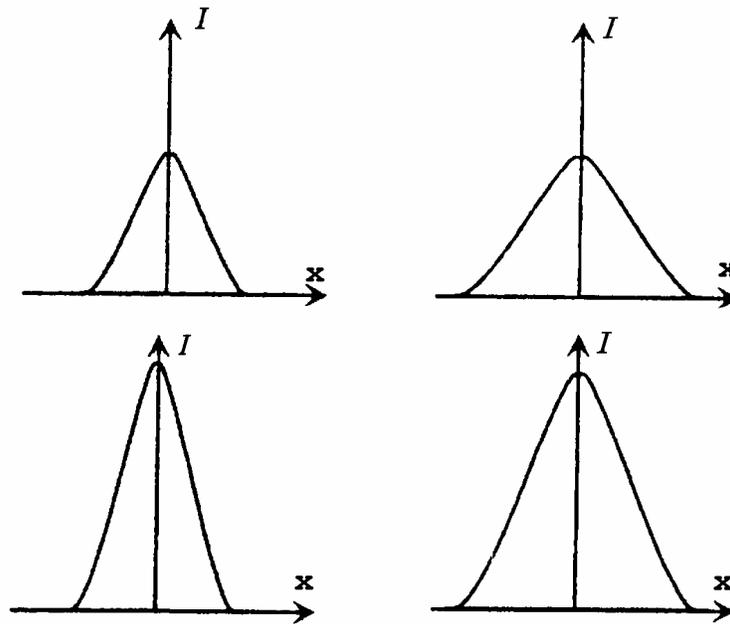


Figura I.8 – Esempi di distribuzione gaussiana della densità di potenza.

### I.2.5. Diametro del fascio (TEM)

Nella zona di frontiera del fascio l'irradianza non subisce una discontinuità ma l'intensità del fascio decade con continuità dal valore che possiede all'interno del fascio fino ad un valore nullo al di fuori di esso. Non è pertanto possibile attribuire al fascio un diametro o un raggio in maniera univoca, ma occorre fissare una convenzione. La norma vigente (UNI EN ISO 11146) richiede che il diametro del fascio venga determinato in base al valore del momento del secondo ordine della distribuzione di irradianza [4].

La distribuzione gaussiana di irradianza ha grande importanza nelle applicazioni industriali dei laser, in particolare nel taglio. Infatti, è la distribuzione in cui la densità di potenza è maggiormente concentrata intorno all'asse del fascio. Inoltre,

a causa del fenomeno della diffrazione, la distribuzione di potenza gaussiana consente una focalizzazione del fascio su una sezione piccola.

Esiste una stretta relazione tra la geometria della cavità risonante, e in particolare della curvatura degli specchi, e la distribuzione della densità di potenza  $I$ . Infatti la geometria della cavità influenza direttamente i modi di risonanza delle onde elettromagnetiche all'interno della cavità risonante, facendo sì che l'energia si concentri maggiormente in alcune zone della sezione trasversale del fascio rispetto ad altre.

Un modo per caratterizzare il profilo spaziale della densità di potenza del fascio è tramite l'indicatore del *Modo Elettromagnetico Trasversale* (TEM). La notazione prevede l'utilizzo dell'indicatore  $TEM_{mn}$  dove  $m$  e  $n$  rappresentano il numero dei minimi di densità di potenza presenti nella sezione normale all'asse del fascio nelle due direzioni ortogonali  $x$  e  $y$  rispettivamente. Una sorgente con  $TEM_{00}$  indica un fascio con un profilo spaziale senza minimi e con un unico massimo, centrato sull'asse, e corrisponde alla distribuzione gaussiana. La modalità  $TEM_{01}$  indica un fascio con un minimo in direzione  $y$  e nessuno in  $x$ , così come riportato in figura I.9, mentre la modalità  $TEM_{11}$  indica un fascio con un minimo in ogni direzione  $x$  e  $y$ , per un totale di quattro massimi di potenza [4].

La modalità  $TEM_{mn}^*$  indica la sovrapposizione di due modi identici, ruotati tra loro di 90 gradi. La distribuzione  $TEM_{01}^*$ , ad esempio, è una distribuzione circolare con un minimo sull'asse (denominata anche a *ciambella*).

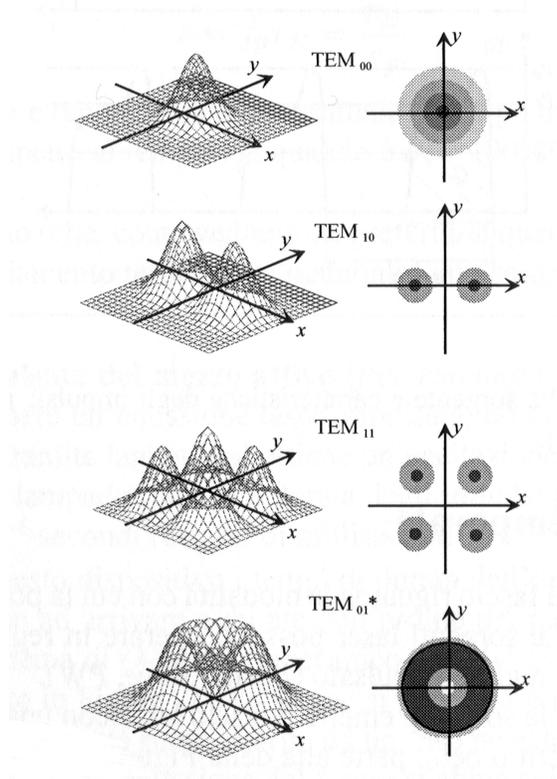


Figura 1.9 – Esempi di alcuni modi TEM e relativa distribuzione di potenza [4.]

Una sorgente laser può generare un fascio che presenta più modi TEM<sub>mn</sub> sovrapposti. In questo caso si parla di un laser *multimodo*, distinguendolo così da un laser a *modo singolo*. Uno dei casi più frequenti è la somma del modo TEM<sub>00</sub> con il modo TEM<sub>01</sub>\*, che conferisce al fascio una distribuzione prossima alla distribuzione omogenea.

### I.2.6. Profilo temporale

Il profilo temporale del fascio riguarda la modalità con cui la potenza del fascio viene generata nel tempo. Le sorgenti laser possono essere in regime continuo (*Continuos Wave, CW*) o in regime pulsato (*Pulsed Wave, PW*) [4].

In regime continuo la sorgente emette il fascio laser con una potenza costante nel tempo, mentre in regime pulsato la sorgente emette potenza in maniera discontinua nel tempo, attraverso impulsi o treni di impulsi identici tra loro. In questo modo, a parità di potenza media emessa, in regime pulsato si ottengono potenze di picco estremamente elevate.

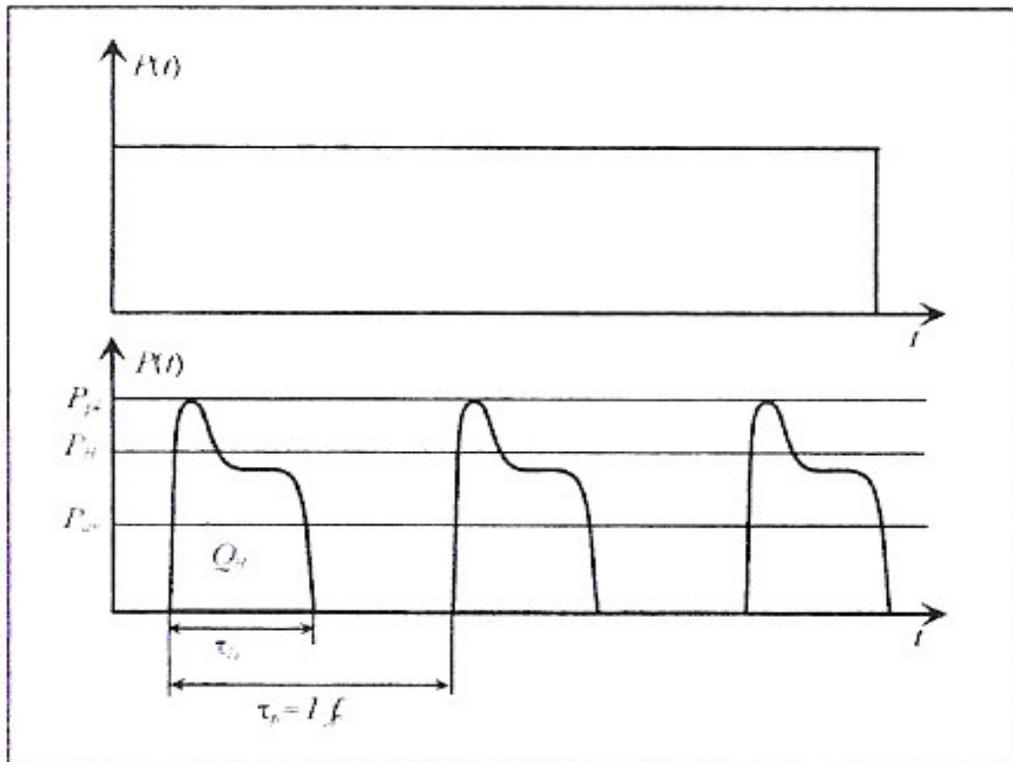


Figura I.10 –Regime della sorgente e caratteristiche degli impulsi:  
regime continuo (alto) e regime pulsato (basso) [4.]

Le caratteristiche che descrivono gli impulsi sono la durata  $\tau_H$ , la potenza istantanea  $P(t)$  e la frequenza di ripetizione degli impulsi  $f_p=1/\tau_p$ .

Dalla potenza istantanea è possibile ricavare la potenza di picco[7]:

$$P_{pk} = \max_{0 < t < \tau_H} P(t) \quad (I.8)$$

e la potenza media del singolo impulso

$$P_H = \frac{1}{\tau_H} \int_0^{\tau_H} P(t) dt \quad (I.9)$$

Inoltre, è possibile ricavare l'energia del singolo impulso come:

$$Q = \int_0^{\tau_H} P(t) dt = \tau_H P_H \quad (I.10)$$

Mentre la potenza media degli impulsi (cioè la potenza media emessa dalla sorgente) è data da:

$$P_{av} = f_p Q = f_p \tau_H P_H \quad (I.11)$$

Il prodotto

$$\delta = f_H \tau_H = \frac{\tau_H}{\tau_p} \quad (I.12)$$

viene detto *duty cycle* e rappresenta la percentuale di tempo in cui la sorgente emette la radiazione laser rispetto al tempo  $\tau_p$ ; quando  $\delta=100\%$  l'emissione avviene in continuo.

Il regime pulsato, preferibile quando si ha la necessità di contenere il danneggiamento termico del materiale, può essere ottenuto nei seguenti modi:

- *Eccitazione pulsata del mezzo attivo (free-running)*: è il metodo più semplice per ottenere un'emissione laser pulsata; ad esempio nei laser che

vengono eccitati tramite lampade si ottiene un'eccitazione pulsata del mezzo attivo utilizzando lampade flash. La durata degli impulsi può essere al minimo dell'ordine di decine di millisecondi ( $10^{-4}$  secondi).

- *Q-switch*: con questo dispositivo i tempi di durata dell'impulso si abbreviano notevolmente, fino ad arrivare a durate dell'ordine dei nanosecondi ( $10^{-9}$  secondi).
- *Mode locking*: In questa modalità di funzionamento è possibile ottenere impulsi di durata estremamente breve, dell'ordine delle decine di femtosecondi ( $10^{-14}$  secondi). Attualmente le applicazioni industriali che utilizzano sorgenti che operano in mode locking sono del tutto trascurabili.

### **I.2.7. Polarizzazione**

Le onde elettromagnetiche sono costituite da due campi: uno elettrico e l'altro magnetico. La polarizzazione del fascio riguarda la modalità con cui questi campi si propagano nello spazio. Se i due vettori giacciono in due piani paralleli alla direzione di propagazione dell'onda si dice che l'onda ha una *polarizzazione lineare*. Se invece i due vettori, durante la propagazione in direzione  $z$ , ruotano attorno all'asse (descrivendo quindi una spirale) la polarizzazione è di tipo *circolare* (figura I.11). Infine, se ogni raggio costituente il fascio ha i vettori orientati in maniera casuale la polarizzazione è di tipo *casuale*.

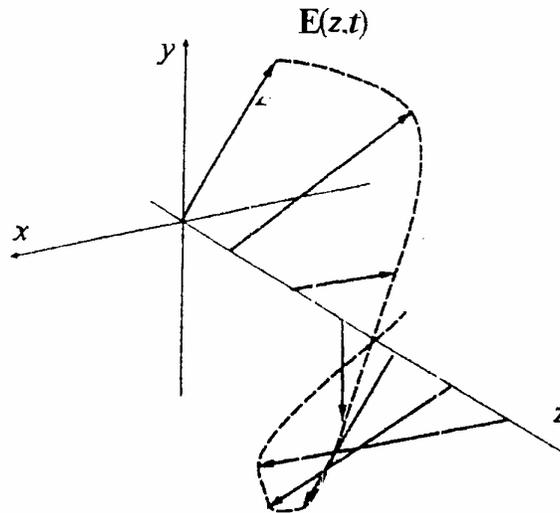
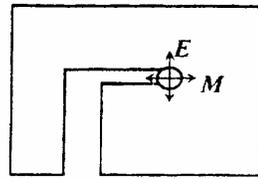
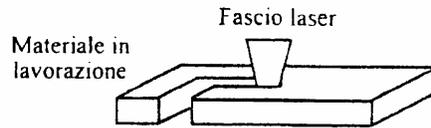


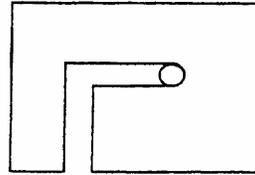
Figura I.11 – Polarizzazione circolare.

La polarizzazione lineare è generalmente da evitare in campo tecnologico, infatti alcuni materiali presentano una grande differenza di assorbimento di energia tra il campo elettrico e quello magnetico e, di conseguenza, la larghezza del solco ottenuta durante il taglio dipende dalla direzione dei vettori  $E$  ed  $B$  rispetto alla direzione di propagazione del taglio. Nel caso di taglio di uno spigolo (figura I.12) la larghezza del solco varia tra i due lati, fatto questo che può creare problemi nel caso di tagli di elevata precisione in cui siano richieste strette tolleranze dimensionali [6].

In generale per le lavorazioni meccaniche si preferisce quindi la polarizzazione circolare o casuale che garantiscono, grazie alla rapida variazione della direzione dei due vettori  $E$  ed  $B$  nel tempo, una maggior isotropia nell'interazione tra laser e materia (figura I.12).



Polarizzazione lineare



Polarizzazione circolare

Figura I.12 – Problemi tecnologici legati alla polarizzazione lineare.

### I.2.8. Geometria di un fascio laser e sua divergenza

La geometria che un fascio laser assume nella direzione di propagazione è del tutto particolare ed è riportata in figura I.13 [4].

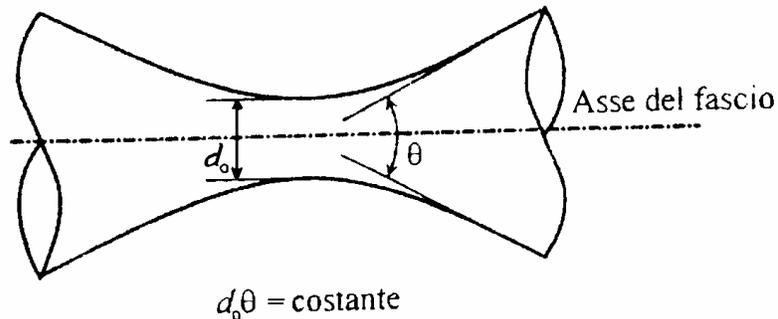


Figura I.13 – Geometria di un fascio laser:

$d_0$  = diametro minimo (fuoco)

$\theta$  = angolo di divergenza.

Come si può notare, il fascio ha una geometria convergente-divergente e presenta un punto di minimo diametro del fascio ( $d_0$ ). Questo punto viene detto *fuoco del fascio*, mentre la zona a cavallo di esso viene detta *collo del fascio*. In una zona

lontana dal collo, il fascio ha geometria conica con generatrici rettilinee e con angolo al vertice pari a  $\theta$ . Questo angolo è chiamato angolo di divergenza del fascio laser, ed è limitato dalla diffrazione. Si tratta di un fenomeno fisico fondamentale e non di un limite tecnico che può essere migliorato tramite una più accurata progettazione dell'ottica [1].

Per questo tipo di fasci vale la relazione:

$$\theta d_0 = k\lambda \quad (\text{I.13})$$

dove  $k$  è una costante positiva e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda. Il prodotto  $\theta*d_0$  è un parametro caratteristico del fascio e, una volta fissata la lunghezza d'onda, rimane costante se il fascio interagisce con sistemi ottici perfetti e privi di elementi di restrizione (aperture).

Anche quando viene generato il fascio assume la geometria descritta e quindi all'uscita della sorgente diverge con un angolo  $\theta$ . Il valore di questo angolo è in generale molto piccolo, dell'ordine dei miniradiani.

La divergenza del fascio in una zona lontana dalla sorgente è quindi pari a:

$$\theta = k \frac{\lambda}{d_0} \quad (\text{I.14})$$

dove  $d_0$  è il diametro minimo del fascio e generalmente cade in un punto interno alla sorgente.

Il valore della costante  $k$  dipende esclusivamente dalla distribuzione di densità della potenza del fascio, cioè dal suo profilo spaziale. Per un fascio gaussiano si ha:

$$k_g = \frac{4}{\pi} = 1.27 \quad (\text{I.15})$$

e, a causa della diffrazione, è il minor valore possibile per  $k$ . Un fascio per cui vale la precedente relazione viene detto *limitato dalla diffrazione*.

Il valore più piccolo che si può osservare per la divergenza di un fascio laser in uscita dalla sorgente è dato da:

$$\theta_g = \frac{4\lambda}{\pi d_0} \quad (\text{I.16})$$

In tutti gli altri casi è  $\theta > \theta_g$ . Si definisce allora il *fattore di propagazione del fascio*  $K$  il rapporto[5]:

$$K = \frac{\theta_g}{\theta} = \frac{k_g}{k} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{k} \quad (\text{I.17})$$

determinato a parità di  $d_0$ . Ovviamente è  $0 < K \leq 1$  e più il valore di  $K$  è vicino all'unità, più la distribuzione di irradianza è vicina alla distribuzione gaussiana. Il fattore di propagazione del fascio influenza radicalmente le caratteristiche del fascio nella zona di focalizzazione.

Al posto del fattore di propagazione del fascio in alcuni casi si preferisce utilizzare il *fattore di qualità del fascio*  $M^2$  definito come:

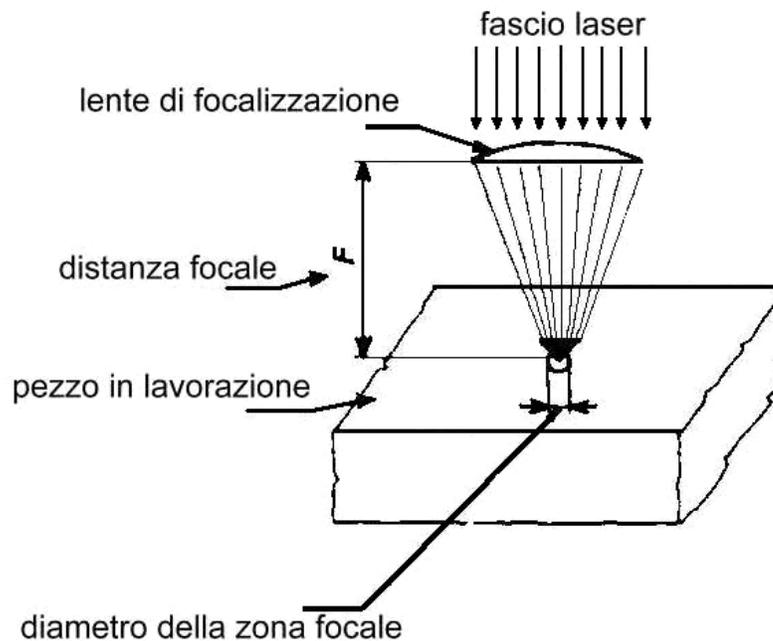
$$M^2 = \frac{1}{K} \quad (\text{I.18})$$

e ovviamente in questo caso è  $M^2 \geq 1$ .

Ricordando il significato dell' indicatore  $TEM_{mn}$  si intuisce come esista una correlazione stretta tra questo indicatore ed il valore di  $M^2$ : aumentando l' ordine dei modi elettromagnetici trasversi aumenta il valore del fattore  $M^2$ . Il valore unitario di  $M^2$  si ottiene invece se la distribuzione di densità di potenza è di tipo  $TEM_{00}$ , cioè gaussiana.

Il valore di  $M^2$  influenza direttamente la possibilità di focalizzare il fascio e, quindi, influenza profondamente il risultato della lavorazione [4].

Le suddette caratteristiche consentono di far convergere tutta la potenza disponibile, solitamente non elevata ed in alcuni casi piuttosto ridotta, su aree piccolissime (figura I.14). Ad esempio, concentrando una potenza di 2 kW (valore medio-alto per un laser) su una superficie circolare di diametro 0,2 mm si ottiene una densità di flusso termico pari a  $60 \text{ kW/mm}^2$ , cioè mille volte quella che esiste sulla superficie del sole o nel cratere di un arco elettrico. In tali condizioni qualsiasi materiale conosciuto fonde o volatilizza localmente in un lasso di tempo particolarmente breve [6].



*Figura I.14 - Focalizzazione del fascio sulla superficie del pezzo da lavorare.*

### I.3. Classificazione dei laser

I laser vengono generalmente classificati in base al materiale utilizzato (*materiale attivo*) che all'interno della cavità ottica può trovarsi allo stato gassoso, liquido o solido; in dipendenza da esso vengono adottate specifiche modalità di somministrazione dell'energia necessaria all'emissione (*pompaggio*), risultando differenti le prestazioni e di conseguenza i possibili utilizzi. In particolare, è possibile distinguere:

- *laser a cristalli ionici (stato solido)*: sono caratterizzati da un materiale attivo costituito da ioni di impurezze in una matrice solida. Il materiale attivo ha la forma di una barretta cilindrica con le facce terminali piane e parallele. Il pompaggio è di tipo ottico [1]. Tra questi tipi di laser è opportuno menzionare il laser a rubino ed il laser al neodimio in granato di alluminio ed ittrio. Il *laser a rubino* è storicamente il primo ad essere stato impiegato e tuttora è uno dei più diffusi; è caratterizzato da un rendimento decisamente basso e ha un funzionamento pulsato essendo elevata la quantità di calore da smaltire. Le lunghezze d'onda del fascio laser sono comprese tra  $0.6\mu\text{m}$  e  $2.6\mu\text{m}$  [3].
- *laser a gas*: il materiale attivo è costituito da una miscela gassosa contenuta in un tubo, generalmente di quarzo, nel quale il pompaggio è ottenuto mediante una scarica elettrica. Il più importante nell'industria meccanica è il laser a  $\text{CO}_2$ , che viene utilizzato per processi di foratura, saldatura e taglio. Si ricorda poi il laser ad *He-Ne*, nel quale il neon costituisce il materiale attivo, mentre l'elio ha la funzione di aumentare

l'efficienza del pompaggio. Infatti, la scarica eccita gli atomi di elio, il cui stato eccitato è molto vicino a quello del neon, rendendo così più selettiva l'eccitazione. La lunghezza d'onda è pari a  $0.66\mu\text{m}$ , la potenza ottenibile è circa 1 W.

- *laser a liquidi* (coloranti): il materiale attivo è un colorante organico disciolto in un opportuno solvente. A seconda del colorante, del solvente, della concentrazione e della temperatura l'emissione si può ottenere tra coppie differenti di livelli energetici; in questo modo è possibile variare la lunghezza d'onda nel campo del visibile: questa è la peculiarità di tali sistemi laser, che per contro hanno una potenza piuttosto bassa e spesso necessitano di un altro laser per il pompaggio. I vantaggi sono i costi piuttosto bassi e la facilità di raffreddamento, ottenuto facendo circolare il liquido in uno scambiatore di calore.
- *laser a semiconduttore*: si basano sull'accoppiamento di semiconduttori (diodo) di tipo  $p$  e  $n$  ottenuti drogando opportunamente cristalli di GaAs, nei quali il pompaggio si effettua facendo attraversare la giunzione  $p-n$  da correnti di elevata intensità. L'effetto laser è ottenuto dall'energia generata dallo spostamento forzato degli elettroni della zona  $n$  e delle lacune della zona  $p$  verso la giunzione. La lunghezza d'onda è di  $0.84\mu\text{m}$ . I rendimenti sono elevatissimi, prossimi all'unità, ma le potenze in pratica ottenibili sono piuttosto basse, fino a 1 W [6].

Nei prossimi paragrafi verranno analizzate in maniera più approfondita le sorgenti laser a CO<sub>2</sub> ed a Nd:YAG, visto il loro diffuso utilizzo nell' industria meccanica, e quelle a diodi in quanto spesso usate nel pompaggio delle sorgenti Nd:YAG.

Di seguito si riporta uno schema (figura I.15) delle lunghezze d'onda (in μm) che emettono i tipi di laser sopra brevemente esaminati.

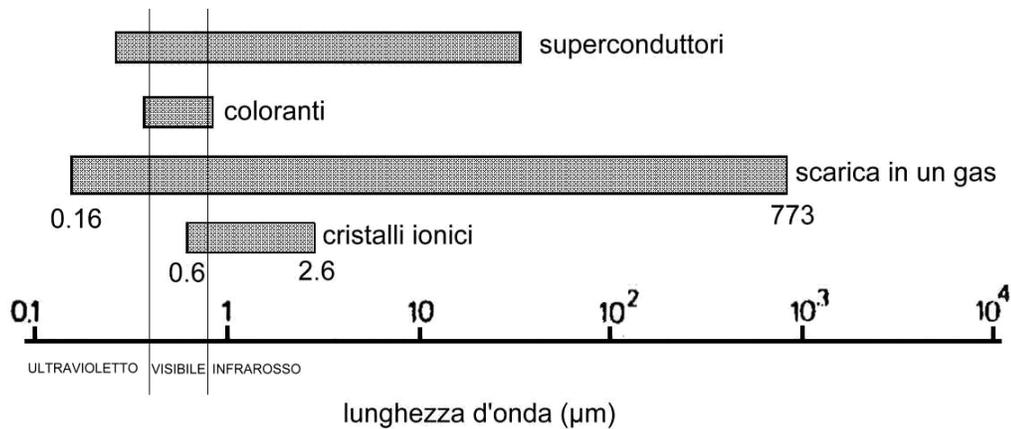


Figura I.15 - Spettro di emissione dei principali tipi di laser.

#### I.4. Sistemi di trasporto

I sistemi di trasporto del fascio utilizzabili sono due: una serie di specchi opportunamente orientati a costruire una *catena ottica*, oppure una guida d'onda denominata *fibra ottica*.

La catena ottica prevede il trasporto del fascio mediante specchi, è relativamente semplice, e può essere adottata con qualunque tipologia di sorgente e con qualunque profilo temporale. Il percorso ottico deve essere ovviamente costituito da tratti rettilinei, con uno specchio in ogni vertice, eventualmente dotato della mobilità richiesta. Il problema principale riscontrabile con l' utilizzo di specchi per

la movimentazione del fascio è legato al preciso allineamento che gli specchi devono avere durante il moto, che si riflette su una elevata precisione delle guide di scorrimento o di rotazione degli specchi.

La fibra ottica è costituita da un'anima a sezione circolare, in materiale trasparente al fascio laser, contenuta in una guaina esterna. L'aspetto esteriore di una fibra ottica è simile ad un cavo elettrico di grossa sezione e ne possiede quasi la medesima flessibilità. Il fascio laser viene immesso da un lato della fibra e fuoriesce dall'altra estremità.

Il funzionamento delle fibre ottiche si basa sul fenomeno della *totale riflessione interna* della luce.

Dato che nella maggior parte delle applicazioni industriali vi è un moto relativo tra fascio e pezzo, il sistema di trasporto, oltre a portare il fascio nella zona di lavorazione, deve garantire la presenza degli adeguati gradi di libertà di movimento. In linea generale sono necessari sei gradi di libertà per poter movimentare a piacimento un fascio laser rispetto ad un pezzo. In molti casi, però, la lavorazione avviene in un piano (come avviene ad esempio nel taglio di lamiere piane), e i gradi di libertà necessari per far avvenire la lavorazione scendono a due. Infine, alcuni dei gradi di libertà di cui deve essere dotato il fascio vengono conferiti al pezzo e, di conseguenza, il sistema di trasporto può essere dotato di un numero di gradi di libertà variabili tra zero (fascio fermo e pezzo in movimento) e sei (pezzo fermo e fascio in movimento)

## I.5. Sistemi di focalizzazione

Se il fascio laser viene trasportato mediante una *catena ottica* la focalizzazione del fascio laser può avvenire con due modalità differenti: per *trasmissione*, tramite una lente, o per *riflessione*, tramite uno specchio concavo (figura I.16).

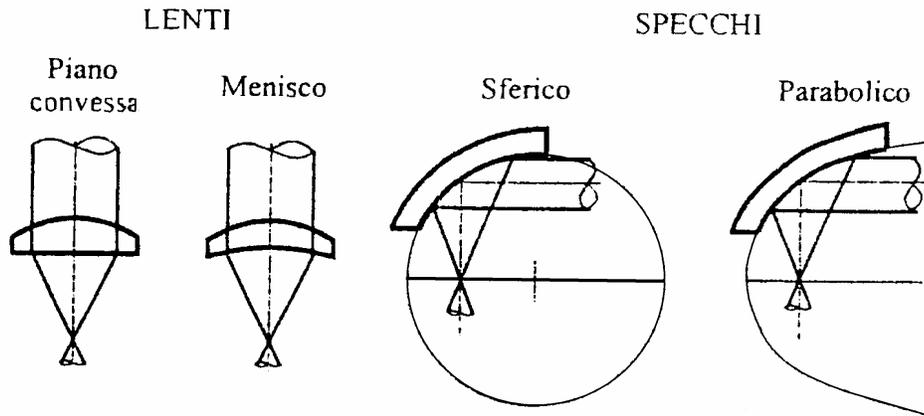


Figura I.16 – Focalizzazione del fascio attraverso lenti o specchi concavi.

Le lenti sono generalmente piano convesse o a menisco, mentre gli specchi sono parabolici o sferici. La prima soluzione è tipica dei laser Nd:YAG o delle sorgenti CO<sub>2</sub> di potenza relativamente bassa (indicativamente fino a 4 kW) in quanto per potenze superiori la lente subisce un eccessivo aumento di temperatura che porta al danneggiamento della lente stessa. La soluzione a specchi è invece tipica delle sorgenti laser CO<sub>2</sub>.

Invece la focalizzazione di un fascio trasportato mediante *fibra ottica* avviene con modalità differente da quanto descritto fino ad ora. Infatti all'uscita della fibra ottica il fascio diverge e deve essere focalizzato attraverso una coppia di lenti: una di *ricollimazione* ed una di *focalizzazione* (figura I.17).

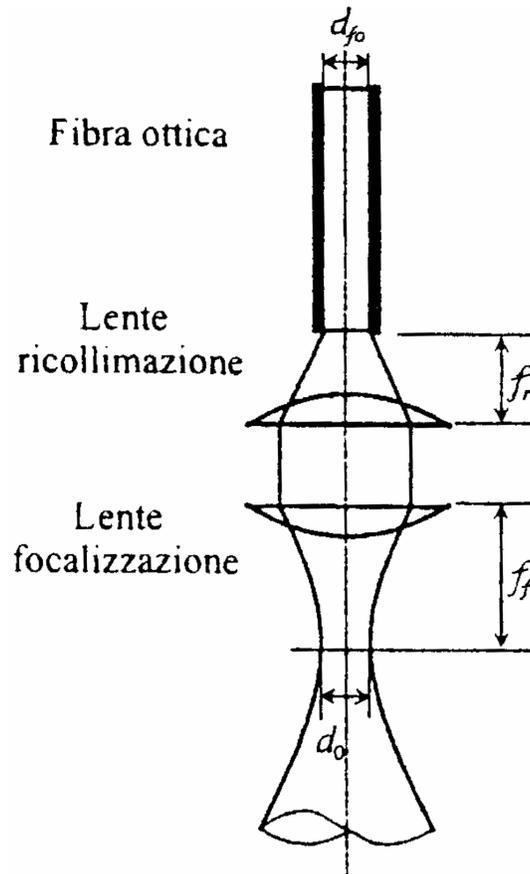


Figura I.17 – Focalizzazione del fascio rilasciato da una fibra ottica:

$f_r$  = focale ricollimazione

$f_f$  = focale focalizzazione

$d_{fo}$  = diametro fibra

$d_o$  = spot focale.

Indicando con  $f_r$  e  $f_f$  le lunghezze focali rispettivamente della lente di ricollimazione e della lente di focalizzazione il diametro dello spot focale è dato da:

$$d_o = d_{fo} \frac{f_f}{f_r} \quad (I.19)$$

dove  $d_{fo}$  è il diametro della fibra.

Lo *spot* (o *macchia*) è la superficie data dall'intersezione del fascio con la superficie in lavorazione. Per un fascio circolare e incidente in direzione normale

alla superficie in lavorazione lo spot è una circonferenza (figura I.18) il cui diametro  $d_s$  dipende dalla distanza  $h_f$  del fuoco rispetto alla superficie del pezzo in lavorazione, comunemente denominata *altezza del fuoco*.

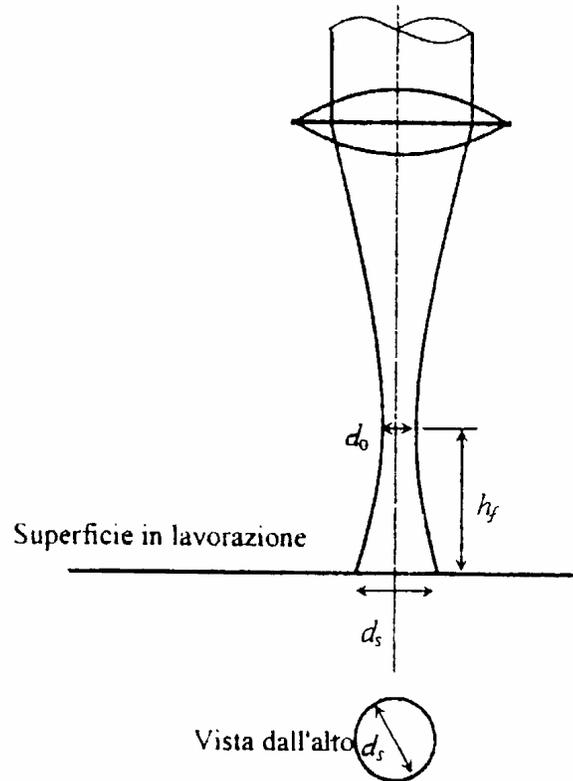


Figura I.18 – Diametro  $d_s$  dello spot laser sulla superficie del pezzo in lavorazione:  
 $h_f$  = altezza del fuoco     $d_0$  = spot focale.

Nel caso in cui la superficie sia posta nel fuoco del fascio si parla di *spot focale* (o *macchia focale*) e sarà  $d_s = d_0$ , in tutti gli altri casi è  $d_s > d_0$  [4].

## I.6. Il laser a CO<sub>2</sub>

Il laser a CO<sub>2</sub> ha trovato una notevole applicazione nel campo delle lavorazioni meccaniche: è utilizzato, in particolare, per la marcatura, la foratura, la saldatura e

il taglio. Le elevate densità di potenza raggiungibili lo rendono adatto a lavorazioni di grande precisione. Esso è attualmente il più potente (fino a 1 MW di potenza d'uscita in continua) ed uno dei più efficienti (tra 15 e 20% di efficienza, definita come rapporto percentuale tra potenza ottica di uscita e potenza elettrica immessa), superato in questo solo dai laser a semiconduttore [3].

In un gas molecolare, come è il CO<sub>2</sub>, la definizione di livelli energetici è sostanzialmente diversa da quella conosciuta riguardo agli atomi: in questo caso chiamiamo livelli energetici, o stati di eccitazione, i diversi modi di vibrare delle molecole del gas. I tre fondamentali modi vibrazionali delle molecole di CO<sub>2</sub>, dunque, sono caratteristici dei tre stati di eccitazione disponibili, come mostrato in figura I.19, nella quale si possono distinguere: 1) modo longitudinale simmetrico; 2) modo trasversale o di piegamento; 3) modo longitudinale antisimmetrico [6].

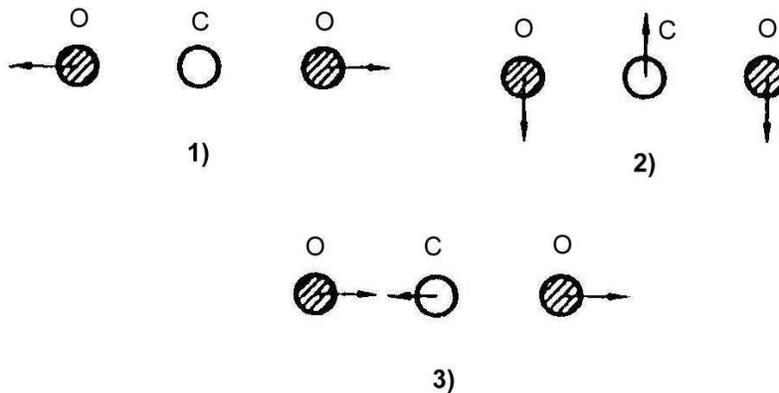


Figura I.19 - Modi di vibrare delle molecole di CO<sub>2</sub>.

La lunghezza d'onda del laser a CO<sub>2</sub> è di 10,6 μm.

Oltre all'anidride carbonica, nella cavità risonante (figura I.20) sono presenti anche N<sub>2</sub> ed He, il cui scopo è di migliorare l'efficienza del processo.

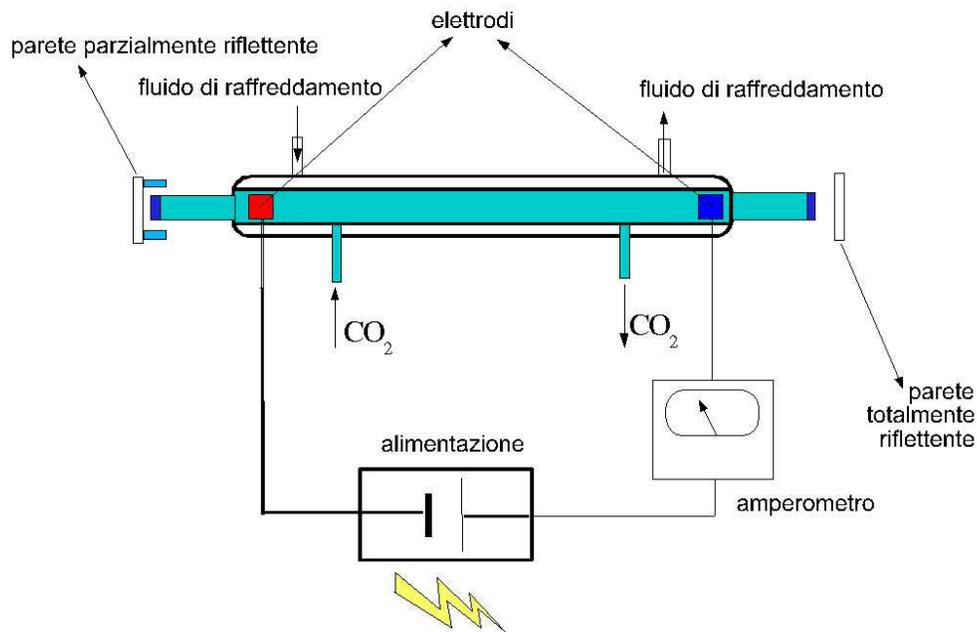


Figura I.20 - Schema di un impianto laser a  $CO_2$ .

L'azoto, che ha una molecola più semplice del  $CO_2$ , una volta eccitato si trova ad un livello energetico molto vicino a quello superiore del materiale attivo e ne favorisce in tal modo l'eccitazione.

Ciò migliora l'efficienza del processo di eccitazione delle molecole di  $CO_2$  e di conseguenza il rendimento del processo stesso [2]. La funzione dell'elio è, invece, quella di assorbire l'energia in eccesso che il  $CO_2$  conserva dopo l'emissione, riportandole allo stato diseccitato e permettendo così che le molecole di  $N_2$  possano riprendere ad eccitarle. Si rende così necessario un potente sistema di raffreddamento, effettuato o mediante un fluido che lambisce le pareti della cavità oppure facendo circolare la miscela di gas attraverso uno scambiatore di calore esterno. Il laser a  $CO_2$  è particolarmente utilizzato nel funzionamento continuo, contraddistinto dalla sigla CW, dall'inglese *Continuous Wave*.

Esistono diverse tipologie di sorgenti laser CO<sub>2</sub> disponibili commercialmente che vengono impiegate per le lavorazioni industriali:

- *Sorgenti sigillate*: sono le sorgenti più piccole e compatte della famiglia dei laser a CO<sub>2</sub>. La sorgente è costituita sostanzialmente da un tubo di vetro contenente la miscela di gas. Il termine “sigillate“ sta ad indicare che la miscela gassosa nella cavità risonante viene immessa nella sorgente all’atto della produzione di quest’ultima. Le potenze di uscita tipiche variano tra i 15 W e i 200 W, ma è possibile ottenere potenze maggiori (generalmente fino a 500 W) accoppiando otticamente due o più sorgenti di potenza più bassa. L’applicazione industriale tipica di queste sorgenti è la marcatura o il taglio di materiali non metallici.
- *Flusso assiale*: Sono costituite da un tubo di vetro in cui viene immessa la miscela di gas da un’estremità e estratta dall’altra. Una volta estratta, la miscela viene raffreddata e di nuovo pompata nella sorgente consentendo così di estrarre una potenza maggiore rispetto alle sorgenti sigillate. Di sorgente a flusso assiale esistono due tipi a seconda della velocità del gas all’interno della cavità: a *flusso lento* (potenza di 60 W – 80 W per metro di lunghezza della sorgente) e a *flusso veloce* (potenza di 800 W per metro di lunghezza della sorgente). L’applicazione tipica è il taglio di lamiere e la saldatura di piccoli particolari.
- *Flusso trasversale*: il gas fluisce circolarmente all’interno di un tamburo sotto l’azione di una turbina. Durante il moto circolare il gas attraversa la zona dove vi è la generazione del fascio, subendo un riscaldamento, per

poi passare attraverso uno scambiatore di calore che provvede a raffreddarlo. Le potenze massime ottenibili sono di alcune decine di kW, ma la qualità del fascio è molto bassa. L'applicazione tipica è la saldatura di carpenteria metallica.

- *Capillari*: sono costituite da una cavità di geometria parallelepipedica di basso spessore. Le due facce di maggiore estensione della camera contenente il gas sono realizzate in rame e costituiscono i due elettrodi tra cui avviene la scarica elettrica necessaria per generare l'inversione di popolazione. La potenza massima che può essere ricavata raggiunge i 6 kW. Le sorgenti capillari sono, a parità di potenza del fascio, meno costose rispetto alle altre tipologie di sorgenti in commercio e, necessitano di una minore manutenzione.

### **I.7. Il laser a Nd:YAG**

Le sorgenti a neodimio in granato di ittrio e alluminio (Nd:YAG) costituiscono oggi la sorgente allo stato solido più diffusa nelle applicazioni industriali. Le sorgenti possono lavorare in regime sia pulsato che continuo e con potenze che possono variare da pochi Watt fino a circa 6 kW. La potenza tipica delle sorgenti è di 500 W medi in regime pulsato e 1 kW in continuo.

Nelle sorgenti Nd:YAG il mezzo attivo è costituito da ioni di neodimio ( $\text{Nd}^{3+}$ ) che vengono contenuti in cristalli di YAG. Quest'ultimo è un cristallo sintetico di granato di ittrio e alluminio ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ). Sono state sviluppate anche sorgenti che utilizzano come mezzo attivo il Nd:vetro, ma rispetto allo YAG il vetro ha una

maggior conduttività termica (presenta quindi una minore propensione alla rottura per shock termico) ed è più adatto per la generazione di impulsi molto brevi con grande potenza di picco.

Il pompaggio energetico è di tipo ottico, effettuato mediante una sorgente luminosa. In commercio esistono due sistemi di pompaggio ottico differenti:

- *Lampade*: è la modalità più tradizionale per il pompaggio ottico. Vengono utilizzate lampade al tungsteno per le sorgenti in continuo e allo “*xeno*” o “*kripton*” per le sorgenti pulsate. Queste lampade non sono monocromatiche ma presentano una emissione su diverse frequenze e, al contrario delle sorgenti CO<sub>2</sub>, il livello energetico raggiunto dal mezzo attivo attraverso il pompaggio non è unico, ma è distribuito su una “fascia” di valori energetici.
- *Diodi laser*: negli ultimi anni sono state messe a punto delle sorgenti Nd:YAG che utilizzano diodi laser per il pompaggio ottico. Il fascio laser generato dai diodi ha le caratteristiche adatte (principalmente la lunghezza d’onda) per pompare energia nel Nd:YAG in maniera molto efficiente. Solitamente il diodo viene posizionato in maniera tale da illuminare una delle due estremità della barretta e il flusso di fotoni di eccitazione è quindi diretto assialmente e non trasversalmente come accade nelle sorgenti a lampade. Grazie alla caratteristica di monocromaticità del diodo laser rispetto alle lampade tradizionali e al conseguente elevato accoppiamento energetico tra sorgente di pompaggio e barretta YAG si

ottiene un aumento della efficienza globale della sorgente rispetto alla tradizionale soluzione con lampade.

La sorgente Nd:YAG ha uno schema energetico a quattro livelli (figura I.21).

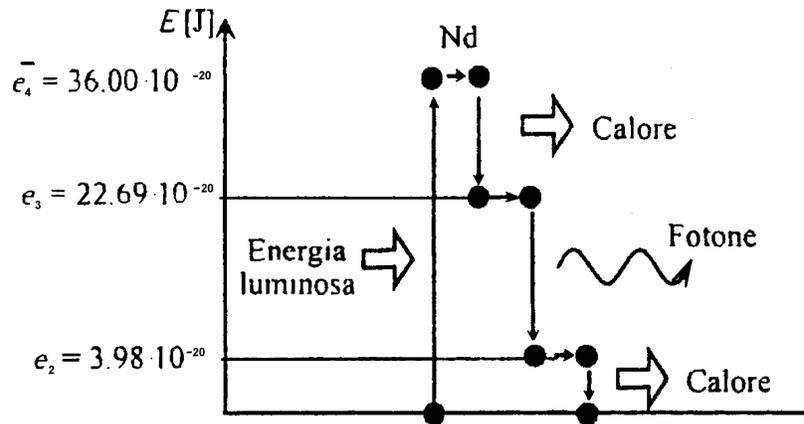


Figura I.21 – Schema energetico di una sorgente Nd:YAG.

L'emissione laser avviene nel passaggio dal terzo ( $e_3$ ) al secondo livello ( $e_2$ ). Il tempo di permanenza al terzo livello energetico (livello metastabile) è di circa 250  $\mu\text{s}$  e la lunghezza d'onda della radiazione emessa è pari a  $\lambda_{\text{Nd:YAG}} = 1,064 \mu\text{m}$  ed è quindi situata nella zona del vicino infrarosso. La lunghezza d'onda del fascio generato da una sorgente Nd:YAG è circa dieci volte più piccola del fascio generato da una sorgente  $\text{CO}_2$ .

L'efficienza globale delle sorgenti Nd:YAG si attesta al di sotto del 5% se pompate mediante lampade, mentre quasi raddoppia se pompate mediante diodi laser.

La qualità del fascio è generalmente peggiore rispetto alle sorgenti CO<sub>2</sub>, però può essere migliorata tramite sistemi ottici fino a raggiungere la distribuzione gaussiana, a discapito della potenza massima ottenibile.

La distribuzione di potenza è quindi molto lontana dalla distribuzione gaussiana e questo fatto ha importanti implicazioni sulla possibilità di focalizzazione del fascio stesso. In generale le sorgenti Nd:YAG pompate mediante diodi presentano una qualità del fascio migliore rispetto alle sorgenti pompate a lampade.

Esistono due tipologie di sorgenti laser commerciali Nd:YAG.

- *Sorgenti a barrette*: è la più diffusa ed è costituita da una o più barrette di Nd:YAG di sezione circolare di circa una decina di millimetri di diametro e una decina di lunghezza. Queste barrette sono poste all' interno di una camera che generalmente ha sezione a doppia ellissi in cui il fuoco comune alle due ellissi è occupato dalla barretta, mentre le lampade per il pompaggio sono posizionate nei due fuochi restanti (Figura I.22). All' interno della camera fluisce il liquido di raffreddamento (generalmente acqua) che consente di smaltire il calore generato. Semplicemente montando più barrette in serie (dotandole delle rispettive lampade di pompaggio) è possibile aumentare la potenza della sorgente, modulandola in relazione alle necessità dettate dall' applicazione.

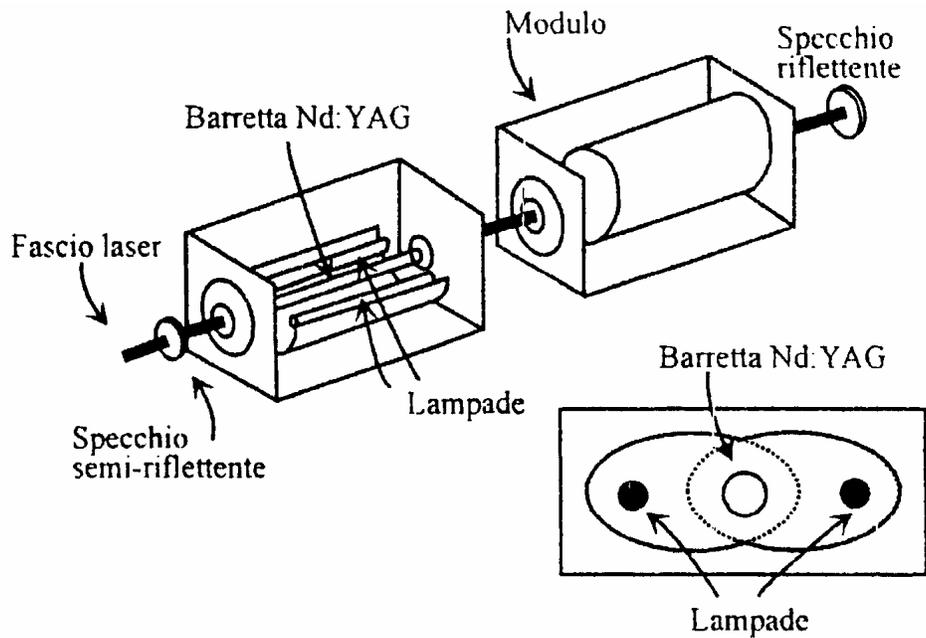


Figura I.22 – Schema di funzionamento di una sorgente Nd:YAG a barrette.

- *Sorgenti a capillari*: in queste sorgenti il mezzo attivo è costituito da una “fetta” di Nd:YAG (figura I.23). Le lampade sono poste in modo tale da illuminare la “fetta” di materiale attivo attraverso le superfici più ampie, in modo da aumentare l’efficienza dell’ inversione di popolazione. Il fascio emesso viene corretto otticamente all’uscita della sorgente per migliorarne la qualità ottica e conferirgli una sezione circolare.

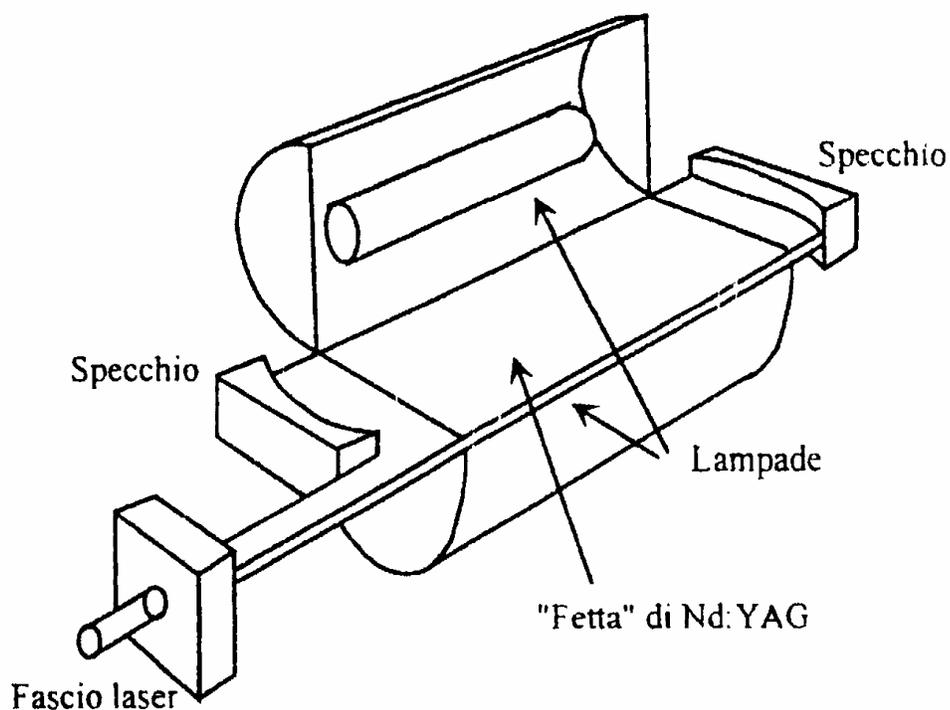


Figura I.23 – Schema di una sorgente Nd:YAG di tipo capillare.

Indipendentemente dalla geometria del mezzo attivo, il Nd:YAG presenta il problema denominato effetto *lente termica*: durante il funzionamento la barretta si riscalda e si deforma, facendo sì che le facce di estremità perdano la planarità e si comportino come delle vere e proprie lenti. Questo fa sì che all' aumentare della potenza di uscita del fascio, a causa dell' aumentare della temperatura nella barretta aumenti anche la divergenza del fascio e, conseguentemente, la distanza tra la lente di focalizzazione e il punto di fuoco. L'effetto ultimo di questa relazione tra potenza e divergenza del fascio è di compromettere la precisione di focalizzazione [4].

## **I.8. Il laser a Diodi**

Sebbene messe a punto più di trenta anni fa, solo recentemente i diodi di potenza hanno subito uno sviluppo tale, soprattutto in termini di massima potenza ottenibile, da poter essere adottati nelle lavorazioni dei materiali. Questo sviluppo ha portato alla messa a punto di sorgenti fino a circa 6 kW di potenza, valore che le ha fatte entrare di diritto nel panorama delle sorgenti industriali.

Il funzionamento di un diodo laser è differente dal funzionamento delle sorgenti viste fino ad ora. Infatti, il pompaggio energetico avviene in maniera diretta e richiede una breve analisi della struttura dei solidi quantici e, in particolare, dei semiconduttori.

Passando dal singolo atomo al reticolo cristallino costituente un solido, i livelli energetici ammissibili dal solido si trasformano in bande energetiche. Una banda è quindi formata da un grande numero di livelli corrispondenti ai livelli energetici possibili di ogni singolo atomo, estremamente vicini tra loro. Le bande sono energeticamente distanziate tra loro e i valori intermedi non possono essere assunti dal solido, al pari di quanto accade in un singolo atomo per i livelli energetici posti tra due livelli quantici ammissibili.

Le bande energetiche più interessanti sono quelle legate alla mobilità degli elettroni e sono la banda di conduzione (più esterna) e la banda di valenza (più interna – figura I.24).

Un materiale conduttore ha la banda di valenza completa (tutte le possibili posizioni sono occupate da elettroni) e la banda di conduzione solo in parte occupata da elettroni (figura I.24). Questi elettroni possono essere facilmente

spostati all' interno del materiale, consentendo così il passaggio di corrente. Un materiale isolante ha la banda di valenza completa e la banda di conduzione vuota: è possibile avere conduzione di corrente solo se un elettrone passa dalla banda di valenza a quella di conduzione. Dato però che la distanza minima tra le bande  $E_g$  è piuttosto elevata, la conduzione è impedita (almeno per bassi valori di differenza di potenziale applicata).

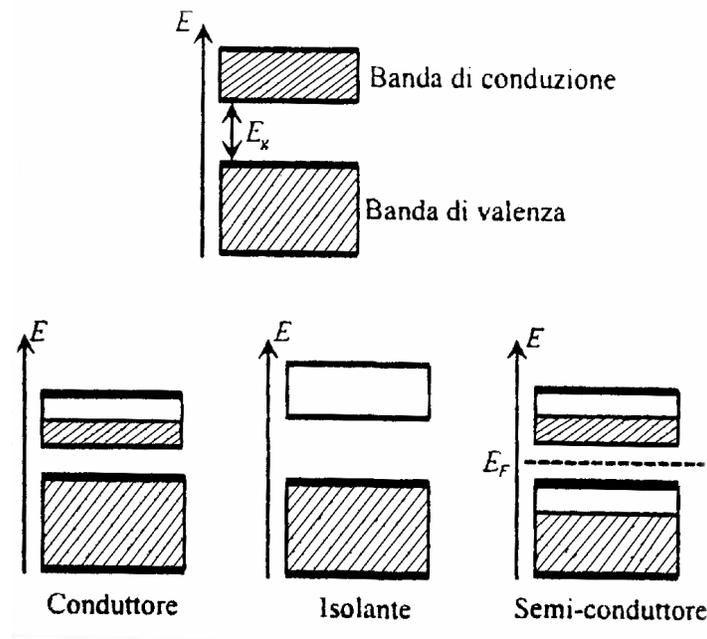


Figura I.24 – Bande energetiche nei solidi.

I semiconduttori, come l'arseniuro di gallio (GaAs), presentano una struttura intermedia: la banda di valenza è parzialmente piena, mentre alcuni elettroni occupano la banda di conduzione che, analogamente a quella di valenza, è solo parzialmente piena. Inoltre, la distanza energetica  $E_g$  tra le due bande è piuttosto bassa ed è quindi facile (dal punto di vista energetico) che gli elettroni passino dalla banda di valenza a quella di conduzione, consentendo il passaggio di

corrente elettrica. In pratica nei semiconduttori gli elettroni continuano a spostarsi dalla banda di valenza a quella di conduzione, e viceversa.

Per un semiconduttore si ha  $E_F = E_g/2$  dove  $E_F$  è il *livello energetico di Fermi*, cioè il livello di energia medio in cui si trovano gli elettroni che continuano a spostarsi tra le due bande.

All' interno della struttura di un semiconduttore possono essere inseriti degli ioni di un elemento differente, i quali possono fornire o acquisire elettroni dalla struttura atomica del semi-conduttore. In questo caso il semiconduttore viene detto “drogato” (figura I.25).

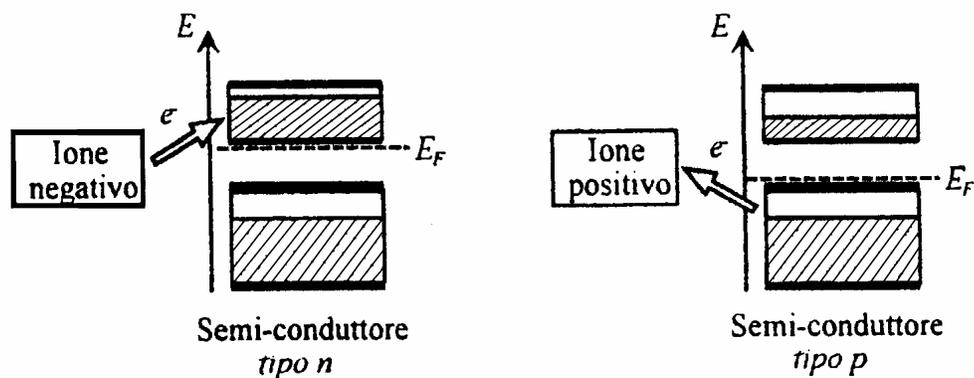


Figura I.25 – Semi-conduttori p e n.

Se vengono inseriti ioni negativi, questi ultimi “donano” elettroni alla banda di conduzione generando una situazione di non equilibrio in cui  $E_F > E_g/2$  e in questo caso si genera un semi-conduttore di *tipo n*. Se invece il semi-conduttore viene drogato con ioni positivi, quest’ultimo accetterà elettroni prevalentemente

della banda di valenza, ottenendo la situazione opposta alla precedente in cui  $E_F < E_g/2$ . In quest'ultimo caso si genera un semi-conduttore di *tipo p*.

Affiancando un semiconduttore di tipo *p* ad uno di tipo *n* si ottiene una giunzione *p-n*. All'equilibrio, nella zona di interfaccia le relative bande energetiche si dispongono come in figura I.26 e per tutto il solido (compresa la giunzione)  $E_F$  è costante.

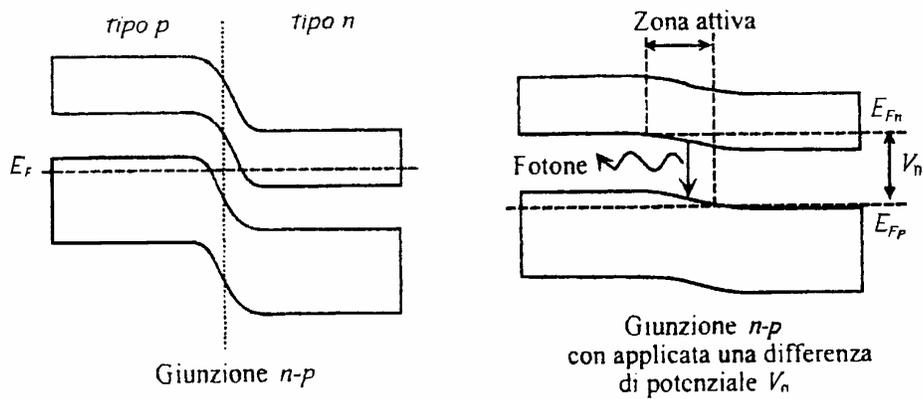


Figura I.26 – Una giunzione *p-n* e emissione di radiazione laser.

La costanza del livello di Fermi viene alterata se si applica una differenza di potenziale tra i due elementi della giunzione. In questa situazione il livello energetico di Fermi è differente per i due lati della giunzione *p-n* e una stretta zona a cavallo dell'interfaccia gli elettroni mediamente passano dalla banda di conduzione del semiconduttore di tipo *n* alla banda di valenza del tipo *p*. Questo passaggio avviene con cessione di energia sotto forma di emissione di un fotone (figura I.26). Anche questa forma di emissione può essere stimolata per generare un fascio laser.

Di conseguenza, nei diodi laser è la giunzione tra due semiconduttori a costituire il mezzo attivo. Il pompaggio energetico di fatto avviene attraverso la polarizzazione diretta della giunzione, cioè attraverso il passaggio di corrente. In questo tipo di laser la coppia di specchi che definiscono la cavità è costituita dalle due facce di estremità del cristallo semiconduttore, le quali riflettono i fotoni internamente (figura I.27).

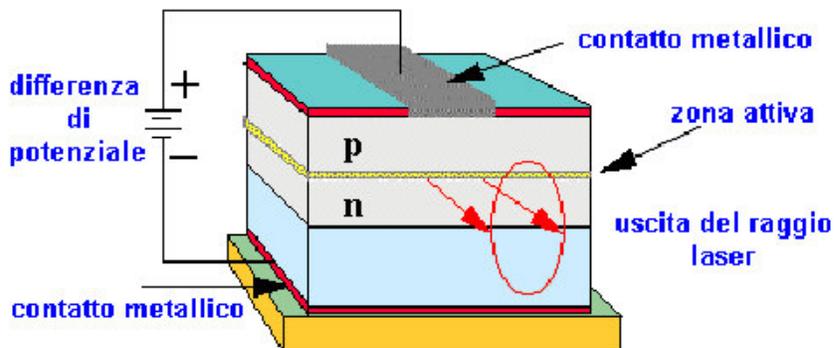


Figura I.27 – Schema di funzionamento di una sorgente a diodi di potenza.

La lunghezza d'onda di emissione dei diodi laser varia tipicamente tra  $0.80\mu\text{m}$  e  $0.95\mu\text{m}$ , in relazione anche alla temperatura di esercizio, e ricade quindi nel vicino infrarosso, al limite del visibile. Grazie al pompaggio energetico eseguito direttamente attraverso la giunzione  $p-n$  l'efficienza globale raggiunge circa il 30%.

Nelle sorgenti commerciali vengono affiancate più giunzioni del tipo  $p-n$  fino a formare uno *stack* di diodi in grado di emettere una “linea di emissione laser” in corrispondenza di ogni giunzione (figura I.28).

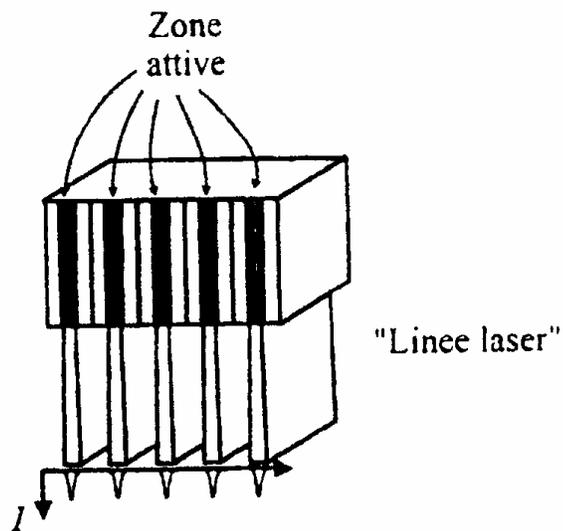


Figura I.28 – Stack di diodi laser.

I diodi commerciali di potenza sono costituiti da più stack (generalmente due o tre) posizionati in maniera tale che le linee di emissione dei vari stack siano affiancate, generando quindi un fascio relativamente continuo (figura I.29).

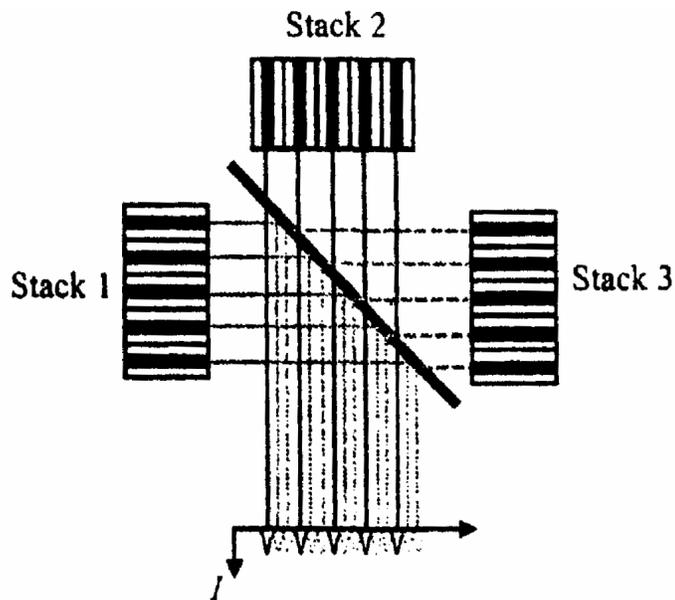


Figura I.29 – Esempio di accoppiamento ottico di più stack di diodi.

L'accoppiamento ottico viene ottenuto utilizzando particolari specchi in grado di riflettere o di trasmettere la radiazione elettromagnetica a seconda della polarizzazione. Il fascio così generato ha una sezione rettangolare che nella zona di fuoco è di circa 6 mm x 2 mm e può essere variato adottando lenti opportune.

La principale caratteristica dei diodi laser è la ridotta dimensione della sorgente stessa (un diodo laser da 6 kW è grande poco più di una scatola da scarpe) che facilita grandemente l'automazione delle lavorazioni che vedono coinvolte un laser di potenza.

Ad oggi non è possibile focalizzare i diodi laser su una piccola area (la dimensione minima è indicativamente dell'ordine di 2 mm x 1 mm), di conseguenza le applicazioni sono limitate a lavorazioni particolari, come la saldatura per conduzione e i trattamenti termici [4].

### **I.9. Applicazioni industriali**

Le applicazioni industriali del laser, nelle lavorazioni meccaniche, sono molteplici e piuttosto diversificate tra loro. Ogni applicazione ha bisogno di caratteristiche particolari del fascio, questo fatto impedisce l'uso della stessa sorgente per più lavorazioni, con eccezione di alcuni casi. Le principali lavorazioni industriali in cui viene utilizzata un fascio laser sono:

- *Taglio*: il laser viene utilizzato per il taglio di lamiere (con spessori variabili da pochi millesimi di millimetro fino a 30 mm circa) di materiale metallico e, più raramente di materiale non metallico. Rispetto alle altre tecnologie il taglio laser avviene con una elevata velocità (dell'ordine di

decina di metri al minuto) e la qualità del solco ottenuto è decisamente buona.

- *Saldatura*: il fascio viene usato come sorgente di calore per fondere e unire due lembi di un materiale. Il principale punto di forza di questa tecnologia è il limitato apporto termico riuscendo ad avere così ridotte distorsioni sul materiale. Le profondità di penetrazione della saldatura possono variare dai decimi di millimetro alle decine di millimetro. Grazie all'adozione del laser è possibile utilizzare la saldatura come tecnica di giunzione là dove altre tecniche tradizionali non possono essere applicate.
- *Marcatura*: il fascio laser di potenza relativamente contenuta è utilizzato per ottenere una modificazione superficiale del materiale che è chiaramente visibile all'occhio umano. La marcatura è la prima applicazione industriale del laser per numero di sorgenti installate.
- *Trattamento termico*: il laser viene utilizzato per imporre un determinato ciclo termico ad uno strato di materiale prossimo alla superficie di un pezzo (un esempio è la tempra superficiale di acciaio). Le distorsioni indotte dall'apporto termico del laser sono estremamente contenute rispetto alle tecniche alternative.
- *Microforatura*: è la realizzazione di fori dello stesso ordine di grandezza del diametro del fascio focalizzato (pochi millesimi di millimetro), con tolleranze dimensionali strette e ripetibilità elevata

- *Riporto*: con il laser è possibile depositare materiale di apporto su un materiale base, generando, attraverso la fusione sia del riporto che del substrato, un legame metallurgico.

#### **I.10. Considerazioni sulla sicurezza**

Tutte le apparecchiature laser producono raggi di luce monocromatica intensa che può presentare rischi biologici e potenziali. Questi rischi dipendono da numerosi fattori incluso la lunghezza d'onda, il potere energetico del raggio e la durata dell'emissione. L'occhio è l'organo più vulnerabile, specie se si prende cura di focalizzare la luce dal laser sulla retina, che a causa dell'azione di focalizzazione del cristallino aumenta drasticamente la densità di energia. Se la potenza del laser è sufficientemente alta, l'esposizione al raggio può causare anche danni alla pelle.

Esiste una normativa che classifica la sorgente laser in funzione dei suoi effetti sull'uomo e limita le applicazioni in funzione delle caratteristiche stesse. Dall'analisi di questa normativa risultano sicuri solo le sorgenti di Classe I, Classe II e Classe III, a questa si va ad aggiungere la presenza dell'ordinanza 16 luglio 1998, Gazzetta Ufficiale n. 167 del 20-07-1998, che impedisce la vendita di puntatori di classe uguale e/o superiore a quella III. Tuttavia solo le sorgenti di Classe I risultano intrinsecamente sicure per i fini suddetti.

L'incolumità al laser è coperta dalla normativa BS (EN) 60825 che richiede la classificazione del laser secondo le caratteristiche del raggio. Questa normativa è essenziale per tutti gli utenti laser e per i produttori di oggetti utilizzando sorgenti laser. Quando sono classificati come apparecchiature O.E.M., lunghezza d'onda e

condizioni di potenza di uscita sono conformi alla Classe I, Classe II, Classe III dei prodotti laser.

Un laser O.E.M., può avere bisogno dell'aggiunta di un indicatore di 'on' visibile, un interruttore di raggio ed un interruttore a chiave, per essere completamente conforme a tutte le richieste della certificazione descritta nel BS (EN) 60825. Comunque, qualsiasi prodotto che incorpora un laser deve essere certificato secondo le sue normative, indipendentemente dal fatto che il laser sia certificato o non. Il modo col quale il laser è usato in un prodotto può alterare anche la sua classificazione originale, è perciò la responsabilità del fabbricante del prodotto assicurare conformità con gli standard attinenti.

I prodotti laser di Classe I emettono luce visibile e non rappresentano in alcun modo un potenziale pericolo per il corpo umano.

I prodotti laser di Classe II emettono luce visibile e sebbene non siano completamente sicuri, la protezione dell'occhio avviene normalmente come risposta di avversione, incluso il battito di ciglia. Un'osservazione casuale non è pericolosa, specie se sono utilizzati aiuti ottici (occhiali, binocoli, telescopi, ingranditori e apparecchiature simili). L'utente dovrebbe evitare di guardare fisso nel raggio. Nessun danno della pelle risulterà all'esposizione al raggio.

I prodotti laser di Classe III possono emettere radiazione visibile o invisibile, sono potenzialmente pericolosi se un raggio diretto o una riflessione speculare è vista da un occhio indifeso (vista del raggio). Le precauzioni seguenti dovrebbero essere prese per evitare una vista diretta del raggio e per controllare riflessioni speculari.

- A. Il laser dovrebbe essere utilizzato solamente in un'area controllata.
- B. Si deve prendere cura a prevenire riflessioni speculari non intenzionali.
- C. Il raggio laser dovrebbe essere terminato, dove possibile, alla fine del suo percorso utile da un materiale che lo diffonda e di colore e riflessione tali da far sì che il pericolo del raggio sia ridotto al minimo.
- D. Si richiede protezione dell'occhio se c'è qualsiasi possibilità di osservazione diretta, o riflesso speculare, del raggio o di una riflessione diffusa.
- E. Agli ingressi di aree controllate dovrebbero essere affissi segnali di avvertimento laser. Qualsiasi compagnia o organizzazione che intenda usare un laser di Classe III, o laser di potenza e lunghezza d'onda comparabile, dovrebbe nominare un addetto alla sicurezza il cui compito è quello di assicurare che le procedure di sicurezza siano correttamente seguite in ogni momento.

# **Capitolo II**

## **Marcatura laser**

## **II.1. Nozioni generali**

La marcatura laser viene utilizzata per incidere in maniera indelebile scritte e disegni su un oggetto solido ma non necessariamente rigido. E' quindi possibile incidere scritte, numeri di serie, loghi, codici a barre, e così via, su un'amplissima gamma di materiali: acciaio, plastica, vetro, legno, pelle, cartone, ecc.

I meccanismi fisici con cui è possibile effettuare una marcatura laser sono sostanzialmente di tre tipi. Il primo prevede l'esecuzione di un'incisione superficiale attraverso la vaporizzazione di un piccolo strato di materiale, incisione che risulta essere visibile dall'occhio umano. Gli altri due meccanismi si basano sulla generazione di composti superficiali e sulla trasformazione della microstruttura del materiale. Per entrambi i meccanismi il risultato ultimo è una variazione dell'indice di rifrazione, e dato che le proprietà di riflessione della luce sono legate a tale indice, la zona esposta al fascio risulta visibile all'occhio umano.

Anche la modalità con cui viene eseguita la marcatura laser non è unica e dipende dall'oggetto da marcare, dal materiale e dal tempo richiesto. La modalità più diffusa prevede l'utilizzo del fascio laser come una sorta di matita: opportunamente movimentando il fascio (con sistemi automatici che consentono una grande precisione e un'elevata velocità) è possibile realizzare scritte o disegni di qualunque natura.

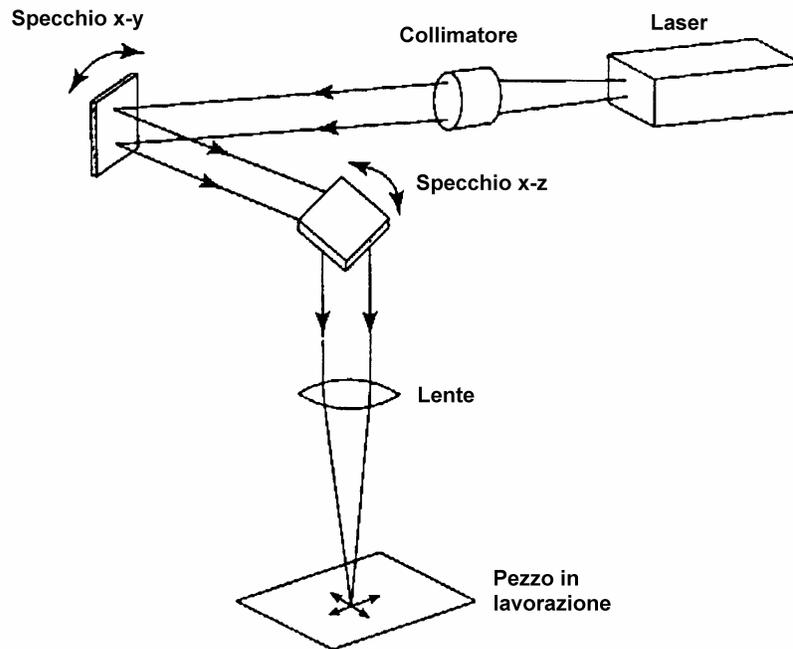
La marcatura laser è, tra le applicazioni laser, quella che conta il maggior numero di sistemi installati, dovuto principalmente al ridotto impegno economico richiesto per acquistare un sistema di marcatura.

## II.2. Tipologie di sorgenti per la marcatura laser

Esistono tre diverse modalità per eseguire una marcatura laser ed ognuna presuppone l'utilizzo di una *testa per marcatura* specifica [4].

- *Marcatura lineare*: lo schema di una testa di marcatura lineare è riportata in figura II.1. Il fascio emesso dalla sorgente viene reso parallelo dal collimatore e successivamente deflesso da due specchi che possono ruotare attorno ad un asse contenuto nel piano della superficie dello specchio. Gli assi dei due specchi sono sghembi e la proiezione di un asse sull'altro forma un angolo di  $90^\circ$ . La rotazione dei due specchi è comandata tramite due motori che consentono un angolo di rotazione di circa  $\pm 25^\circ$ . Il sistema di specchi motorizzati viene denominato *galvanometro*. Il fascio così deflesso attraversa una lente che lo focalizza sul componente da marcare. In questo modo si ottiene un sistema di spostamento del fascio estremamente pronto e veloce, che consente di movimentare lo spot focale con grande precisione, velocità e accelerazione. Mediante un opportuno controllo del movimento dei due specchi è possibile spostare lo spot del fascio sul piano sottostante, generando quindi il disegno. Questa soluzione è adottabile anche grazie al fatto che la marcatura non richiede la presenza di un gas di apporto. La focalizzazione viene effettuata attraverso una particolare lente (*lente a campo piano* o *theta lens*) posta dopo i due galvanometri. La massima area marcabile con questo sistema è tipicamente di circa

200 mm x 200 mm, se si sposta lo spot in una zona esterna a questa area il fuoco si solleva e si ha quindi una perdita di precisione.



*Figura II.1 – Testa di marcatura con lente a campo piano [8].*

Quando è necessario marcare aree più grandi è possibile effettuare la focalizzazione attraverso una lente posta prima dei due galvanometri e dotare la lente di un asse aggiuntivo (figura II.2): in questo modo, programmando opportunamente lo spostamento della lente, è possibile mantenere il fuoco del fascio nel piano di lavoro ed estendere quindi l'area marcabile a circa 400 mm x 400 mm. Lo svantaggio derivante da un sistema a tre assi è che le massime velocità di marcatura sono leggermente minori rispetto alla soluzione a due assi.

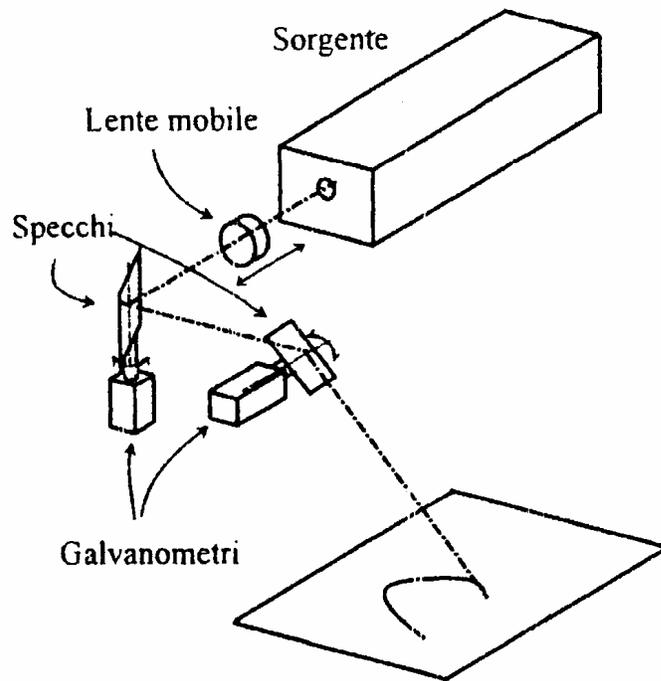


Figura II.2 – Testa di marcatura con lente mobile.

- *Marcatura a scansione:* in questa modalità di marcatura il fascio laser effettua una scansione di un'area rettangolare e il fascio viene attivato solo nei punti che devono essere marcati. La testa di scansione è raffigurata in figura II.3, ed è simile a quello lineare salvo per il fatto che uno dei due galvanometri viene sostituito da un prisma poligonale riflettente posto in rotazione.

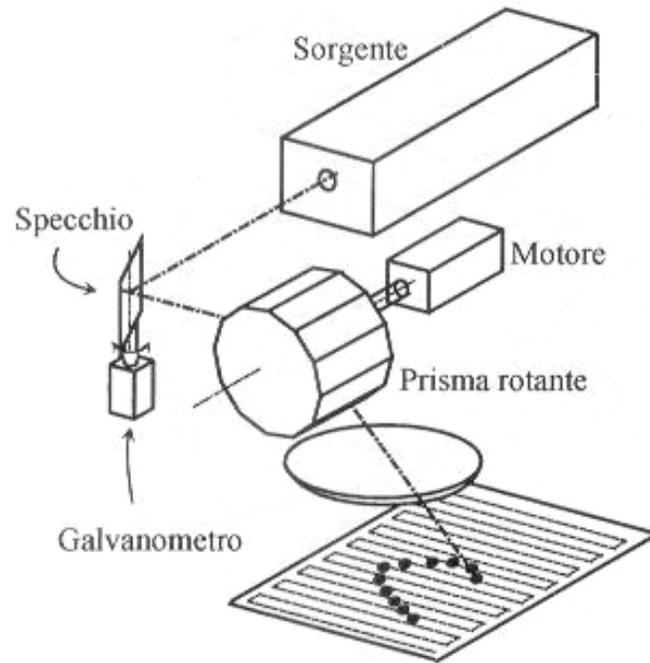
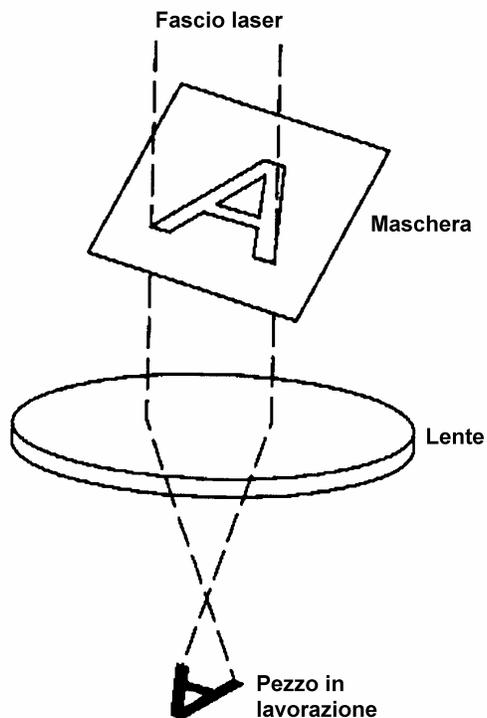


Figura II.3 – Testa di marcatura per scansione della superficie.

In questo modo la rotazione del prisma consente di fare scandire al fascio le linee orizzontali, mentre la rotazione del galvanometro consente di passare da una linea alla successiva, descrivendo quindi la direzione verticale. In questo modo tutta l'area marcabile viene scandita durante la marcatura e la scritta viene ottenuta attivando il fascio negli istanti in cui questo passa sulle aree da marcare. La costruzione del disegno avviene quindi con una sequenza di punti marcati dal fascio, il che pone un limite alla ricchezza dei dettagli riproducibili.

- *Marcatura di area:* in questa modalità di marcatura il fascio laser defocalizzato investe una maschera, rimanendone parzialmente oscurato. La parte trasmessa viene focalizzata da una lente sul pezzo in modo che

tutta la superficie da marcare venga esposta nel medesimo istante al fascio laser, senza che vi sia moto relativo tra fascio e pezzo. La testa per ottenere questa marcatura è riportata in figura II.4 e, mancando di elementi mobili, è la più semplice dal punto di vista costruttivo. Di contro, richiede che il fascio abbia una distribuzione di irradianza uniforme e le sorgenti devono essere in grado di generare un'elevata potenza di picco in modo da avere un tempo di marcatura contenuto. Questa modalità di marcatura viene utilizzata quando la superficie da marcare è di dimensioni limitate e il tempo ciclo richiesto deve essere breve.



*Figura II.4 – Marcatura di area.*

Delle tre modalità sopra elencate quella più frequentemente utilizzata dai sistemi di marcatura laser è la prima, anche perché è la più flessibile e consente un'ottima definizione dei caratteri o del disegno generati.

### **II.3. Meccanismo di marcatura**

La realizzazione di una marcatura può avvenire attraverso meccanismi differenti, ognuno collegato al materiale e alla lunghezza d'onda del fascio laser. La chiave per scegliere il metodo più appropriato è di accoppiare il materiale con il laser avente la giusta lunghezza d'onda. I meccanismi utilizzati sono sostanzialmente cinque:

- *Foaming e microcracking*: Il *foaming* riguarda la formazione di bolle di gas sulle zone superficiali a basse temperature. Questo metodo è comunemente usato per la marcatura di polimeri. Le bolle sono circondate da materiale fuso, che fornisce un sufficiente contrasto alla marcatura. Se la temperatura viene alzata leggermente, le bolle si rompono sulla superficie, migliorando il contrasto. L'intensità del laser è bassa, visto che non è richiesta asportazione di materiale. Solo la microstruttura della superficie è cambiata.

Il *microcracking* è il risultato della fusione della zona più superficiale del materiale (circa 20  $\mu\text{m}$ ). Questo risolidificato contiene diverse microfratture che riflettono la luce e con il sottostrato forniscono l'effetto di contrasto desiderato. Il vetro è marcato con questo metodo,

usando una sorgente laser CO<sub>2</sub>. Se sono richiesti specifici dettagli può essere usato un laser ad eccimeri con una lunghezza d'onda più piccola.

- *Scolorimento*: lo scolorimento avviene quando l'energia del fascio laser assorbito riscalda il materiale a temperature che provocano una degradazione termica del materiale. Nei polimeri e nel legno, il meccanismo è di bruciare il materiale, e normalmente il risultato è una marcatura nera. Questo metodo è usato quando le superfici devono restare piane.
- *Bleaching*: pigmenti colorati in polimeri speciali possono cambiare colore attraverso una reazione fotochimica. La radiazione di una lunghezza d'onda sufficientemente piccola, come quella di un laser ad eccimeri, consente di separare le molecole causando così un cambio di colore e, quindi, una marcatura permanente.
- *Engraving*: l'*engraving* riguarda localizzate fusioni o vaporizzazioni sulla superficie, solitamente con una profondità di circa 0,1 mm. Il contrasto è provocato dalle differenti proprietà ottiche delle zone risolidificate/vaporizzate e il sottostrato. Il meccanismo è comunemente usato per marcare termoplastiche con laser CO<sub>2</sub>. La marcatura per *engraving* è consigliabile quando è richiesta una marcatura resistente alle abrasioni.
- *Asportazione*: marcare attraverso l'asportazione delle zone superficiali significa portare il materiale oltre la temperatura di vaporizzazione [8].

#### II.4. Sorgenti laser per la marcatura

Le sorgenti utilizzate nella marcatura sono sia quelle CO<sub>2</sub> sigillate, sia quelle Nd:YAG. La qualità del fascio non è generalmente un punto critico nella marcatura, salvo quando si desidera effettuare marcature di piccole dimensioni e di estrema precisione. I diodi laser, a causa dello spot di grandi dimensioni, vengono raramente utilizzati per la marcatura.

Le sorgenti CO<sub>2</sub> normalmente utilizzate hanno potenze che tipicamente variano tra 1 W e 200 W. Il meccanismo con cui si effettua la marcatura è prevalentemente per trasformazione della microstruttura superficiale o per formazione di composti chimici.

Le sorgenti Nd:YAG che vengono utilizzate nella marcatura sono di potenza mediamente compresa tra 10 W e 50 W e il funzionamento pulsato viene ottenuto prevalentemente mediante un dispositivo Q-switch. Grazie ad impulsi così brevi è possibile ottenere una potenza di picco sufficientemente elevata per vaporizzare il materiale: sono quindi le sorgenti adatte per ottenere la marcatura attraverso il meccanismo di incisione superficiale (*engraving*). Le sorgenti Nd:YAG possono essere utilizzate nel caso in cui sia necessario una marcatura estremamente precisa e di piccole dimensioni. Infatti, il limite inferiore di dimensione di un carattere dipende dalla dimensione dello spot il cui diametro può essere ricavato tramite la relazione:

$$d_0 = \frac{4 \lambda f}{\pi d_f} M^2 \quad (\text{II.1})$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda,  $f$  è la lunghezza focale,  $d_f$  è il diametro in uscita dalla sorgente ed  $M^2$  è il fattore di qualità del fascio. Per ridurre il valore di  $d_0$

nelle sorgenti Nd:YAG si possono utilizzare dei dispositivi particolari che consentono di raddoppiare o triplicare la frequenza della radiazione emessa (armonica fondamentale  $\lambda_1=1.064\mu\text{m}$  – vicino IR -, seconda armonica  $\lambda_2=0.532\mu\text{m}$  – visibile verde -, terza armonica  $\lambda_3=0.355\mu\text{m}$  – UV). La radiazione laser ottenuta dalla seconda o dalla terza armonica, oltre a consentire una migliore focalizzazione del fascio, spesso è anche assorbita meglio dai materiali metallici da marcare. Ovviamente lo scotto da pagare per ottenere che una sorgente generi un fascio con armoniche superiori alla fondamentale è una riduzione significativa della potenza emessa.

In tabella II.1 è riportata una suddivisione di massima tra i materiali che possono essere marcati con le due tipologie di sorgenti laser. La scelta della sorgente deriva principalmente dal coefficiente di assorbimento alla radiazione laser del materiale da marcare.

*Tabella II.1 – Materiali comunemente marcati con il laser e relative sorgenti.*

CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> o Nd:YAG	Nd:YAG		
		$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
Vetro	Metalli	Materiali metallici	Diamanti	Materiali polimerici
Materiali organici (pelle, tessuto, cuoio, legno)	Metalli anodizzati	Nitruri	Oro	
Materiali polimerici (acrilici,...)	Materiali polimerici		Vetri	
	Materiali ceramici		Cristalli	

## **II.5. I materiali marcati con il laser**

### **II.5.1. Materiali metallici**

I materiali metallici possono essere marcati con il laser sia mediante incisione, sia mediante trasformazione di fase e formazione di composti chimici. In particolare, gli acciai al carbonio possono essere marcati facilmente con tutti e tre i meccanismi. Occorre fare attenzione a marcare per incisione componenti che in esercizio vengono sottoposti a sollecitazioni cicliche, anche se è sempre preferibile la marcatura laser a quella tradizionale.

Applicazioni tipiche in questo ambito sono la marcatura di utensili per asportazione di truciolo su cui vengono riportate la sigla e le caratteristiche dell'utensile, di componenti meccanici in acciaio o ghisa su cui vengono marcati codici a barre o sigle o numeri di serie, di strumenti di misura in acciaio (figura II.6).

L'acciaio inossidabile viene generalmente marcato mediante laser con impulsi di elevata irradianza. Si ottiene così un'alterazione superficiale a seguito della formazione di ossidi che avviene ad alta temperatura. Attraverso la crescita controllata degli ossidi (ottenuta tramite un'attenta selezione dei parametri di marcatura), è possibile marcare a colori questo tipo di acciaio. Questo particolare meccanismo di marcatura colorata è possibile anche su altri materiali metallici che formano ossidi come, ad esempio, il titanio.

L'alluminio, a causa del basso coefficiente di assorbimento, richiede elevatissime irradianze per essere marcato con il laser e, in generale, non viene marcato per

incisione. L'alluminio anodizzato, al contrario, è particolarmente adatto ad essere marcato con il laser mediante il meccanismo di incisione [9] [10].



*Figura II.5 – Marcatura di materiali metallici.*

### **II.5.2. Materiali polimerici**

La maggior parte dei materiali polimerici ben si prestano a essere marcati mediante laser, prevalentemente con i meccanismi di degradazione chimica e di incisione. E' però da rilevare che gli oggetti realizzati con materiali polimerici sono in realtà composti da diversi elementi, questo fa sì che la risposta del materiale all'esposizione al fascio sia poco prevedibile. Sono disponibili in commercio degli additivi che dovrebbero consentire di migliorare la "laserabilità" della plastica.

Uno dei settori di largo impiego della marcatura di materiali polimerici è il settore elettronico-elettrotecnico, con la marcatura di sigle, schemi elettrici di collegamento, loghi e marchi di fabbrica su componenti come circuiti integrati, interruttori, relais, ecc. [11].

Un'applicazione di marcatura laser molto diffusa è quella che viene utilizzata per produrre interruttori o pannelli retroilluminati (figura II.6). L'interruttore o il pannello viene prodotto in un polimero trasparente che è poi rivestito nel solo lato esterno da uno strato non trasparente il quale, mediante marcatura laser, viene rimosso, rendendo le zone esposte al laser ben visibili una volta illuminato dalla parte posteriore (tastiere per cellulari, cruscotti, etc.).



*Figura II.6 – Marcatura di materiali polimerici.*

### **II.5.3. Materiali organici**

I materiali organici (legno, cuoio, pelle e tessuti) possono essere marcati facilmente mediante laser e il meccanismo prevalente è la degradazione chimica [12]. Le applicazioni tipiche sono nel settore della moda, con la marcatura di griffe aziendali o loghi anti-contraffazione su pelle o tessuto (figura II.7).



Figura II.7 – Marcatura di materiali organici.

#### **II.5.4. Materiali amorfi**

Questi materiali si prestano bene alla marcatura. Il vetro, in particolare, può essere marcato superficialmente, sebbene occorra fare attenzione per evitare un eccessivo shock termico che può portare a rottura il materiale. Il settore più interessato dalla marcatura laser è quello dell'oggettistica, con funzionalità prevalentemente di carattere estetico.

Su materiali trasparenti è possibile effettuare una marcatura interna, denominata *marcatura intravolume* (figura II.8). Questa tecnica di marcatura è eseguita focalizzando il fascio laser all'interno del materiale. [13][14]



*Figura II.8 – Marcatura intravolume di materiali amorfi.*

## **II.6. Vantaggi della marcatura laser**

Sono molte le tecnologie con cui è possibile trasferire scritte o disegni su un componente (tampografia, incisione meccanica, stampanti a getto d'inchiostro, litografia, ecc.), con l'adozione della marcatura laser si sono avuti i seguenti vantaggi [6]:

- *Indelebilità della marcatura:* la zona trattata con il laser non è cancellabile se non attraverso la rimozione dello strato di materiale interessato dalla marcatura.
- *Assenza di contatto fisico:* grazie all'assenza di contatto fisico tra utensile e pezzo è possibile marcare pareti sottili e oggetti delicati senza rischio di rottura.
- *Elevata velocità:* le velocità di spostamento del fascio sul pezzo sono dell'ordine di alcuni metri al secondo.

- *Elevata precisione:* la precisione di marcatura è elevata grazie alle dimensioni dello spot che possono essere dell'ordine di qualche decina di micron.
- *Elevata ripetibilità:* il processo di marcatura laser non è particolarmente sensibile a variazioni delle condizioni di marcatura, né all'usura degli utensili.
- *Flessibilità del sistema di marcatura:* è molto utile nel caso di piccoli lotti o anche semplicemente per poter marcare il numero di serie progressivo su un componente.

I punti critici della marcatura laser, invece, sono:

- *Assenza di gamma cromatica:* il laser non è in grado di marcare colori (solo su materiali specifici è possibile ottenere alcuni colori), come è invece possibile fare con altre tecniche.
- *Apporto termico:* è estremamente contenuto, però il processo di marcatura è comunque di tipo termico e, di conseguenza, occorre che il materiale non venga alterato nelle sue caratteristiche.
- *Incisione e rottura per fatica:* in alcuni casi di marcatura per incisione di componenti soggetti a fatica sono stati riscontrati problemi di rottura per fatica.

## **II.7. Sviluppi futuri**

Il processo di marcatura laser è in rapida evoluzione in particolare grazie alla sua combinazione di flessibilità, ripetibilità e velocità. Tra le varie sorgenti laser da marcatura, quella Nd:YAG sta riscuotendo sempre maggiore interesse grazie alle elevate potenze di picco ed alla realizzazione di sistemi laser di piccole dimensioni, in alcuni casi anche portatili. Una nuova applicazione del laser da marcatura è la possibilità di marcare codici a barre direttamente sul vetro di contenitori farmaceutici, in modo da essere indelebile anche nel caso di sterilizzazione del contenitore. Recentemente ha riscosso anche notevole interesse per migliorare la qualità delle immagini marcate, aumentando così in modo percepibile il valore del prodotto. La nuova tecnica di marcatura laser di polimeri termoplastici, tramite ablazione termica, ha permesso di migliorare il comportamento di polimeri in specifiche applicazioni. I sistemi laser portatili di nuova concezione hanno reso possibile la loro utilizzazione per la rimozione di elementi inquinanti ed altre marcature superficiali su edifici o statue. Un'altra recente applicazione del laser è la marcatura di schermi retro-illuminati o di tastiere per computer asportando solo lo strato di vernice superficiale. Nel campo delle microlavorazioni si trovano sempre nuove applicazioni grazie allo spot di ridotte dimensioni ed alla alta ripetibilità. Si può concludere che le applicazioni del laser da marcatura sono in rapida evoluzione ed abbracciano sempre di più una maggiore varietà di campi.

# **Capitolo III**

## **Materiali ed attrezzature sperimentali**

### III.1. Descrizione del sistema laser

L'apparecchiatura utilizzata per la marcatura è il sistema laser della *LASIT* modello *FLY 20*.

Tale sistema è costituito da un laser al Nd:YAG pompato in continuo e funzionante in regime di impulsi giganti (Q-switch). In particolare le caratteristiche della sorgente laser sono:

- lunghezza d'onda  $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$
- max potenza media = 20 W
- pompaggio energetico = diodi laser
- funzionamento = regime di impulsi giganti
- durata del singolo impulso = 150 ns
- frequenza di ripetizione degli impulsi = max 50.000 Hz
- diametro dello spot focale  $\approx 90 \mu\text{m}$
- fattore di qualità del fascio  $M^2 > 1$

I componenti dell'apparecchiatura laser sono sostanzialmente:

1. testa di marcatura laser;
2. tavola di lavorazione;
3. sistema di raffreddamento (*Chiller*);
4. software di marcatura.

Nella *testa di marcatura laser* (figura III.1), di tipo con lente a campo piano, si trovano la cavità risonante, il beam expander, i due specchi per la movimentazione del fascio laser e la lente di focalizzazione.

All'uscita della cavità risonante il fascio laser, avente un diametro di 2,8 mm, passa attraverso il *beam expander*. Questo componente consente di espandere il fascio laser, portandolo ad un diametro di 12 mm, e di diminuirne la divergenza. Dopo il beam expander si trovano i due specchi, collegati a due galvanometri, che consentono di movimentare il fascio. Prima di uscire dalla testa laser il fascio passa attraverso la lente di focalizzazione che consente di focalizzare il fascio, con uno spot focale di 26  $\mu\text{m}$ . La variazione del diametro subita dal fascio laser è riassunta nello schema a blocchi riportato in figura III.2.

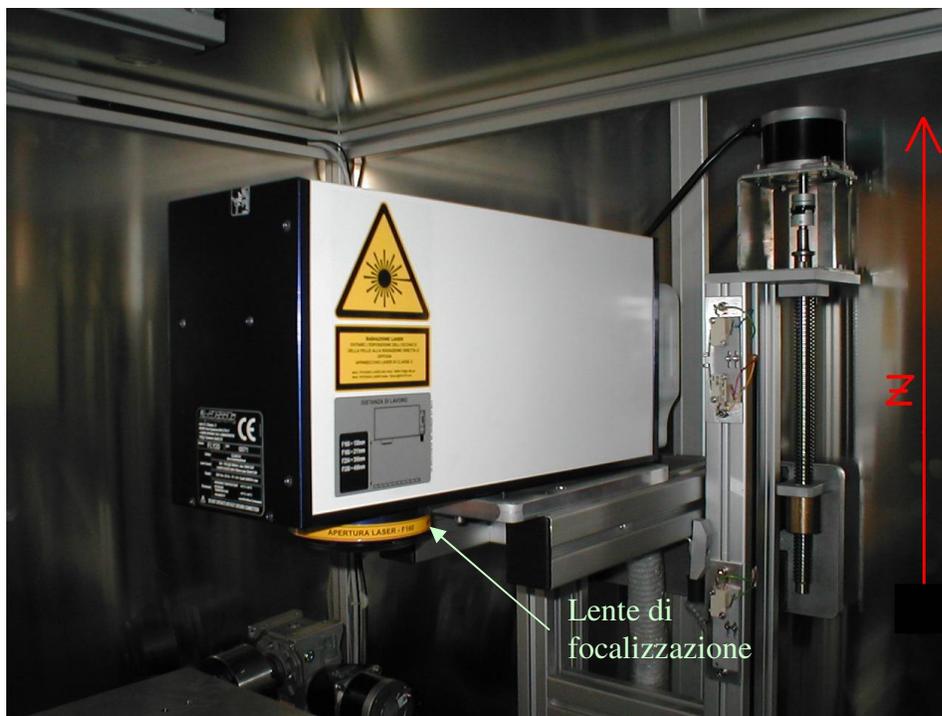


Figura III.1 – Testa di marcatura laser.

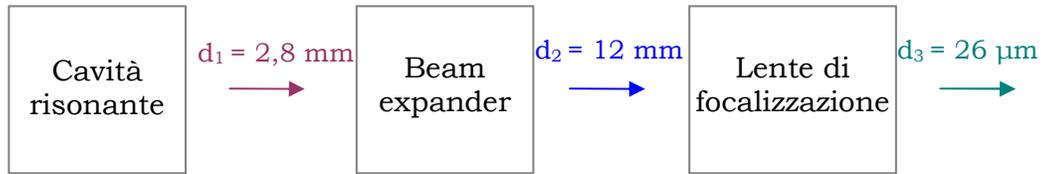


Figura III.2 – Differenti diametri del fascio laser all'interno della testa di marcatura.

La cavit  resonante   posizionata al centro della struttura meccanica della testa laser. Contiene i diodi laser, la barretta Nd:YAG che forniscono l'energia luminosa per il laser, le superfici riflettenti ed il sistema Q-switch. La testa di marcatura laser   quindi composta da:

- A. *Diodi laser* – I diodi sono utilizzati per il pompaggio della barretta di Nd:YAG.
- B. *Barretta Nd:YAG* – La barretta ha un diametro di 4 mm ed   lunga 70 mm. A meno di rottura accidentale o scheggiature delle due superfici di uscita la barretta non   soggetta a decadimento. Eventuali bruciature sulle superfici di uscita riducono l'efficienza della barretta fino ad impedirne la generazione del fascio laser. Una possibile causa di bruciature sul cristallo   la polvere nell'aria che pu  depositarsi sulla superficie quando i tubi di protezione del percorso ottico sono rimossi. Un'altra possibile causa sono le macchie prodotte dall'acqua di raffreddamento quando questa filtra attraverso l'O-ring in teflon che sigilla ciascuna estremit  del cristallo. Non   richiesta alcuna manutenzione per la barretta.

C. *Superfici riflettenti* – La barretta ND:YAG è montata all'interno della cavità nei punti di fuoco dell'ellisse formata da due superfici dorate e lucidate ad alto potere riflettente.

Gli specchi riflettono il fascio laser indietro ed avanti attraverso il cristallo Nd:YAG, ottenendo così l'effetto laser. Lo specchio posteriore riflette più del 99,8% della luce ricevuta. Lo specchio anteriore (o specchio d'uscita) è parzialmente riflettente (90%) così che quando si raggiunge un certo livello di pompaggio ottico, il fascio laser attraversa lo specchio anteriore rendendosi disponibile per la marcatura. Entrambi gli specchi sono regolabili sia in orizzontale che in verticale rendendo possibile l'allineamento delle lenti laser.

D. *Sistema Q-switch* – La luce viene modulata da un *Q-switch acustico-ottico* che è inserito nella cavità ottica fra la testa del laser e lo specchio posteriore. Il Q-switch è controllato dal *RF-DRIVER*. Quando l'RF-DRIVER emette radiofrequenza il cristallo del Q-switch devia il fascio di luce laser impedendone la generazione. Viceversa quando non è applicata RF la luce laser viene generata. L'RF-DRIVER emette un treno di impulsi a radiofrequenza che alternativamente apre e chiude la cavità laser. Il Q-switch ha un sistema interno di raffreddamento per dissipare il calore prodotto. È raffreddato con acqua deionizzata e ha un interruttore termico che spegne l'RF-DRIVER se la temperatura all'interno del Q-switch aumenta oltre i limiti di sicurezza. Il generatore di radiofrequenza (RF-Driver) è costituito da un modulatore e da un amplificatore lineare. Il

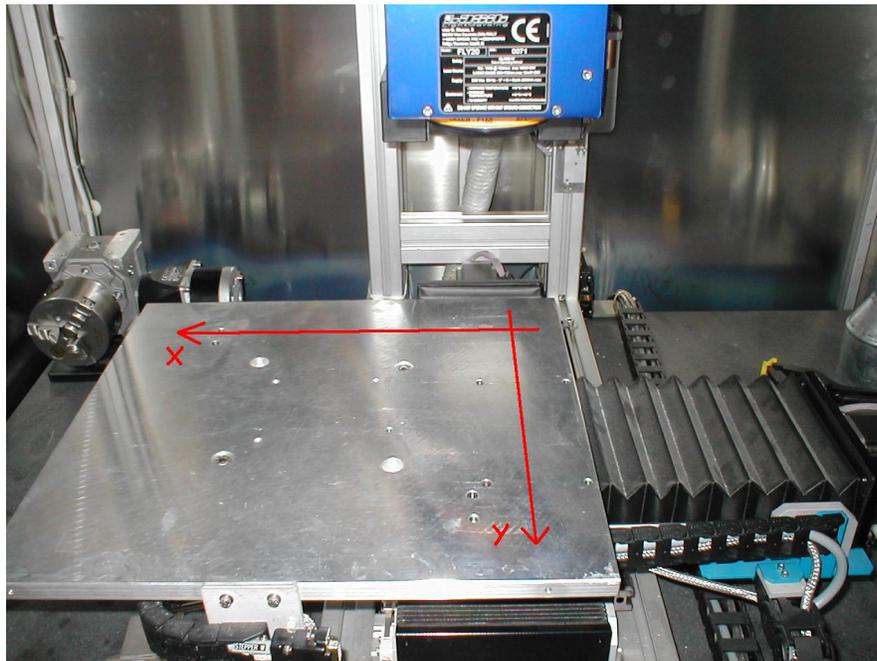
modulatore accetta in ingresso il segnale di Q-switch e genera una frequenza di 27 MHz di 3W di potenza. Questo segnale viene amplificato fino a 50 W dallo stadio lineare a radiofrequenza. L'ingresso del modulatore è collegato al generatore di impulsi Q-switch del DSP. Durante la marcatura un treno di impulsi a livello TTL (0-5 V) della frequenza impostata dall'operatore modula la radiofrequenza generata dal modulatore secondo questo schema:

1. l'ingresso TTL va alto (l'azione è sul fronte), la radiofrequenza viene spenta per circa 15  $\mu$ s
2. l'ingresso TTL è basso, la radiofrequenza viene generata regolarmente.

In tal modo il laser emette un impulso non appena viene a mancare la radiofrequenza. Il generatore è alimentato a 220 V. Un alimentatore switching interno provvede a fornire 12 V stabilizzati sia per il modulatore che per il lineare. Il segnale impulsivo proveniente dal DSP per il Q-switch prima di entrare nel modulatore passa attraverso un circuito generatore di impulsi monostabile ripristinabile e attraverso due interblocchi di alta temperatura disposti in serie. Il primo interblocco è collegato all'unità di raffreddamento. Il secondo interblocco è collegato al sensore termico nel Q-switch. Se l'unità di raffreddamento va in blocco oppure se il Q-switch per un difetto di raffreddamento raggiunge la temperatura limite si spegne il modulatore e così non viene generata radiofrequenza. Spegnendo il modulatore a radiofrequenza si elimina una causa del riscaldamento. I due

interblocchi costituiscono una doppia sicurezza e si distinguono oltre che per l'etichettatura per la differente forma dei connettori, essendo un QIK mate a 3 vie quello proveniente dall'unità di raffreddamento.

Il fascio laser viene focalizzato sulla *tavola di lavorazione* (figura III.3), dove vengono appoggiati i provini da marcare. La tavola è movimentata lungo l'asse X ed Y attraverso il software di marcatura.



*Figura III.3 – Tavola di lavorazione.*

L'unità *Chiller* (figura III.4) è costituita dal circuito frigorifero e dal circuito dell'acqua demineralizzata (fluido che deve essere raffreddato).



*Figura III.4 – Chiller.*

Lo scambio termico avviene mediante uno scambiatore.

Il circuito dell'acqua demineralizzata è composto da:

- pompa (PW)
- filtro a cartuccia (G)
- flussometro (A)
- uno dei circuiti interni allo scambiatore (H)
- termostato industriale (TT1)
- cartuccia deionizzante (D)
- serbatoio (E).

Il circuito frigorifero è composto da:

- compressore (CO)
- scambiatore di calore (BC)
- dispositivo di espansione (VT)

- uno dei circuiti interni allo scambiatore (H)
- termostato frigo (TS)
- pressostato di alta (PA)
- termostato antigelo (TA).

Nel circuito l'acqua demineralizzata viene messa in circolazione dalla pompa (PW) che muove l'acqua in direzione del filtro (G). Immediatamente dopo il filtro si trova la cavità laser. L'acqua entra dal lato della barretta Nd:YAG, la percorre, incanalata dal tubo di protezione della barretta stessa, e quindi, la raffredda fuoriuscendo dalla cavità. In parallelo agli attacchi dell'acqua della cavità laser, attraverso due tubicini, viene prelevata una piccola quantità d'acqua che viene impiegata per il raffreddamento del Q-switch. L'acqua, uscendo dalla cavità laser, fluisce attraverso il flussometro (A) proporzionale a turbina, la cui portata è regolata dal discriminatore di frequenza opportunamente regolato, e quindi nello scambiatore (H). Dallo scambiatore l'acqua ritorna al serbatoio (E), passando in parte, attraverso il deionizzatore (D).

Il calore in eccesso dell'acqua viene assorbito dal fluido frigorifero nella fase di espansione nello scambiatore (H). A sua volta il fluido frigorifero cede il suo calore con lo scambio termico che avviene con l'aria, che viene fatta passare attraverso lo scambiatore di calore (BC) tramite il ventilatore (VC). La sonda (TS) (termostato frigo) è il trasduttore per EWPC dove è possibile impostare il valore a cui deve essere mantenuta l'acqua di raffreddamento.

La lettura del corretto funzionamento del *Chiller* da parte dell'unità di controllo del laser avviene tramite la serie di due contatti della bobina K1, K2 in modo che sono sotto osservazione i seguenti parametri:

- Intervento di una delle termiche a protezione contro i sovraccarichi del motore del compressore (CO) o della pompa (PW) . Questo viene segnalato dal *Chiller* quando si accende la spia di blocco generale. Per ripristinare il funzionamento basta aprire il quadro elettrico e ripristinare la termica che è intervenuta.
- Mancanza di flusso di acqua o comunque insufficiente per il raffreddamento. Questo può essere causato da una perdita dell'acqua demineralizzata o dalla mancanza di acqua nel serbatoio oppure dall'ostruzione accidentale dei tubi del circuito di raffreddamento.
- La pompa di circolazione (PW) non è collegata oppure è bloccata.
- E' intervenuto un fusibile di protezione dell'alimentazione di bassa tensione del circuito di controllo del *Chiller*.
- Mancanza dell'alimentazione del *Chiller*.
- Mancanza di una fase o inversione del senso di rotazione.

Il perfetto funzionamento dell'impianto del *Chiller*, e non solo, è controllabile anche direttamente dalla postazione di lavoro tramite il software *FlashService*, la cui schermata è mostrata in figura III.5.

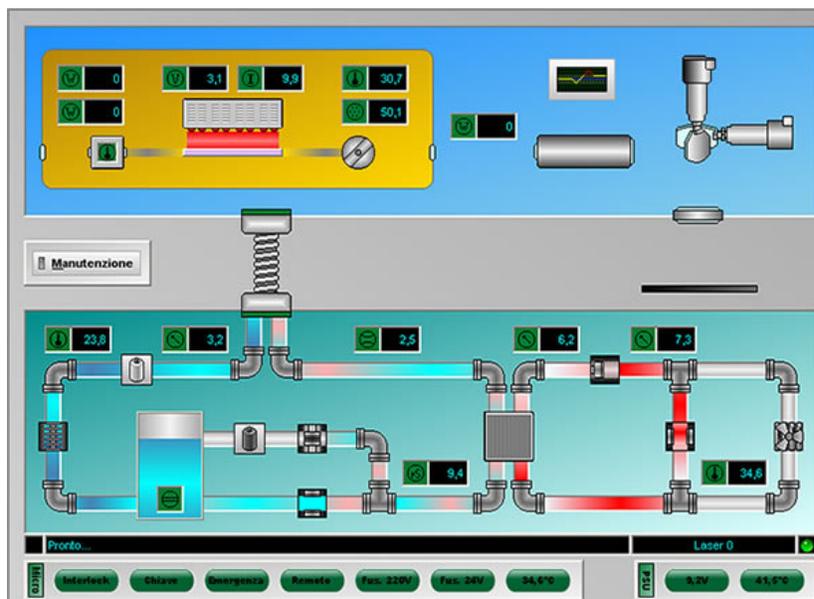


Figura III.5 – Finestra FlashService.

Il software di marcatura utilizzato per disegnare i particolari da marcare è il LasitCad 2000 che è una versione personalizzata di AutoCad Lt. In figura III.6 è mostrata la schermata del programma.

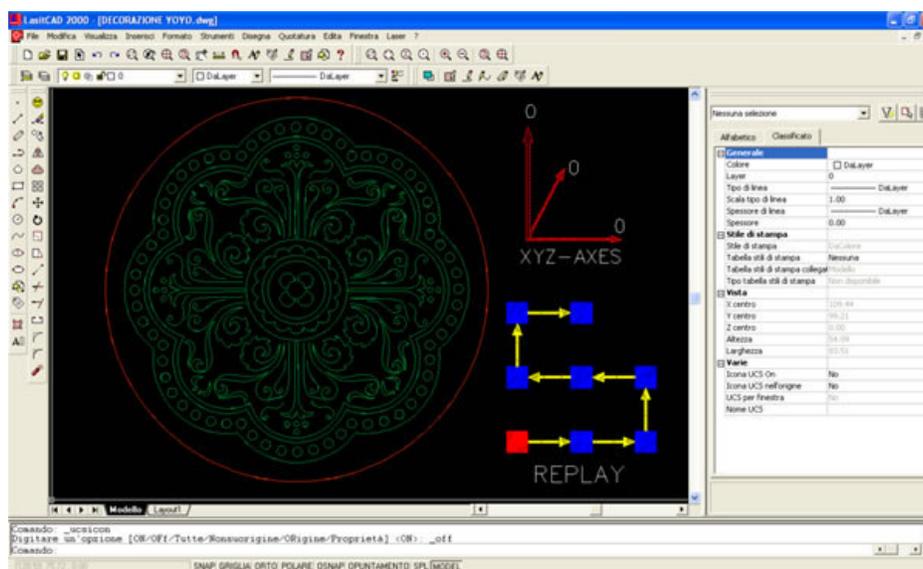


Figura III.6 – Finestra LasitCad 2000.

Il sistema di marcatura è governato dal software Flash, la cui finestra principale è intitolata Flash + [ Nome della lavorazione], il suo aspetto è di seguito mostrato con la spiegazione dei singoli comandi e dei percorsi in essa contenuti.

Premendo i pulsanti di figura III.7 si possono caricare i file direttamente da AutoCad (o nel nostro caso LasitCad), caricare i file da una cartella, avviare la marcatura, visualizzare il Template, impostare i Layer.

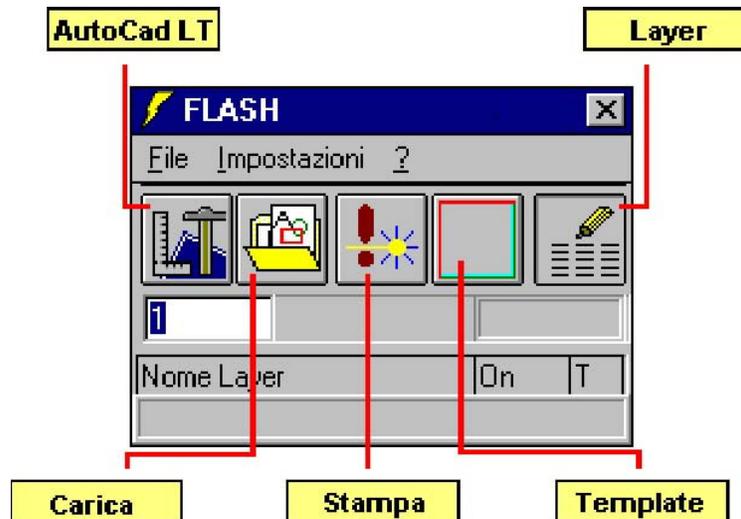


Figura III.7 – Finestra Flash.

Selezionando la voce File dal menù di figura III.8 si può caricare un file, avviare la stampa, visualizzare il Template, attivare i Layer, attivare l'anteprima dell'immagine da marcare, impostare le preferenze, aprire gli ultimi files utilizzati ed uscire dal programma.

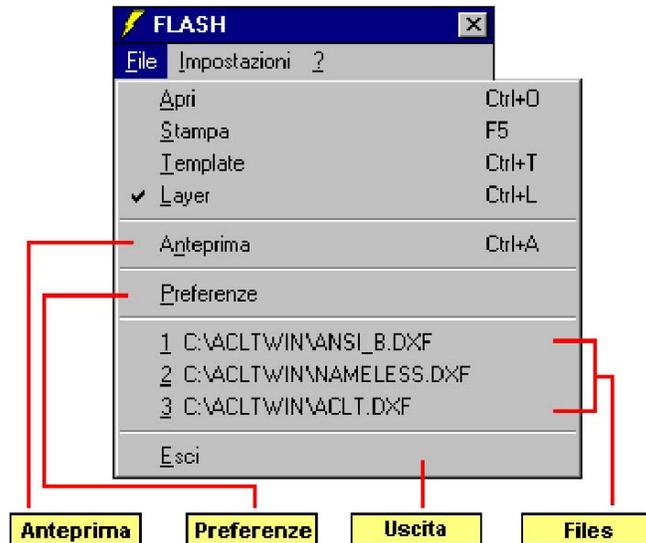


Figura III.8 – Menù a tendina della voce File.

Selezionando la voce Impostazioni dal menù di figura III.9 si può selezionare il materiale da marcare (ed i relativi parametri del laser), impostare l'override, azzerare il contapezzi, impostare il numero di serie, configurare gli assi, configurare il laser.

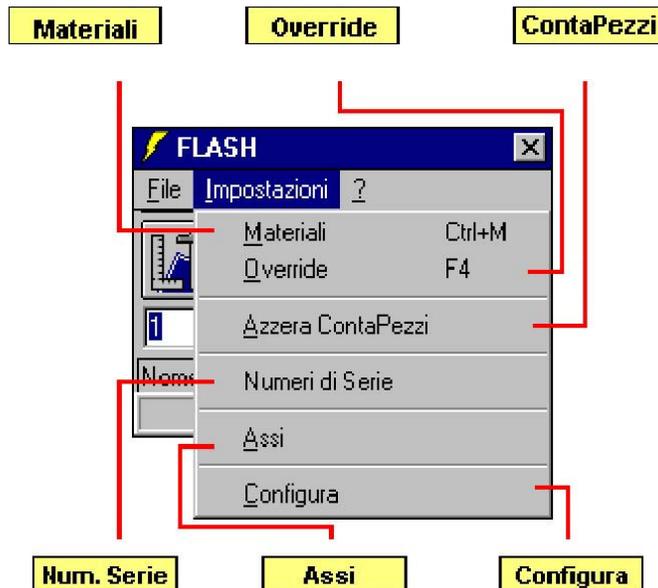


Figura III.9 – Menù a tendina della voce Impostazioni.

Tra i vari comandi spiegati precedentemente è di fondamentale importanza il sottomenù di figura III.9 *materiali*. Questa finestra ci consente di selezionare uno dei materiali già presenti in memoria o creare un nuovo file personalizzando i vari parametri di marcatura del laser (figura III.10).



Figura III.10 – Finestra per impostare i parametri di marcatura.

I parametri impostabili sono il **numero di ripetizioni** nella medesima istanza di esecuzione, la **velocità** di esecuzione della marcatura, con valori fino a 5.000 mm/s, la **corrente** di alimentazione dei diodi, che può raggiungere valori fino a 55 Ampere, e la **frequenza** di ripetizione degli impulsi, con valori fino a 50.000 Hz. Nelle figure III.11 e III.12 è possibile vedere, rispettivamente, l'andamento della potenza media e della potenza di picco del nostro laser in funzione dell'intensità di corrente di alimentazione dei diodi  $I$  [A] e della frequenza di ripetizione degli impulsi  $f$  [Hz]; tali curve sono state ricavate sperimentalmente in un laboratorio specializzato.

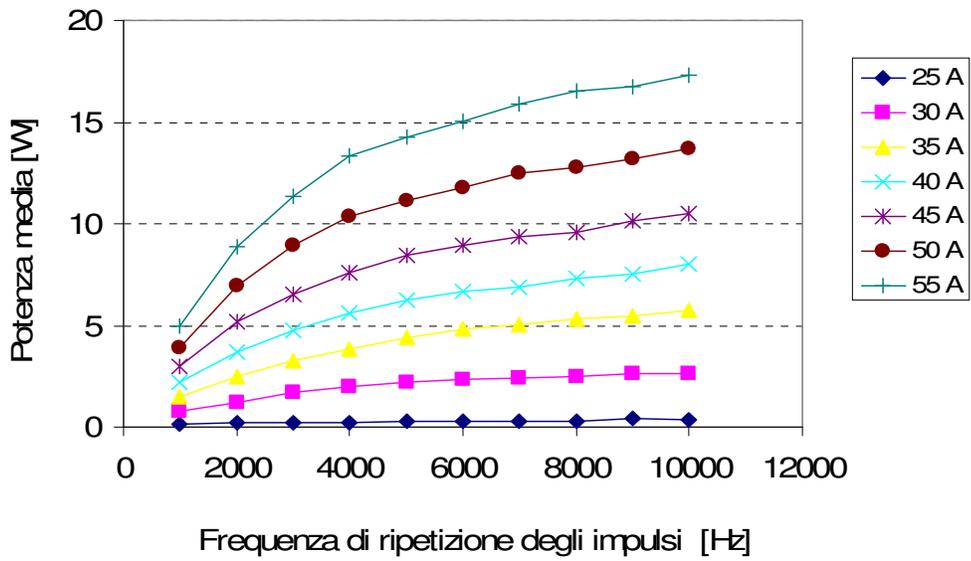


Figura III.11 – Valori di potenza media in funzione dell'intensità di corrente  $I$  [A] e della frequenza di ripetizione degli impulsi  $f$  [Hz].

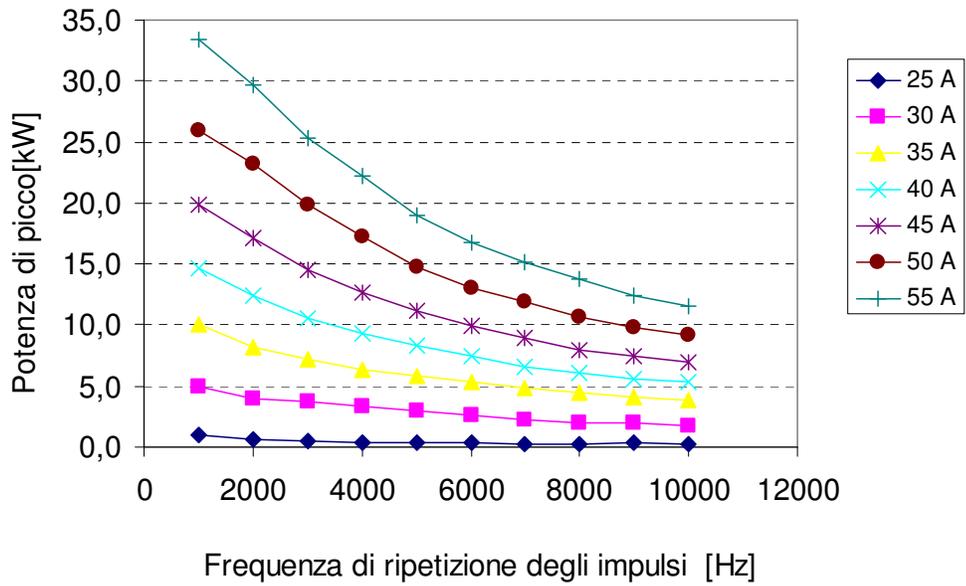


Figura III.12 – Valori di potenza di picco in funzione dell'intensità di corrente  $I$  [A] e della frequenza di ripetizione degli impulsi  $f$  [Hz].

### III.2. Descrizione del materiale e specifiche

I provini utilizzati nelle indagini sperimentali del presente lavoro di tesi sono in Acciaio AISI 430 e AISI 304. L'AISI 304 è un acciaio inox austenitico e le sue caratteristiche sono evidenziate nella tabella III.1. I provini sono stati tagliati da fogli ottenuti per laminazione e hanno forma quadrata con dimensioni di 50 mm × 50 mm e spessore di 2 mm. La superficie del materiale è opaca.

L'AISI 430 è un acciaio inox ferritico e le sue principali caratteristiche sono riportate in tabella III.2. I provini sono stati tagliati da fogli, ottenuti per laminazione, aventi uno spessore di 0,4 mm e hanno forma quadrata con dimensioni di 50 mm × 50 mm. La superficie del materiale risulta lucida.

Tab. III.1 – Caratteristiche degli acciai inossidabili austenitici

Sigla AISI	Elementi in lega () [massimo ove non altrimenti indicato]									R MPa	Rp0,2 MPa	A	HRB
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mi	Mo	Altri				
201	0,15	5,5-7,5	1,0	0,060	0,030	16-18	3,5-5,5	-	N = 0,25	758	379	55	90
202	0,15	7,5-10	1,0	0,060	0,030	17-19	4-6	-	N = 0,25	689	379	55	90
205	0,25	14-15,5	1,0	0,060	0,030	16,5-18	1-1,75	1-1,75	N = 0,40	862	482	58	98
301	0,15	2,0	1,0	0,045	0,030	16-18	6-8	-	-	758	276	60	85
302	0,15	2,0	1,0	0,045	0,030	17-19	8-10	-	-	620	276	50	85
3028	0,15	2,0	2-3	0,045	0,030	17-19	8-10	-	-	655	276	55	85
303	0,15	2,0	1,0	0,20	0,15*	17-19	8-10	>0,60	-	620	241	50	76
3038e	0,15	2,0	1,0	0,20	0,060	17-19	8-10	-	>8e=0,15	620	241. 50	76	
<b>304</b>	<b>0,08</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,045</b>	<b>0,030</b>	<b>18-20</b>	<b>8-10,5</b>	-	-	<b>586</b>	<b>241</b>	<b>55</b>	<b>80</b>
304L	0,03	2,0	1,0	0,045	0,030	18-20	8-12	-	-	517	193	55	79
304N	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	18-20	8-10,5	-	N = 0,1-0,16	620	331	50	85
305	0,12	2,0	1,0	0,045	0,030	17-19	10,5-13	-	-	586	262	50	80
308	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	19-21	10-12	-	-	586	241	50	80
309	0,20	2,0	1,0	0,045	0,030	22-24	12-15	-	-	620	310	45	85
3098	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	22-24	12-15	-	-	620	310	45	85
310	0,25	2,0	1,5	0,045	0,030	24-26	19-22	-	-	655	310	45	85
3108	0,08	2,0	1,5	0,045	0,030	24-26	19-22	-	-	655	310	45	85
314	0,25	2,0	1,5-3	0,045	0,030	23-26	19-22	-	-	690	345	40	85

316	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	16-18	10-14	2-3	-	620	276	50	79
316F	0,08	2,0	1,0	0,20	0,10*	16-18	10-14	1,75-2,5	-	586	241	60	85
316L	0,03	2,0	1,0	0,045	0,030	106-18	10-14	2-3	-	517	220	50	79
316N	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	16-18	10-14	2-3	N = 0,1-0,16	620	331	48	85
317	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	18-20	11-15	3-4	-	620	276	45	85
317L	0,03	2,0	1,0	0,045	0,030	18-20	11-15	3-4	-	586	241	55	85
321	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	17-19	9-12	-	T > 5xC	620	241	45	80
330	0,08	2,0	0,75-1,5	0,040	0,030	17-20	34-37-	-	-	586	310	40	80
347	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	17-19	9-13	-	Nb+ Ta > 10xC	655	276	45	85
348	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	17-19	9-13	Co = 0,2 Ta = 0,1	Nb+ Ta > 10xC	655	276	45	85
384	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	15-17	-	-	-	517	241	55	70

R, Rp<sub>0,2</sub>, A, H: valori dopo trattamento di solubilizzazione.

\* Acciaio risolforato

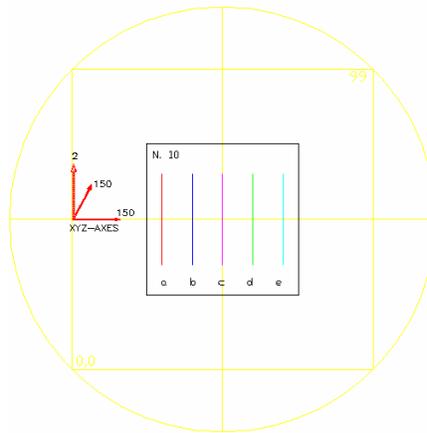
Tab. III.2 – Caratteristiche degli acciai inossidabili ferritici

Sigla AISI	Elementi in lega () [massimo ove non altrimenti indicato]								R MPa	Rp <sub>0,2</sub> MPa	A	HRB	Ricottura	
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ma	Altri					°C	h
405	0,08	1,0	1,0	0,040	0,030	11,5-14,5	-	Al = 0,1-0,3	-	-	-	-	-	-
409	0,08	1,0	1,0	0,045	0,045	10,5-11,7	-	Ti > 6 x C; 0,75	469	276	25	75	-	-
429	0,12	1,0	1,0	0,040	0,030	14-16	-	-	486	293	30	76	-	-
<b>430</b>	<b>0,12</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,040</b>	<b>0,030</b>	<b>16-18</b>	-	-	<b>517</b>	<b>310</b>	<b>30</b>	<b>82</b>	<b>710-790</b>	<b>1-2</b>
43°F	0,12	1,25	1,0	0,060	>0,15	16-18	(0,6)	-	551	379	25	86	710-790	1-2
430FSe	0,12	1,25	1,0	0,060	0,060	16-18	-	Se > 0,15	551	379	25	86	-	-
434	0,12	1,0	1,0	0,040	0,030	16-18	0,75-1,25	-	531	365	23	83	-	-
436	0,12	1,0	1,0	0,040	0,030	16-18	0,75-1,25	Nb+ Ta > 5xC; 0,7	531	365	23	83	-	-
442	0,20	1,0	1,0	0,040	0,030	18-23	-	-	551	345	20	90	760-830	1-2
446	0,20	1,5	1,0	0,040	0,030	23-27	-	N = 0,25	551	345	25	86	760-830	1-2

R, Rp<sub>0,2</sub>, A, H: valori dopo trattamento di solubilizzazione

### III.3 Descrizione delle prove

Le prove sono state eseguite marcando sui provini di entrambi i materiali 5 linee parallele lunghe 3 cm, un numero di serie per ogni provino ed una lettera per ogni linea marcata. In figura III.13 è mostrato il disegno in *LasitCad* realizzato per la marcatura dei provini.



*Figura III.13 – Disegno in LasitCad dei provini.*

Sono stati marcati inizialmente 27 provini per un totale di 135 marcature per ogni materiale; i parametri, e le loro varie combinazioni, utilizzati per le prove di marcatura sono evidenziati nella tabella III.3.

La prima marcatura ha come parametri di lavorazione 15A 50mm/s 1.000Hz, la seconda 15A 50 mm/s 2.000Hz, e così via fino all'ultima marcatura avente come parametri 35A 200 mm/s e 50.000 Hz.

Successivamente l'attrezzatura utilizzata è stata riportata nei laboratori del costruttore, dove è stata eseguita una operazione di riallineamento degli specchi della camera di risonanza. Inoltre in questi laboratori, con l'ausilio di attrezzature specifiche, sono state effettuate le misure della potenza media nelle varie condizioni. Con i valori misurati è stato possibile quindi ricavare le curve di potenza delle figure III.11 e III.12.

Tabella III.3 – Parametri di marcatura: primo set di prove

Frequenza (Hz)	Velocità (mm/s)		
	50	100	200
1.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
2.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
3.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
4.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
5.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
6.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
7.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
8.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
9.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
10.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
15.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
20.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
30.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
40.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>
50.000	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>	<i>15,25,35, A</i>

Effettuata l'operazione di riallineamento dell'attrezzatura laser, si sono effettuate ulteriori marcature su entrambi i materiali, i cui parametri e combinazioni sono riportati in tabella III.4

Tabella III.4 – Parametri di marcatura: secondo set di prove

Frequenza (Hz)	Velocità (mm/s)		
	50	100	200
1.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
2.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
3.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
4.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
5.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
6.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
7.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
8.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
9.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
10.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
15.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
20.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
30.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
40.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A
50.000	35,45, 55 A	35,45, 55 A	35,45, 55 A

### III.4 Parametri utili e metodiche utilizzate

Ai fini della valutazione della qualità della marcatura sono stati misurate la profondità, la larghezza della marcatura ed il contrasto[15].

#### III.4.1 Misura delle caratteristiche geometriche

Per misurare la profondità e la larghezza di marcatura è stato utilizzato, per i primi provini, il rugosimetro Surtronic 3+ della Taylor-Hobson; mentre per i provini marcati dopo l'operazione di riallineamento il Talysurf pgi plus 0.8nm sempre

della *Taylor-Hobson*; per le caratteristiche di entrambi i rugosimetri si rimanda ai sottoparagrafi successivi.

Il profilo microgeometrico del provino, nel nostro caso della linea di marcatura, è stato studiato con il programma *Talymap Universal* fornito dalla stessa *Taylor-Hobson*.

Le misurazioni sono state eseguite su entrambi i materiali facendo scorrere il tastatore ortogonalmente rispetto alla linea di marcatura.

La misura di ogni linea marcata è stata eseguita 5 volte, in 5 punti diversi; attraverso queste misure sono stati ricavati i valori della profondità e della larghezza delle linee di marcatura, come illustrato nella figura III.14.

Il valore della profondità è stato calcolato come media delle cinque profondità massime, misurate per ogni linea di marcatura.

E' stato poi calcolato il rapporto di forma, dato dalla seguente formula:

$$\text{Rapporto di forma} = \frac{\text{Profondità}}{\text{Larghezza}} \quad (\text{III.1})$$

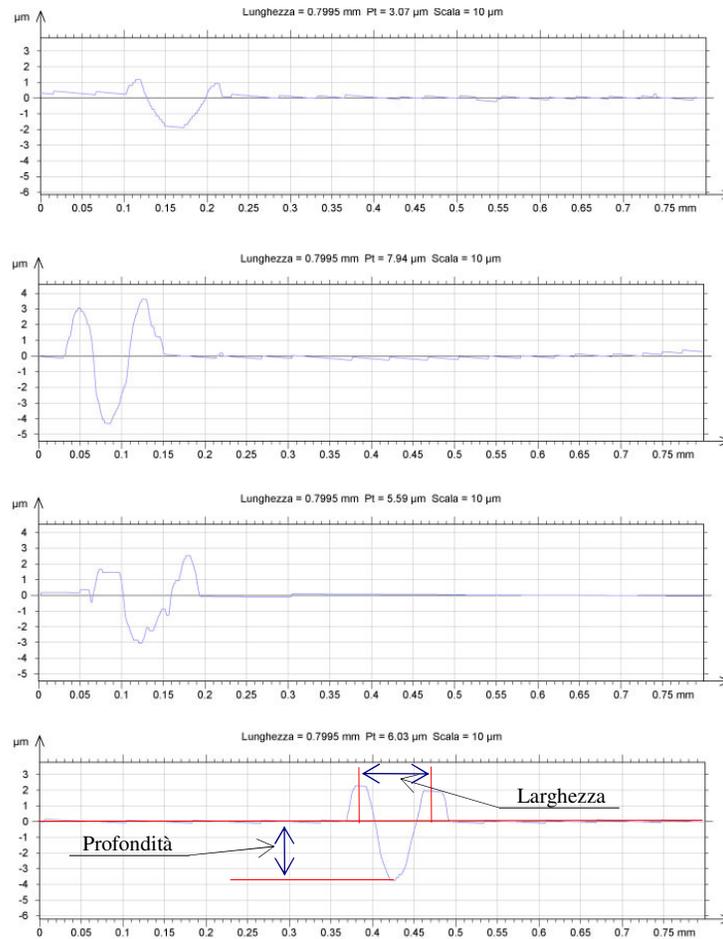


Figura III.14 – Finestra di Talymap Universal.

### III.4.1.1 Il Rugosimetro Surtronic 3+

Nella figura III.15 è riportato il primo rugosimetro utilizzato.

La parte hardware dello strumento, che consente il rilievo delle microgeometrie superficiali, è composta dai seguenti elementi:

- Tastatore o stilo;
- Traversa mobile;
- Modulo di interfaccia;

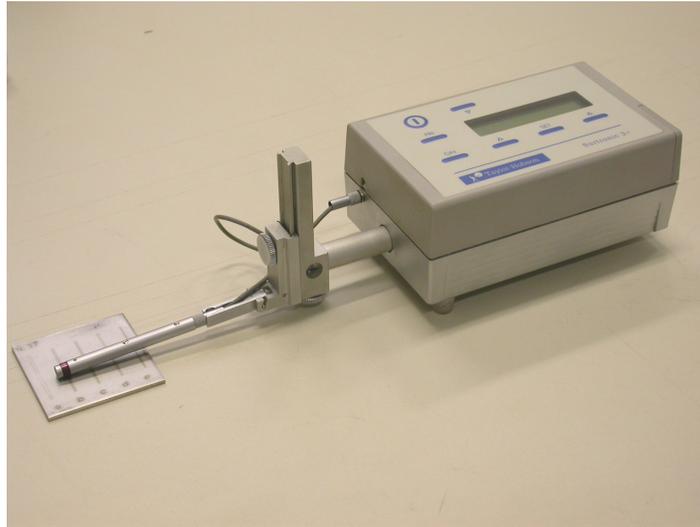
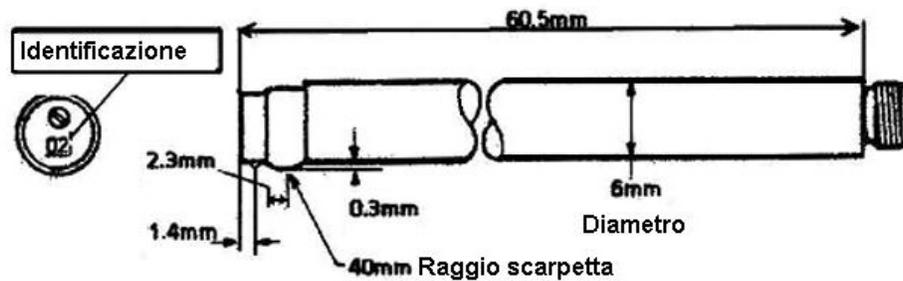


Figura III.15 – Surtronic 3+ della Taylor-Hobson.

Il tastatore, alla cui estremità libera è collocata una punta di diamante con raggio di raccordo al vertice di  $5\ \mu\text{m}$ , è l'unico elemento che entra in contatto con la superficie da esaminare. Esso trasferisce le sue oscillazioni, provocate dalle asperità superficiali, al trasduttore (*pick-up*) induttivo nel quale è alloggiato, collegato alla traversa mobile. Nel *pick-up* il segnale meccanico viene convertito in un segnale analogico, secondo il principio induttivo. Le dimensioni e le caratteristiche del tastatore sono riportate in figura III.16.

La *traversa*, avente un'escursione massima di 25 mm, sostiene il *pick-up* e consente lo scorrimento in direzione orizzontale.

Il *modulo di interfaccia* analizza il segnale proveniente dal *pick-up* ed invia i dati al computer tramite una porta RS 232.



Range di misura	$\pm 150 \mu\text{m}$
Risoluzione	0,01 $\mu\text{m}$
Accuratezza	2 di lettura + LSD $\mu\text{m}$
Tipo di Pick-up	Induttivo
Diamante dello stilo	Raggio della punta 5 $\mu\text{m}$

Figura III.16 – Caratteristiche Tastatore.

### III.4.1.2 Il Rugosimetro Talysurf pgi plus 0.8nm

Nella figura III.17 è riportato il rugosimetro in oggetto.

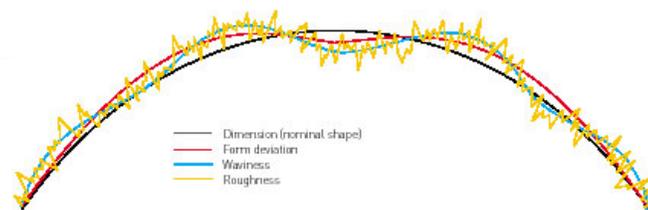
Il puntatore è un misuratore di tipo induttivo e viene fatto scorrere lungo la superficie da misurare, il trasduttore converte i movimenti verticali del puntatore in un segnale elettrico, il quale viene amplificato ed utilizzato per registrare i dati. Durante la misurazione delle caratteristiche superficiali del materiale in esame il pezzo stesso viene preso come riferimento delle misure. Inoltre poiché lo strisciamento agisce come un filtro meccanico, rimuovendo o alterando le caratteristiche di forma e/o ondulazione del materiale, i dati collezionati non sono adatti ad un'analisi immediata.



*Fig.III.17 - Rugosimetro Talysurf pgi plus 0.8nm della Taylor Hobson.*

Per una corretta acquisizione dei dati il tastatore deve passare sul componente da misurare lungo una linea retta così che solo l'estremità del tastatore entri in contatto con la superficie in osservazione.

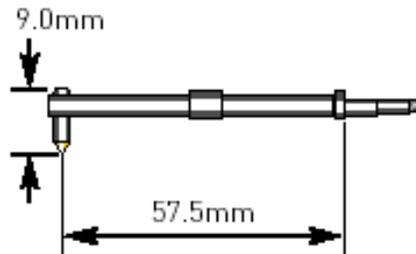
I dati acquisiti durante la misurazione vengono elaborati mediante il software *μltra* della *Taylor Hobson*, che ci permette di produrre numerosi parametri di interesse come di seguito elencati.



*Fig .III.18 - Elementi di una superficie distinguibili dopo l'acquisizione.*

### Misuratore induttivo.

Il tastatore a nostra disposizione è del tipo riportato nella figura III.19.



*Fig .III.19 - Braccio con bordo a scalpello e punta diamantata ( $2\mu\text{m} \times 750\mu\text{m}$ )*

La testa del tastatore permette di misurare altezze complessive di 1 mm di range e consente l'eccellente range di risoluzione di 65,536:1. Il tastatore è costituito da un braccio imperniato e bilanciato che permette la misurazione delle superfici in diversi assetti.

La strumentazione è inoltre dotata di un banco di movimentazione che permette il movimento del tastatore lungo gli assi x ed y, oltre al posizionamento verticale dello stesso. Il set di misurazione e il blocco di movimentazione sono entrambi montati su una lastra di granito.

La movimentazione lungo le due direzioni planari x ed y permette la ricostruzione di topografie 3-D, ovvero questo è possibile utilizzando un programma che acquisisce un certo numero di profili paralleli, misurati ad una pre-determinata distanza, utilizzando la traslazione lungo l'asse delle y. Qui di seguito si riportano le specifiche.

### **Caratteristiche orizzontali.**

- Lunghezza di traslazione – X Min / Max: da 0.1mm a 50mm
- Velocità di misura / traslazione: da 10mm/s a 1mm/s
- Intervallo di campionatura dei dati lungo l'asse delle X: 0.5µm
- Errore di tolleranza di rettilineità: 0.5µm

### **Caratteristiche verticali.**

- Range di misurazione: 1mm
- Risoluzione: 16nm nel range di 1mm  
3nm nel range 0.2mm
- Range del rapporto di risoluzione: 65,536:1
- Lunghezza del braccio del tastatore: 60mm
- Dimensione della punta: 2µm, raggio della punta diamantata
- Forza: 1mN

### **Parametri misurabili.**

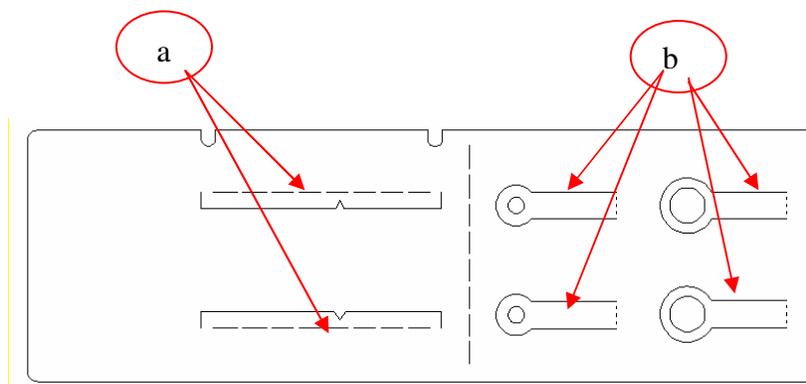
- Primari: Pa, Pc, Pda, Pdc, Pdq, PHSC, Pku, Pln, Plo, Plq, Pmr(c), Pmr, Pp, Ppc, Pq, PS, Psk, Psm, Pt, Pv, Pvo, Pz, Pz(JIS)
- Parametri di rugosità: R3y, R3z, Ra, Rc, Rda, Rdc, Rdq, RHSC, Rku, Rln, Rlo, Rl, Rmr(c), Rmr, Rp, Rp1max, Rpc, Rq, RS, Rsk, RSm, Rt, Rv, Rvo, Rv1max, Rz, Rz(DIN), Rz(JIS), Rz1max

- Parametri di ondulazione:  $W_a$ ,  $W_c$ ,  $W_{da}$ ,  $W_{dc}$ ,  $W_{dq}$ ,  $W_{HSC}$ ,  $W_{ku}$ ,  $W_{ln}$ ,  $W_{lo}$ ,  $W_{lq}$ ,  $W_{mr(c)}$ ,  $W_{mr}$ ,  $W_p$ ,  $W_{pc}$ ,  $W_q$ ,  $W_s$ ,  $W_{sk}$ ,  $W_{sm}$ ,  $W_t$ ,  $W_v$ ,  $W_{vo}$ ,  $W_z$
- Filtri: Gaussiano, ISO 2CR, 2CR PC / 30:1, 100:1, 300:1
- Cut-offs: 0.08, 0.25, 0.8, 2.5 e 8mm

### III.4.2 Misura del contrasto

La misura del contrasto è stata eseguita rapportando il valore della scala di grigi (valori compresi tra 0 e 255) delle linee di marcatura con quello delle zone non marcate del provino.

Il primo passo per questa analisi è stato quello di fotografare tutte le linee di marcatura illuminate con un angolo costante di  $45^\circ$ . Per fare ciò è stata montata una macchina digitale *Nikon Coolpix 4500* con sensore CCD da 4.0 megapixel sul microscopio *Zeiss*, modello *Stemi 2000 – CS*. Per garantire una illuminazione con angolo costante per tutti i provini è stata disegnata con *Autocad*, e successivamente tagliata a laser, una piastra di acciaio (figura III.20): le due guide *a* consentono di far scorrere il provino sotto al microscopio, per poter fotografare la marcatura desiderata; i quattro supporti *b* consentono di ottenere una luce incidente con un angolo costante di  $45^\circ$  rispetto all'asse della camera CCD (figura III.21).



*Figura III.20–Disegno in Autocad della piastra:*

*a – guide provino; b – supporti luci*



*Figura III.21 – Attrezzatura per la misura del contrasto.*

Il secondo passo è stato quello di elaborare tutte le foto per portarle in scala di grigi e ridimensionarle a 200x150 pixel. Il riconoscimento del valore della scala di grigi da attribuire ad ogni pixel è stato eseguito attraverso il seguente algoritmo in Matlab:

```

A = ['imread' 'Marcatura_x.tif'];
eval (A);
B = double (ans);
save marcatura_x.txt B -ascii -tabs

```

L'ultima riga dell'algorithmo salva la matrice, dei valori misurati, in un file *.txt*. Questi file, contenenti le matrici, sono stati rielaborati con excel per avere il valore del contrasto tra il materiale non marcato e la linea di marcatura. I valori percentuali del contrasto sono stati calcolati con la seguente formula:

$$\text{Contrasto}(\%) = 1 - \frac{\text{Lum.Marcatura}}{\text{Lum.Media}} \times 100 \quad (\text{III.2})$$

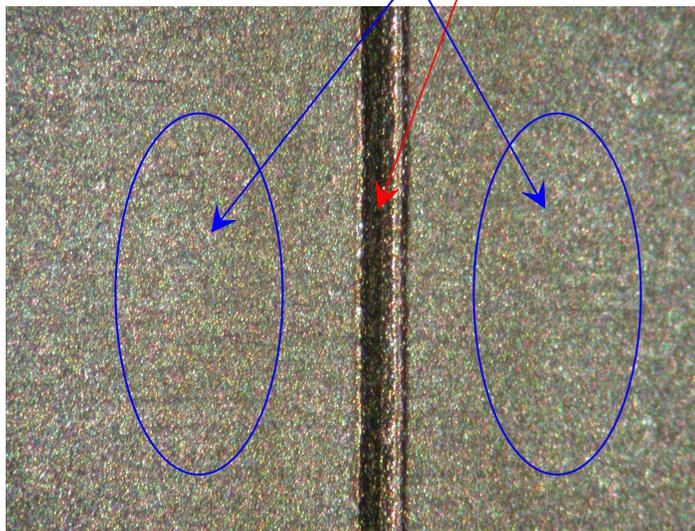


Figura III.22 – Foto al microscopio di un provino .

valida solo per l'AISI 304, mentre per l'AISI 430 si è usata la formula invertendo la luminosità media e la luminosità di marcatura, a causa della diversa finitura superficiale dei materiali. Il valore risultante dalla formula dovrebbe consentirci di sapere quanto la luminosità della marcatura è più chiara, o più scura, rispetto a

quella media della superficie del provino. La luminosità della marcatura è il valore minimo della matrice calcolata con *Matlab*, mentre la luminosità media è stata calcolata come media dei valori della matrice inerenti alla zona non marcata del provino.

# **Capitolo IV**

## **Risultati sperimentali**

## IV.1 I risultati sperimentali

Nel presente capitolo vengono illustrati i grafici più significativi, in particolare verranno discussi i risultati delle marcature eseguite dopo l'operazione di riallineamento degli specchi della camera di risonanza; nell'appendice, invece, sono riportati i diagrammi del primo set di prove di marcatura. E' bene osservare che si sono ottenute diverse profondità per le marcature eseguite prima e dopo l'intervento di manutenzione, a parità di condizioni; tuttavia occorre sottolineare che gli andamenti dei diagrammi sono qualitativamente simili. Nell'appendice, inoltre, sono riportati i diagrammi relativi all'analisi del contrasto, in quanto non si sono avute variazioni apprezzabili al cambiare dei parametri di processo.

Come parametri di valutazione verranno usati, oltre a quelli già spiegati nei capitoli precedenti, anche il *passo* ed il *fattore di ricopertura*.

Il valore del passo, espresso in *mm*, esprime la distanza di due impronte successive ed è dato da:

$$Passo = \frac{Velocità}{Frequenza} \quad (IV.1)$$

Il fattore di ricopertura è una caratteristica dei laser pulsati e fornisce in percentuale di quanto due impronte successive, lasciate dal laser sul materiale, sono sovrapposte. E' possibile calcolare questo valore con la seguente formula:

$$Fattore\ di\ ricopertura = \frac{v}{fd} \quad (IV.2)$$

dove  $v$  è la velocità di lavorazione espressa in *mm/s*,  $f$  la frequenza espressa in *Hz* e  $d$  il diametro dello spot del laser in *mm*.

L'analisi condotta, inoltre, ha avuto un duplice approccio: una valutazione qualitativa, che tiene conto dell'aspetto del solco realizzato, e una valutazione quantitativa, che invece prende in considerazione gli effettivi risultati sperimentali ottenuti dal processo di marcatura.

Per quanto riguarda il primo aspetto, abbiamo effettuato un'osservazione al microscopio ottico della Zeiss, grazie al quale siamo stati in grado di riportare le foto dei casi esaminati.

Per l'approccio quantitativo esaminiamo i singoli casi.

## **IV.2 Prove su Acciaio AISI 304**

### **IV.2.1 AISI 304 – 35A**

In questo paragrafo verranno valutati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 304, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 35A.

Nella figura IV.1 viene mostrato l'andamento della profondità delle linee di marcatura al variare della frequenza del laser per tre velocità di marcatura. Le tre curve hanno andamenti molto simili, la profondità inizialmente aumenta fino ad arrivare ad un massimo per frequenze pari a circa 6.000-8.000Hz. Subito dopo questo valore, le curve tendono a decrescere fino ai 30.000Hz, dove la profondità di marcatura assume valori molto bassi. E' ipotizzabile che tale fenomeno sia dovuto al fatto che all'aumentare della frequenza diminuisce la potenza di picco del laser (vedi figura III.12) ma si riscalca il materiale più volte, inizialmente è questo fenomeno a condizionare l'andamento della curva, poi la diminuzione

della potenza fa sì che diminuisca il volume lavorato. Ovviamente a velocità più basse corrisponde una marcatura più profonda.

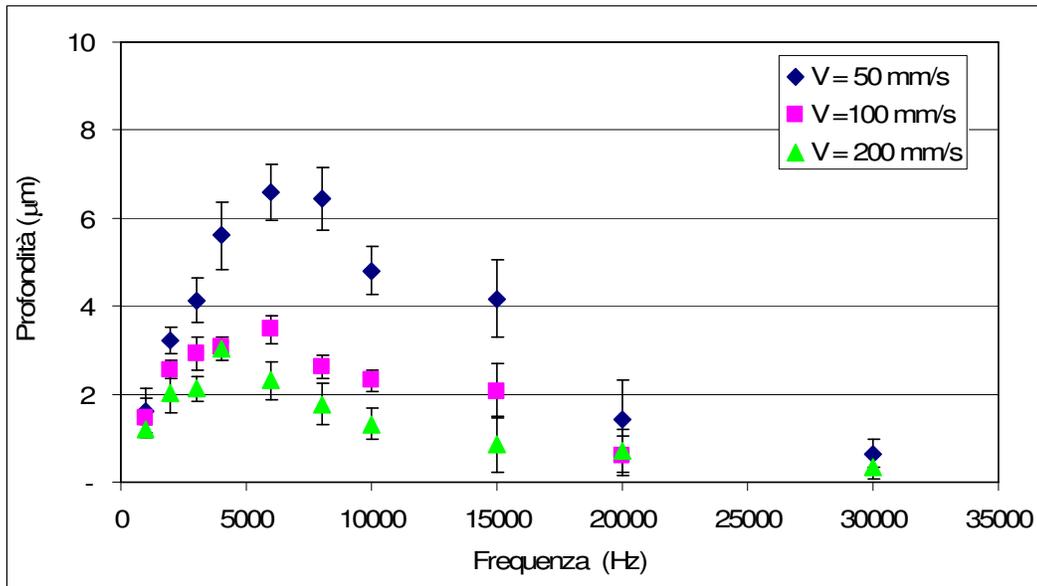


Figura IV.1 – Andamento della profondità del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

Nella figura IV.2 è riportato l'andamento della profondità del solco in funzione della potenza media, per tre diversi valori di velocità. Le tre curve seguono lo stesso andamento: aumentano all'aumentare della potenza fino ad un valore prossimo ai 5W, in corrispondenza del quale raggiungono il massimo, e poi tendono a diminuire. Questo parametro quindi condiziona in modo diretto la marcatura, ma non è impostabile direttamente in fase di lavorazione.

La figura IV.3 mostra come varia la profondità del solco di marcatura al variare della potenza di picco, per tre velocità di lavorazione. Le tre curve hanno un andamento simile, crescono con la potenza per raggiungere il massimo a circa 5 kW e poi si abbassano. Possiamo inoltre osservare come queste curve siano speculari rispetto a quelle relative alla figura precedente.

Essendo il termine energetico il parametro che domina il processo di marcatura, si rende allora utile introdurre il rapporto  $Pm/v$ , “potenza media/velocità”, che rappresenta l’energia per unità di lunghezza.

La figura IV.4 riporta la profondità del solco al variare del rapporto precedentemente introdotto per le tre velocità di marcatura. Le curve ottenute, per le tre diverse velocità, presentano lo stesso andamento qualitativo, ossia prima crescono fino a un valore massimo (diverso per i tre casi) e poi decrescono. Le tre curve tendono a spostarsi verso sinistra all’aumentare della velocità. Abbiamo focalizzato la nostra attenzione su questo parametro in quanto è l’unico che ci permette di interpretare il fenomeno della marcatura laser nella sua interezza. Come si può notare dalla figura, fatta eccezione dei valori estremi, che competono alle elevate frequenze, le tre curve si dispongono, con una certa approssimazione, lungo una sola curva.

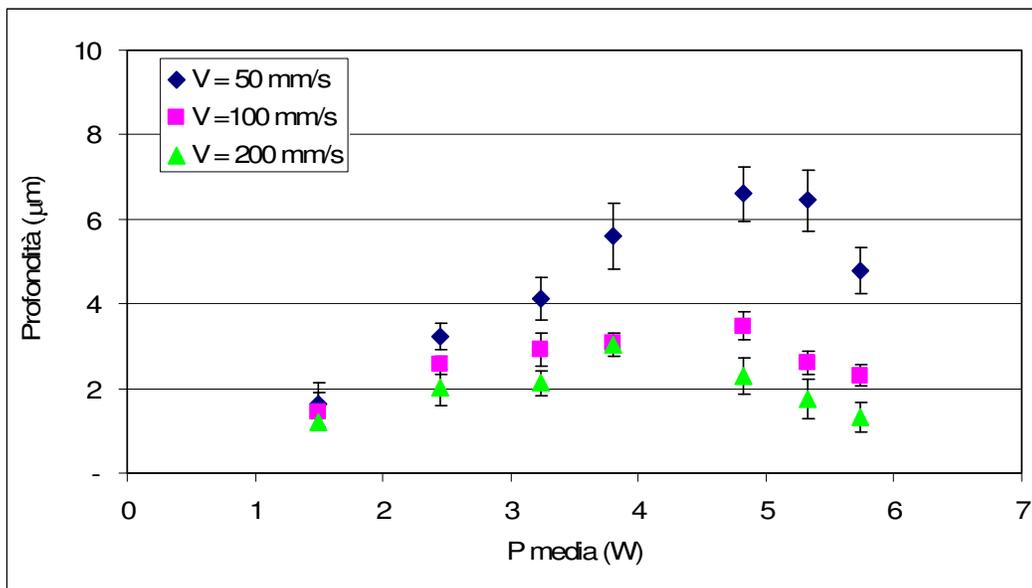


Figura IV.2 – Andamento della profondità del solco al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

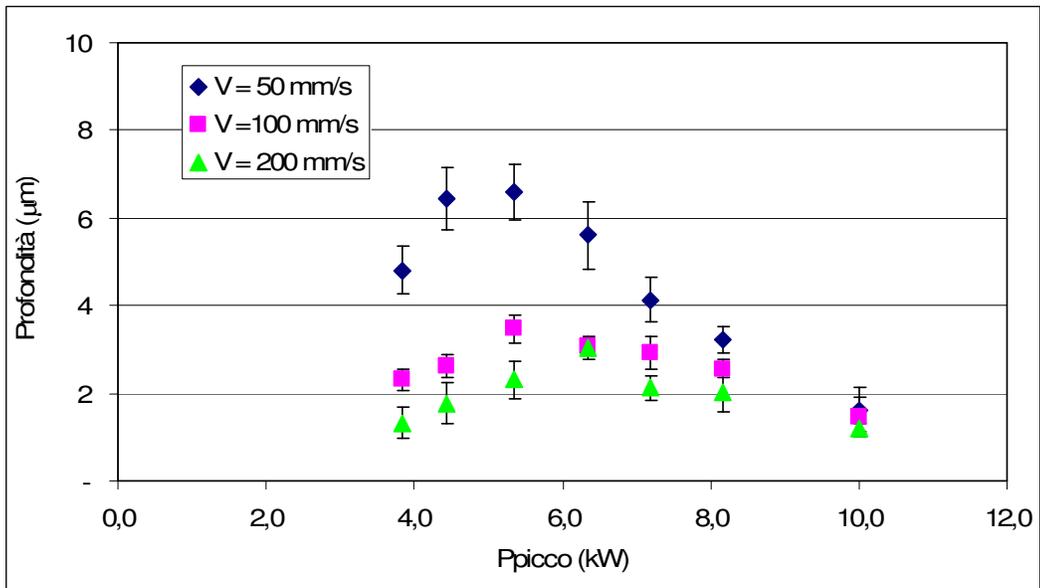


Figura IV.3 – Andamento della profondità del solco al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

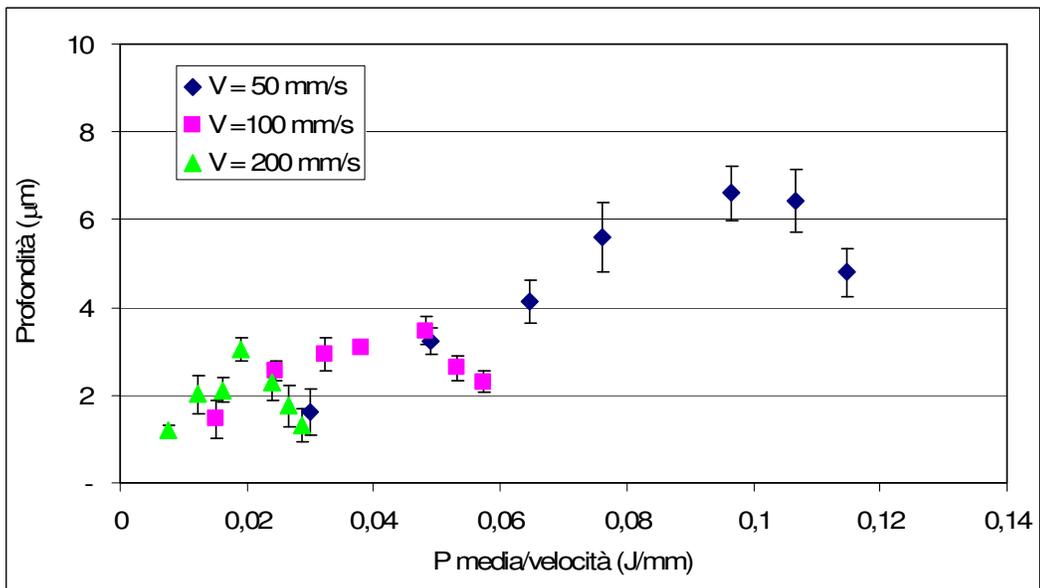


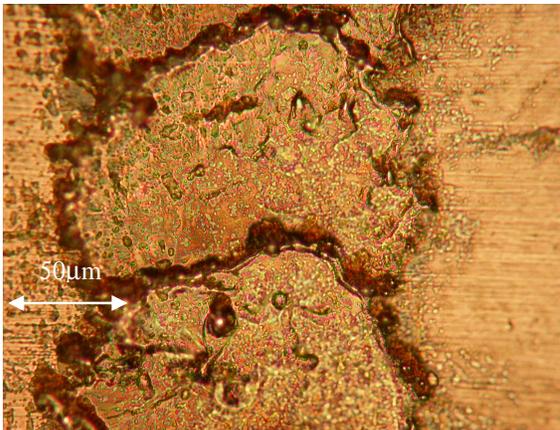
Figura IV.4 – Andamento della profondità del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

Dalla figura IV.5 è possibile vedere la geometria del solco ottenuto nelle diverse condizioni di lavorazione. È opportuno precisare che abbiamo riportato le foto

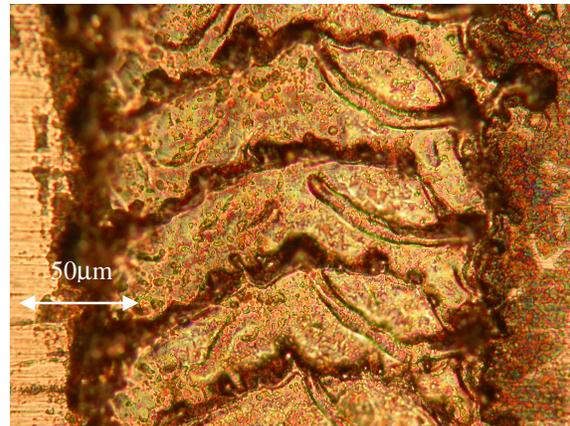
relative ad un solo materiale, in particolare AISI 430 ad una sola corrente di alimentazione dei diodi,  $I=45$  A, e ad una sola velocità di esecuzione, 100mm/s, per diversi valori di frequenza in quanto abbiamo osservato che questi aspetti geometrici si ripetevano sistematicamente.

Si può notare inoltre come la geometria del solco sia fortemente influenzata dalla frequenza: si mantiene regolare fino a 8.000 Hz, per poi cambiare dai 10.000 Hz.

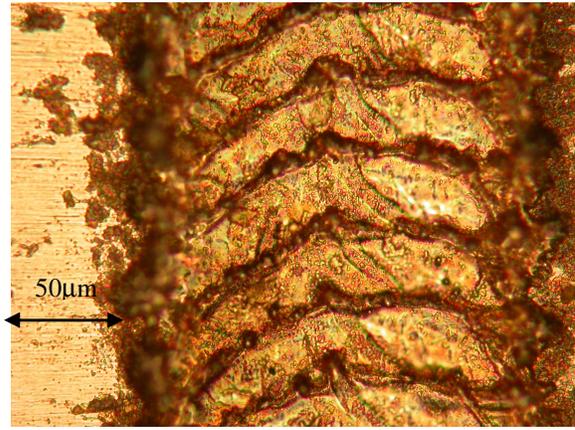
Questa semplice osservazione ci ha portato a considerare come limite di interesse il valore di frequenza di 8.000 Hz: l'analisi quantitativa dei nostri parametri infatti è stata condotta fino a 8.000 Hz; inoltre, come evidenziano queste foto, ad elevate frequenze la marcatura quasi si confonde con la rugosità del materiale (molte difficoltà abbiamo incontrato proprio nelle misurazioni dei vari parametri a 20.000 e 30.000Hz).



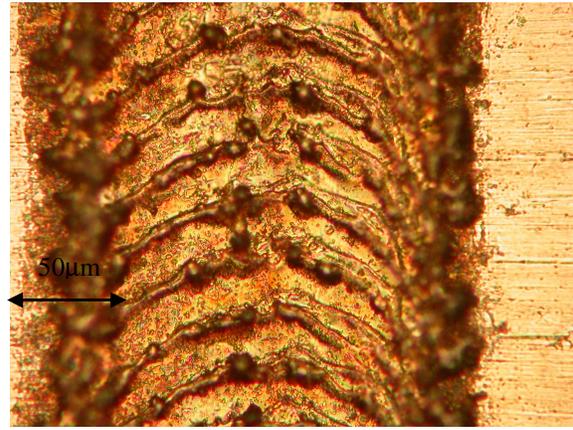
a) AISI 430,  $v=100$ mm/s,  $I=45$  A,  $f=1.000$ Hz



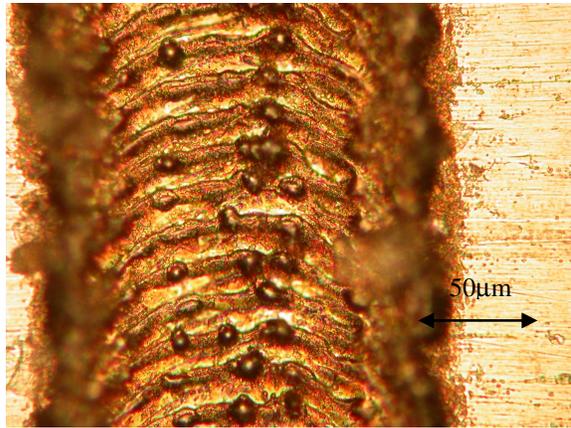
b) AISI 430,  $v=100$ mm/s,  $I=45$  A,  $f=2.000$ Hz



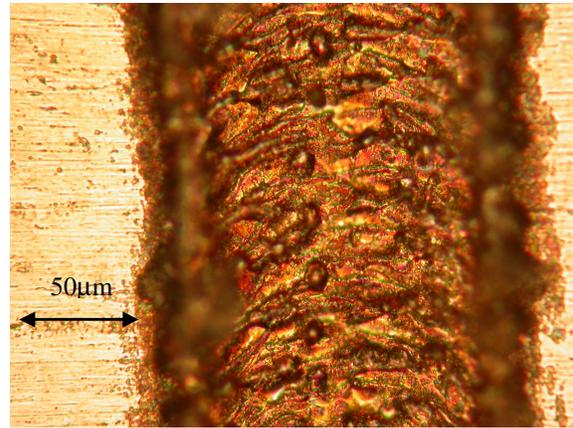
c) AISI 430,  $v=100\text{mm/s}$ ,  $I=45\text{ A}$ ,  $f=3.000\text{Hz}$



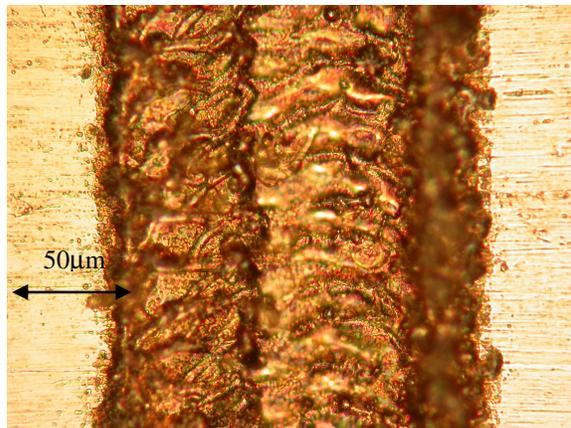
d) AISI 430,  $v=100\text{mm/s}$ ,  $I=45\text{ A}$ ,  $f=4.000\text{Hz}$



e) AISI 430,  $v=100\text{mm/s}$ ,  $I=45\text{ A}$ ,  $f=6.000\text{Hz}$



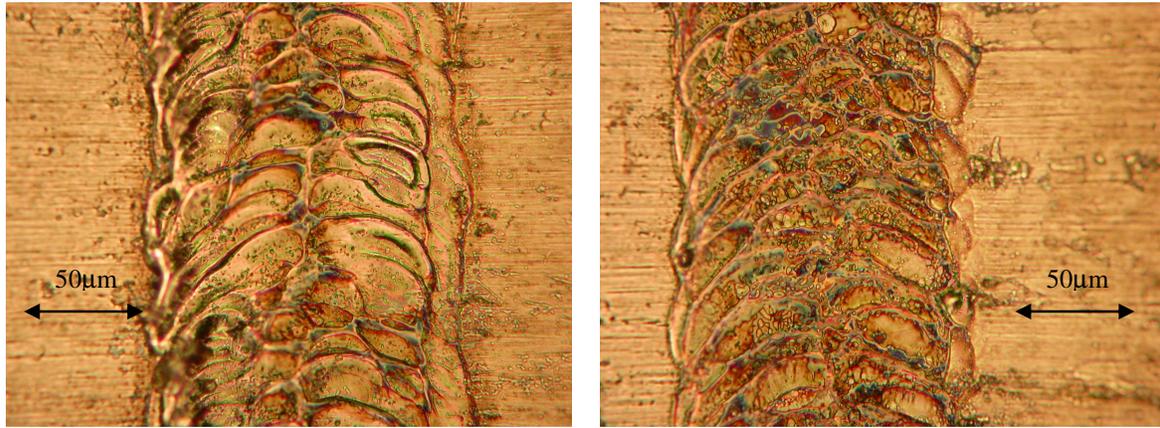
f) AISI 430,  $v=100\text{mm/s}$ ,  $I=45\text{ A}$ ,  $f=8.000\text{Hz}$



g) AISI 430,  $v=100\text{mm/s}$ ,  $I=45\text{ A}$ ,  $f=10.000\text{Hz}$



h) AISI 430,  $v=100\text{mm/s}$ ,  $I=45\text{ A}$ ,  $f=15.000\text{Hz}$



i) AISI 430,  $v=100\text{mm/s}$ ,  $I=45\text{ A}$ ,  $f=20.000\text{Hz}$

j) AISI 430,  $v=100\text{mm/s}$ ,  $I=45\text{ A}$ ,  $f=30.000\text{Hz}$

*Figura IV.5– Analisi della geometria del solco*

Nella figura IV.6 si vede come varia la larghezza della marcatura al variare della frequenza di lavorazione, per le tre velocità di marcatura. Dall'andamento delle tre curve si evince che la velocità non è un parametro che condiziona la larghezza di marcatura, infatti le curve risultano quasi sovrapposte, fatta eccezione per elevati valori di frequenza. All'aumentare della frequenza le curve tendono ad abbassarsi. Si intuisce che risulta difficile, in tali condizioni, variare in modo evidente la larghezza di marcatura.

Nella figura IV.7 vengono riportati i valori della larghezza ottenuti per le tre velocità di marcatura in funzione della potenza media del nostro laser. Si vede come all'aumentare della potenza media la larghezza di marcatura ha un andamento decrescente. Questo parametro quindi condiziona in modo diretto la marcatura, ma non è impostabile in fase di lavorazione.

La figura IV.8 riporta la larghezza in funzione della potenza di picco per tre velocità di lavorazione. Le curve ottenute presentano lo stesso andamento, che

come già osservato per la profondità è opposto rispetto all'andamento della larghezza in funzione della potenza media.

Nella figura IV.9 si osserva come varia la larghezza al variare del rapporto “potenza media/velocità”, per tre valori di velocità. Le curve sono caratterizzate da un analogo andamento: decrescono all'aumentare di questo rapporto, giunti in corrispondenza di un minimo tendono a risalire. Le curve si spostano verso sinistra all'aumentare della velocità.

Contrariamente a quanto visto per la profondità, i dati di larghezza in funzione del rapporto “potenza media/velocità” non si dispongono lungo una sola curva.

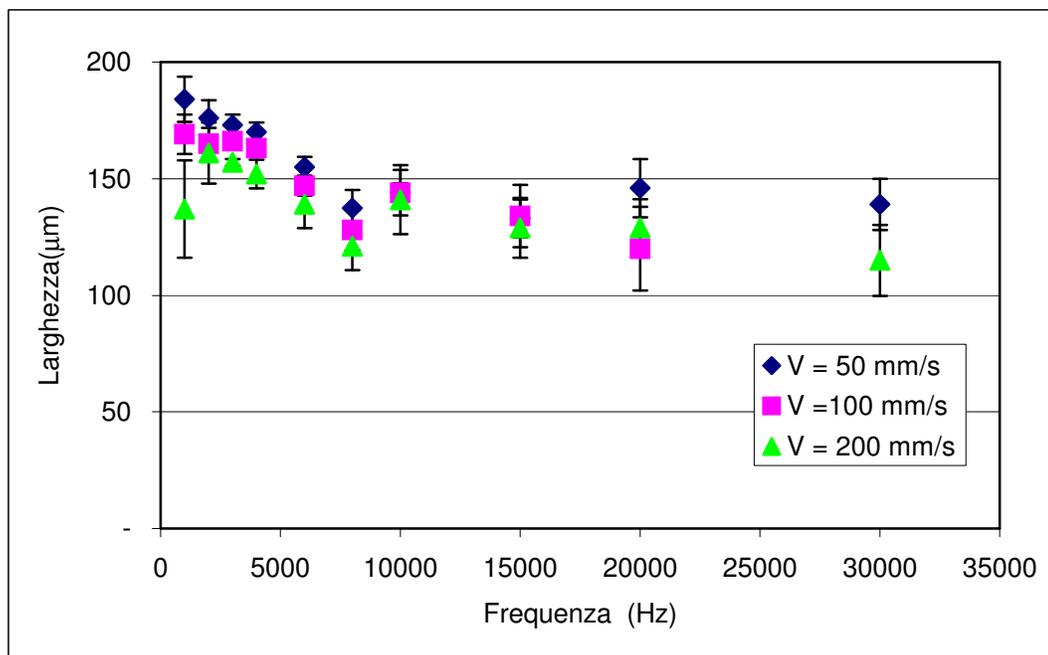


Figura IV.6 – Andamento della larghezza del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

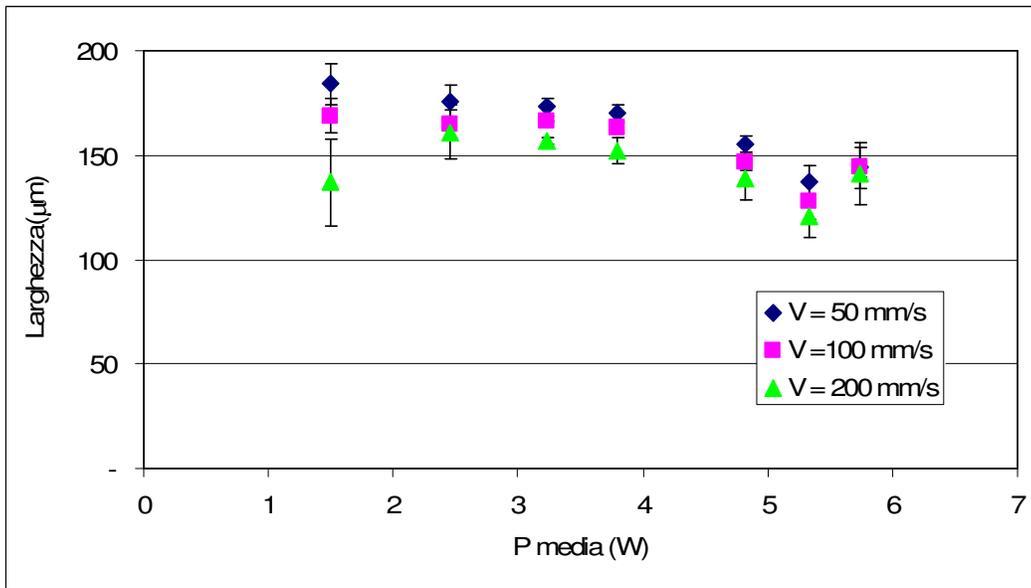


Figura IV.7 – Andamento della larghezza del solco al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

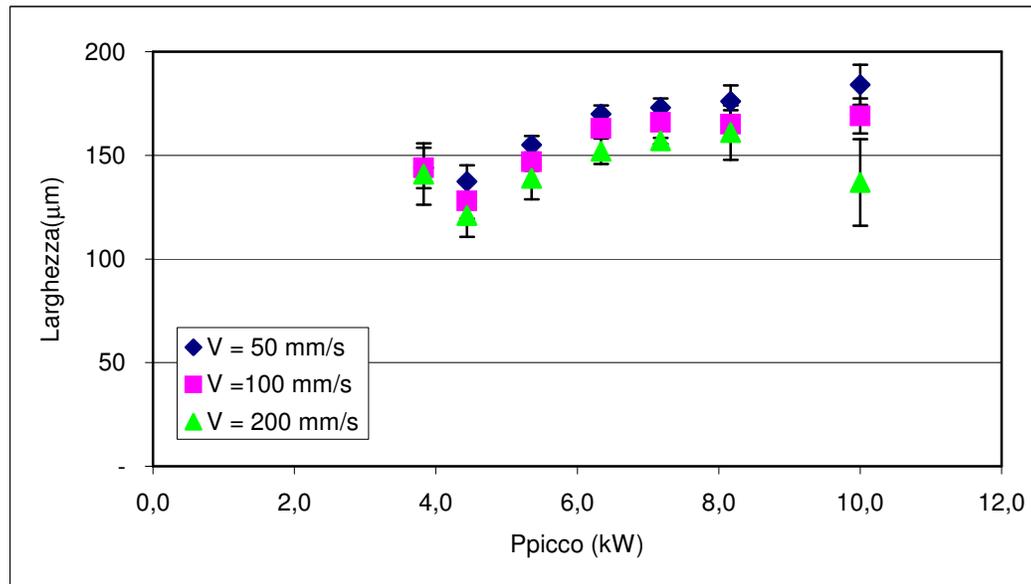


Figura IV.8 – Andamento della larghezza del solco al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

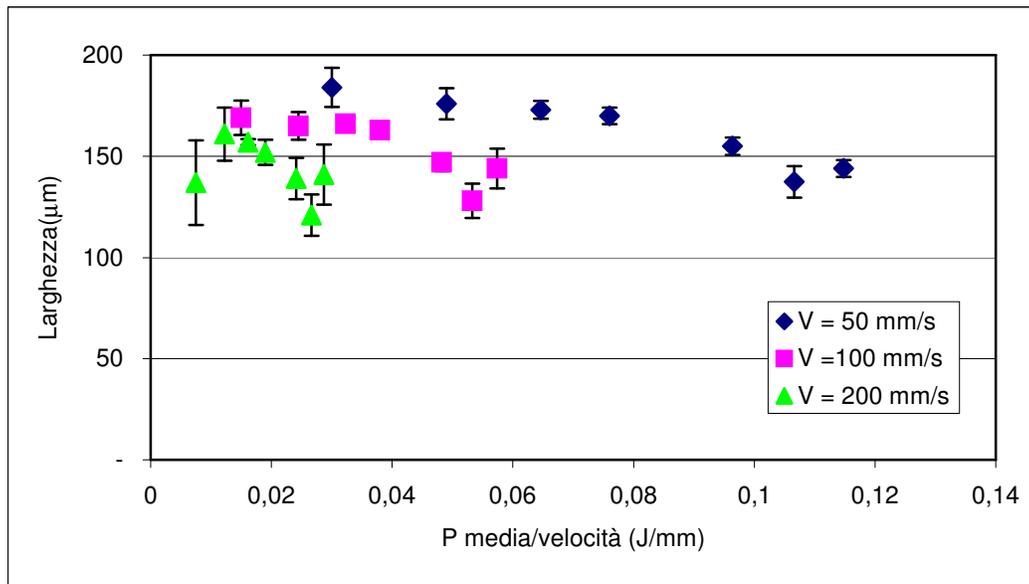
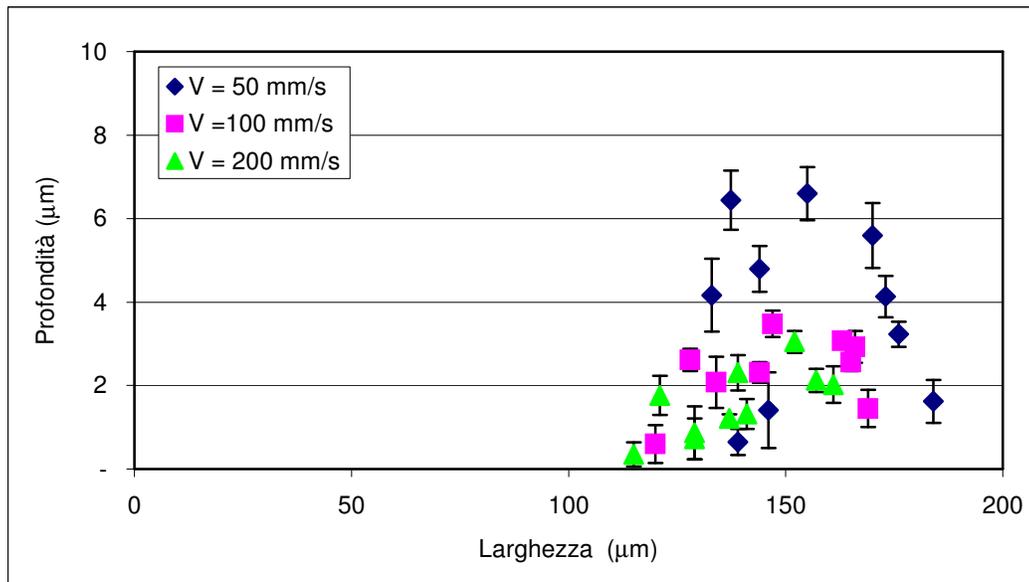


Figura IV.9 – Andamento della larghezza del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

Dalla figura IV.10 analizziamo come varia la profondità del solco di marcatura al variare della larghezza del solco stesso per tre velocità di lavorazione. Da un'immediata osservazione possiamo ritenere che non c'è correlazione tra questi parametri.



*Figura IV.10 – Andamento della profondità al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.*

#### **IV.2.2 AISI 304 – 45A**

In questo paragrafo saranno valutati i risultati conseguiti marcando l'acciaio AISI 304, con una corrente di alimentazione dei diodi pari a 45A.

I grafici di seguito riportati, hanno un andamento simile di quelli analizzati nel paragrafo precedente. Riteniamo opportuno non commentarli in quanto risulterebbero una perfetta copia di quelli già letti.

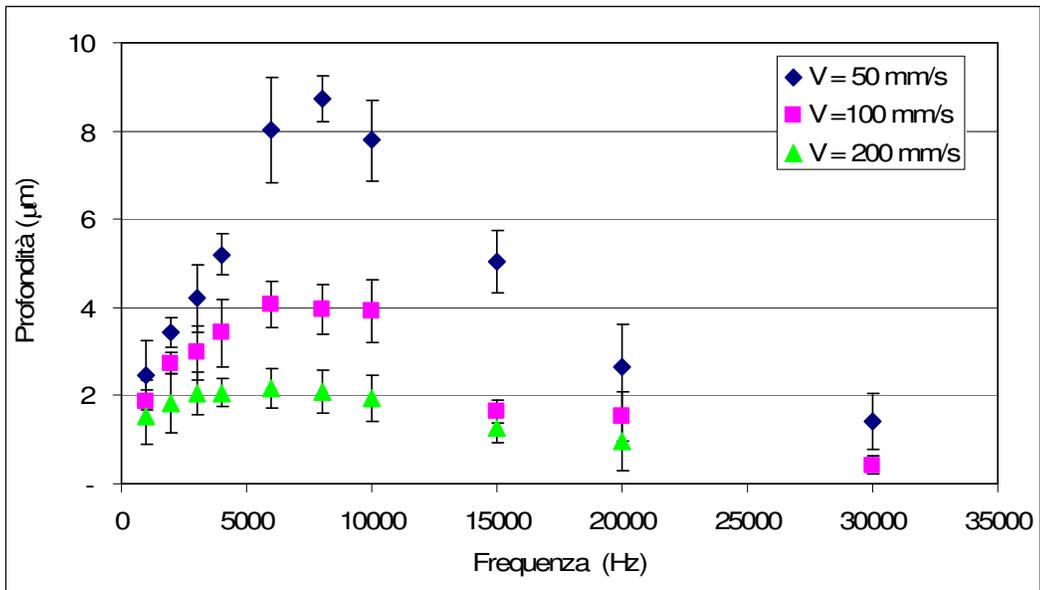


Figura IV.11 – Andamento della profondità al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 304.

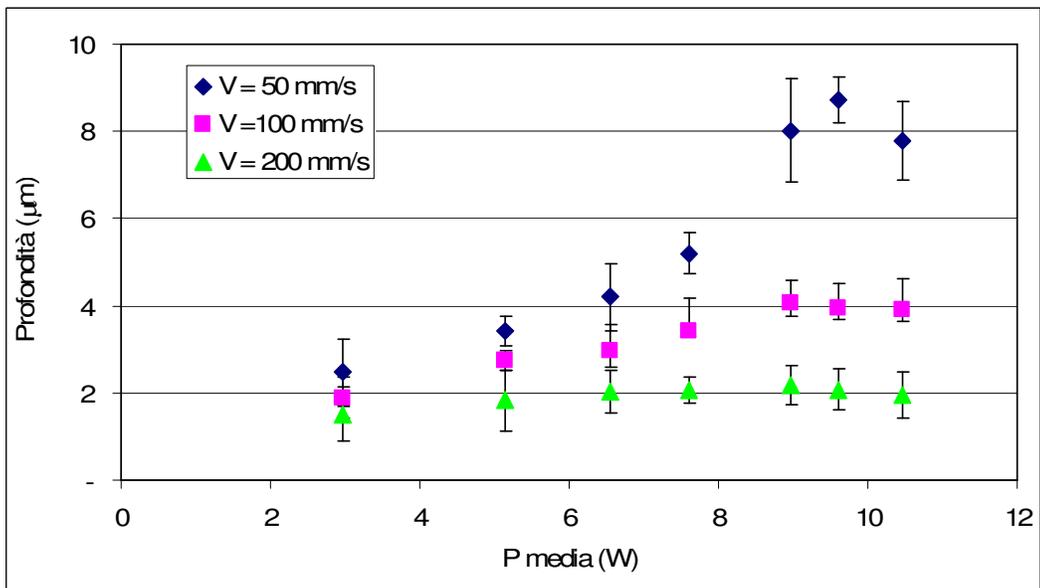


Figura IV.12 – Andamento della profondità del solco al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 304.

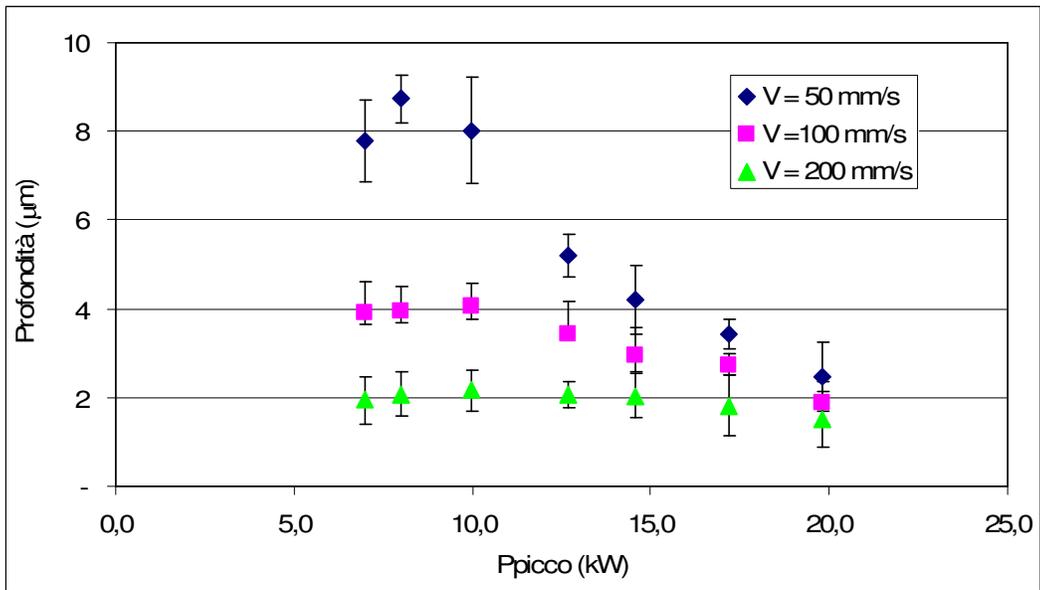


Figura IV.13 – Andamento della profondità del solco al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 304.

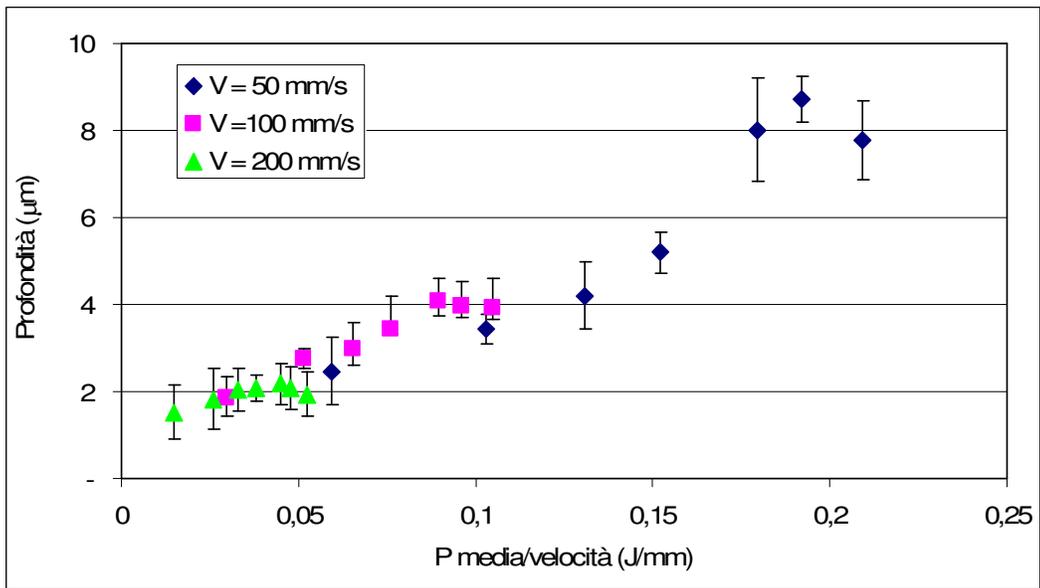


Figura IV.14 – Andamento della profondità del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 304.

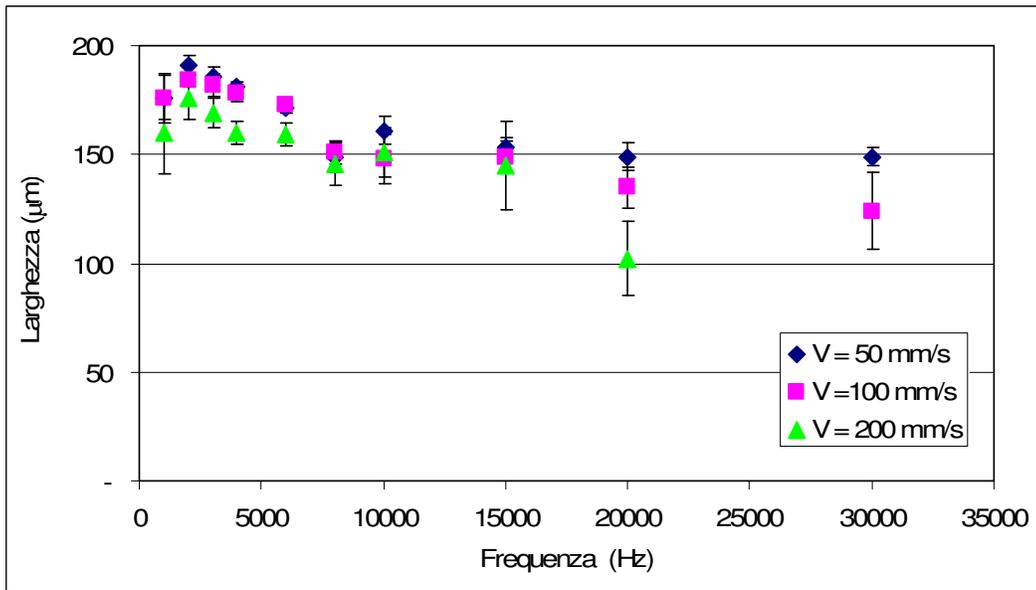


Figura IV.15 – Andamento della larghezza al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 304.

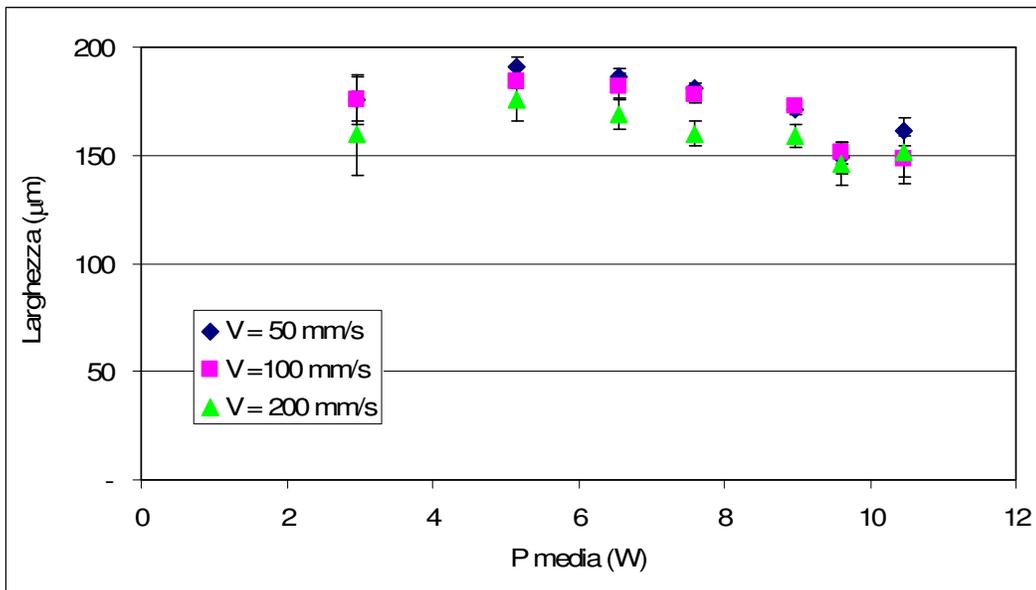


Figura IV.16 – Andamento della larghezza del solco al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 304.

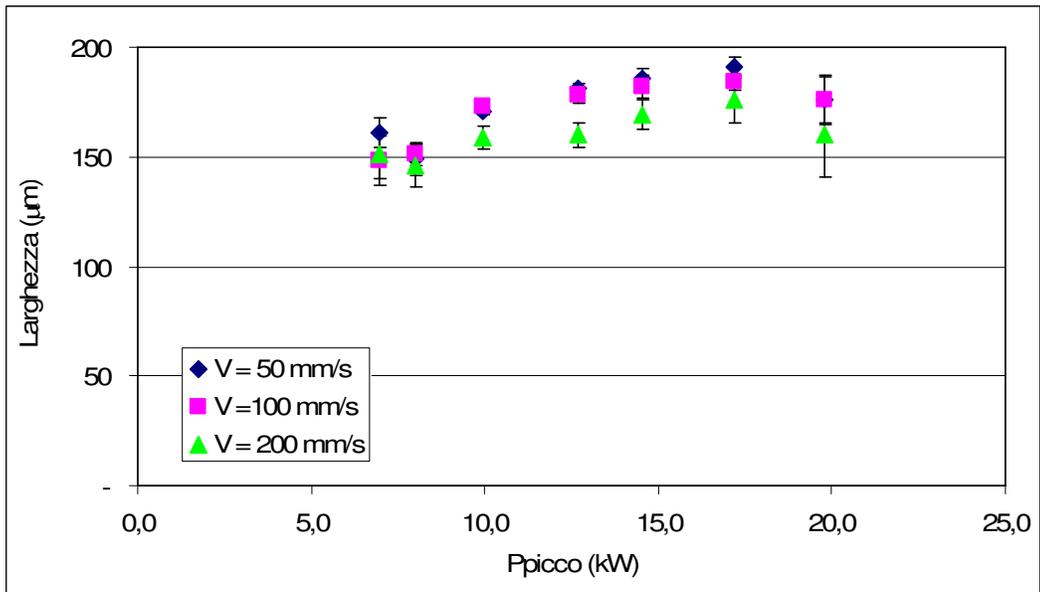


Figura IV.17 – Andamento della larghezza del solco al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 304.

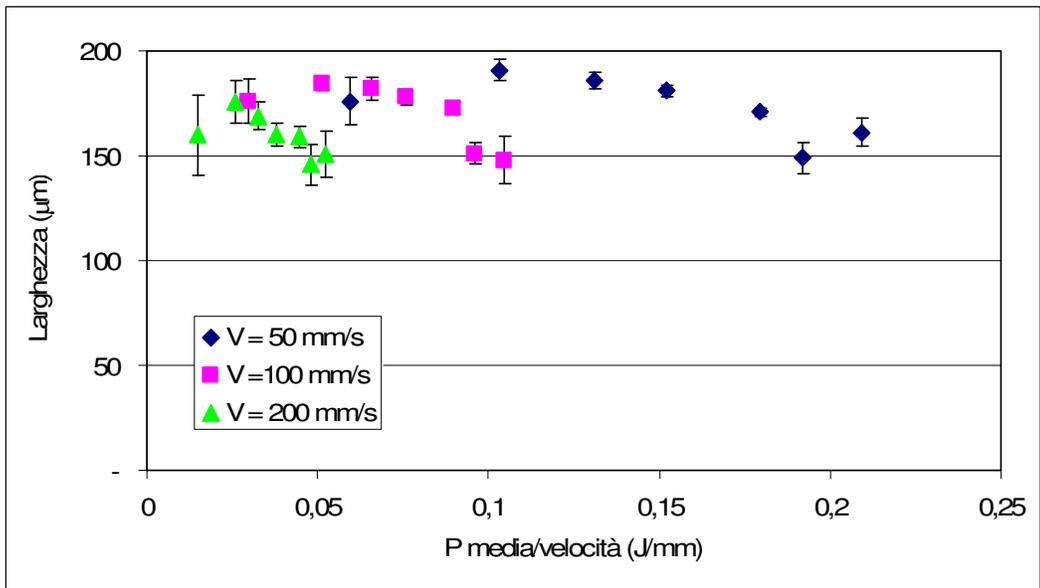


Figura IV.18 – Andamento della larghezza del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 304.

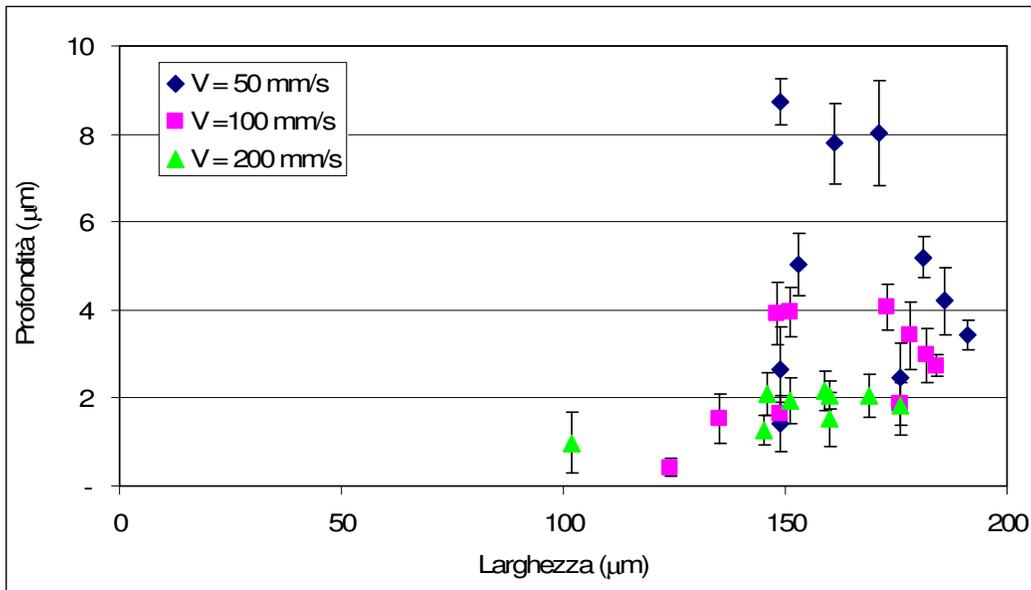


Figura IV.19 – Andamento della profondità al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 304.

#### IV.2.3 AISI 304 – 55A

In questo paragrafo verranno valutati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 304, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 55A.

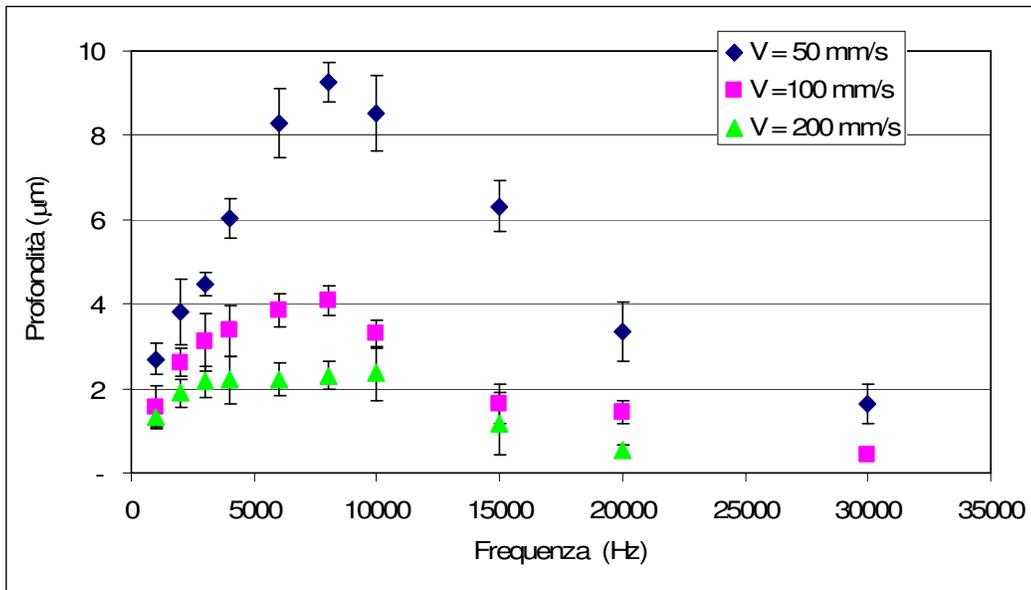


Figura IV.20 – Andamento della profondità del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 304

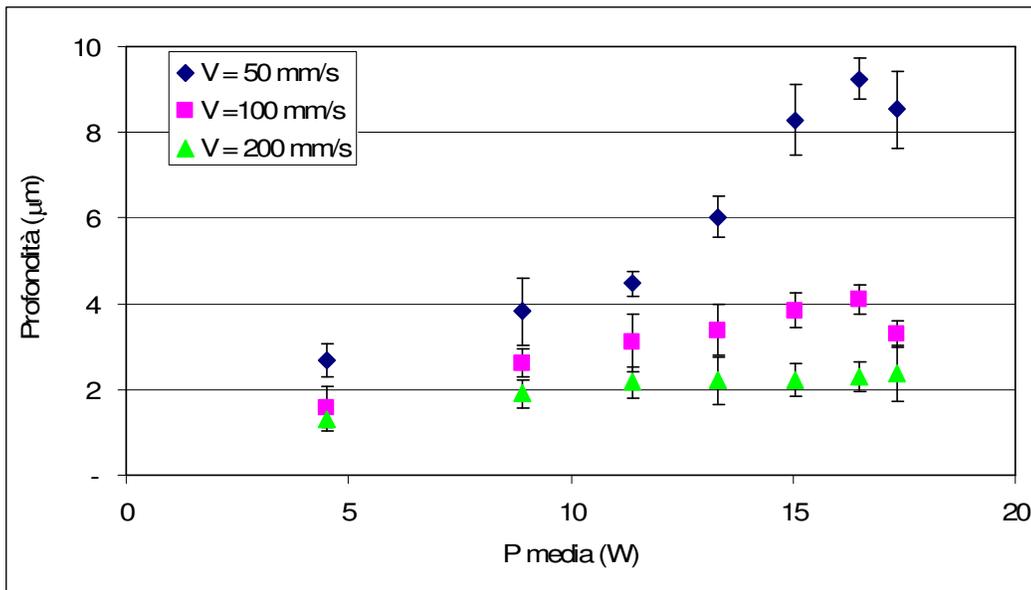


Figura IV.21 – Andamento della profondità del solco al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 304.

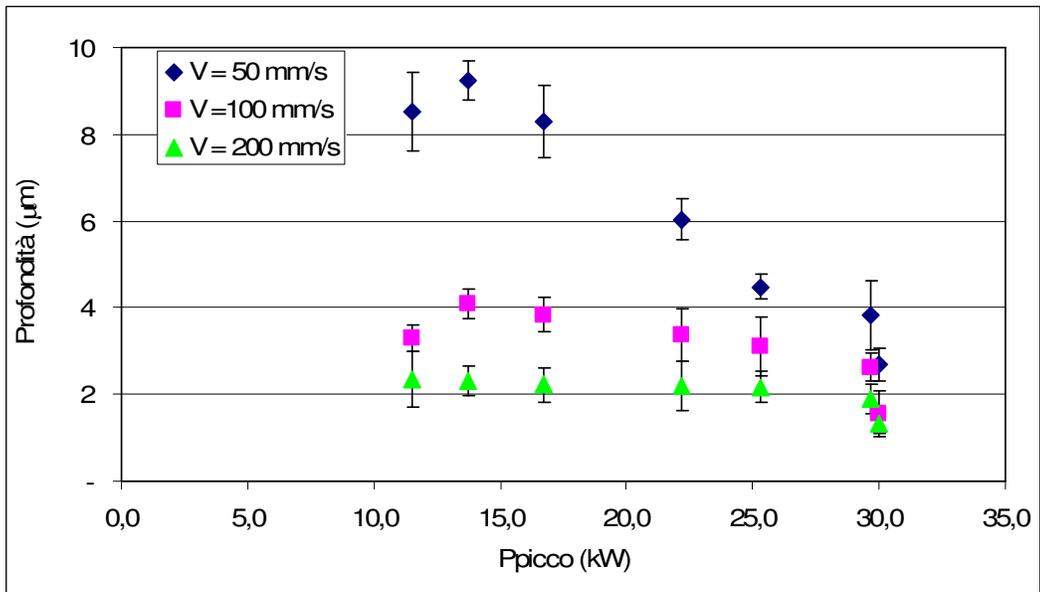


Figura IV.22 – Andamento della profondità del solco al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 304.

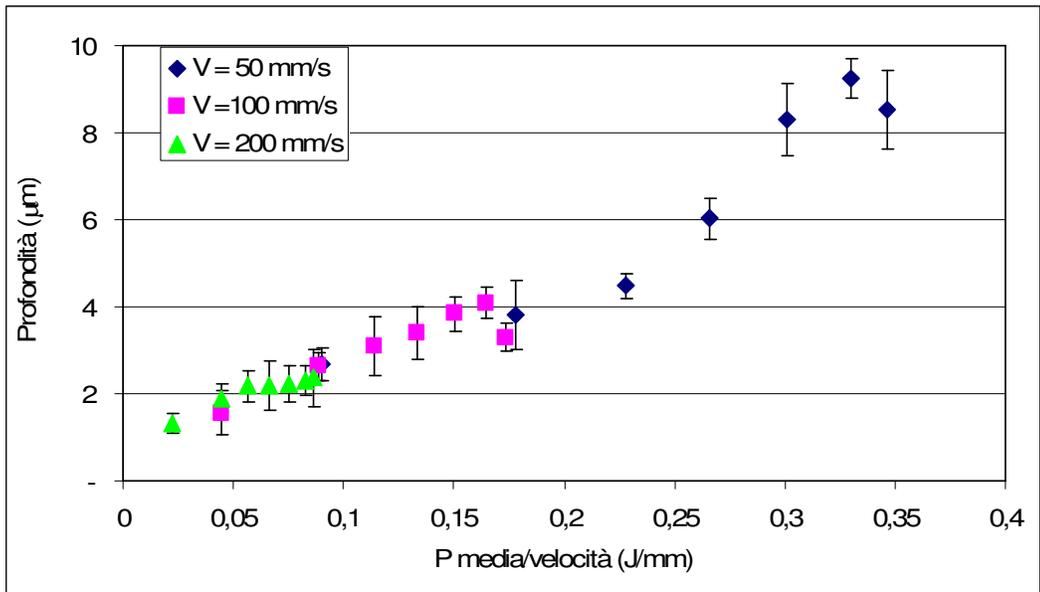


Figura IV.23 – Andamento della profondità del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 304.

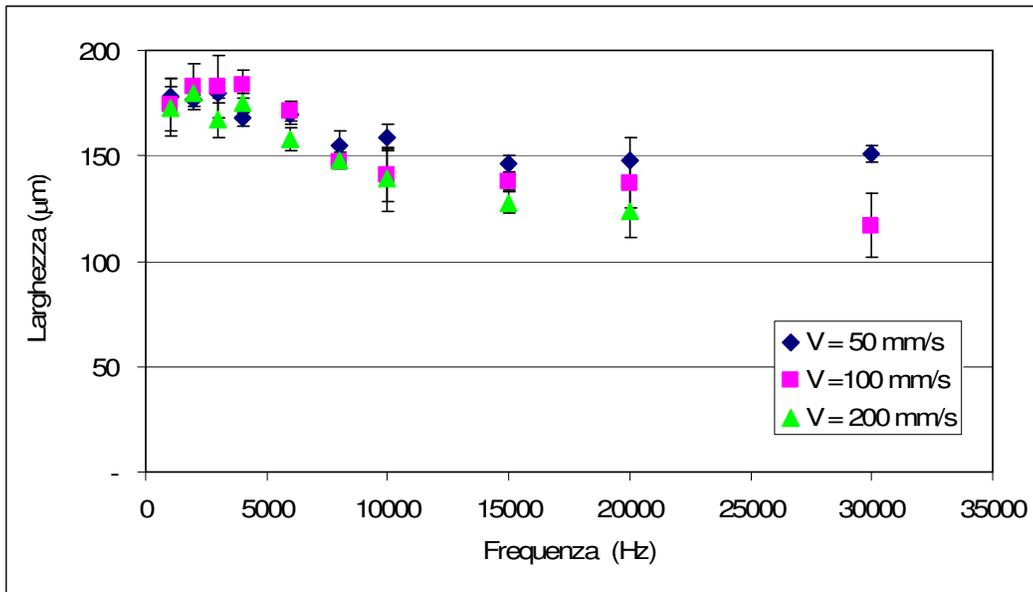


Figura IV.24 – Andamento della larghezza del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 304.

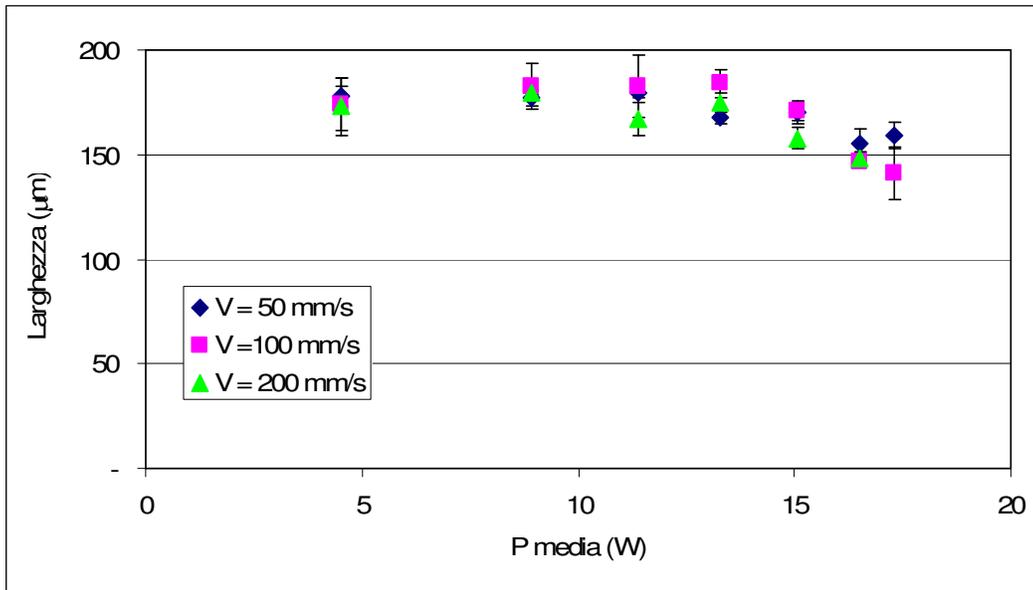


Figura IV.25 – Andamento della larghezza del solco al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 304.

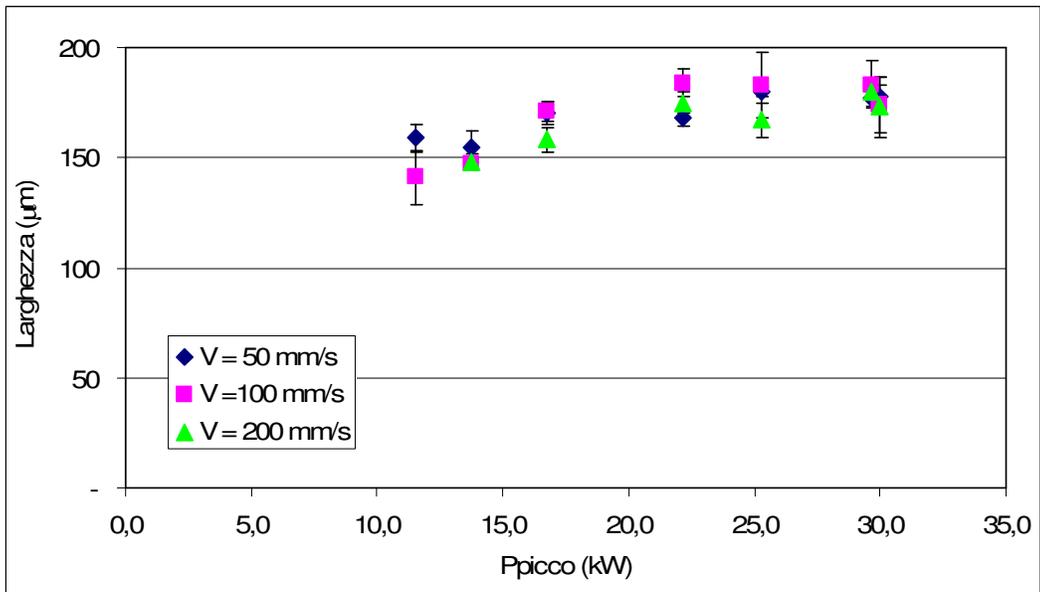


Figura IV.26 – Andamento della larghezza del solco al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 304.

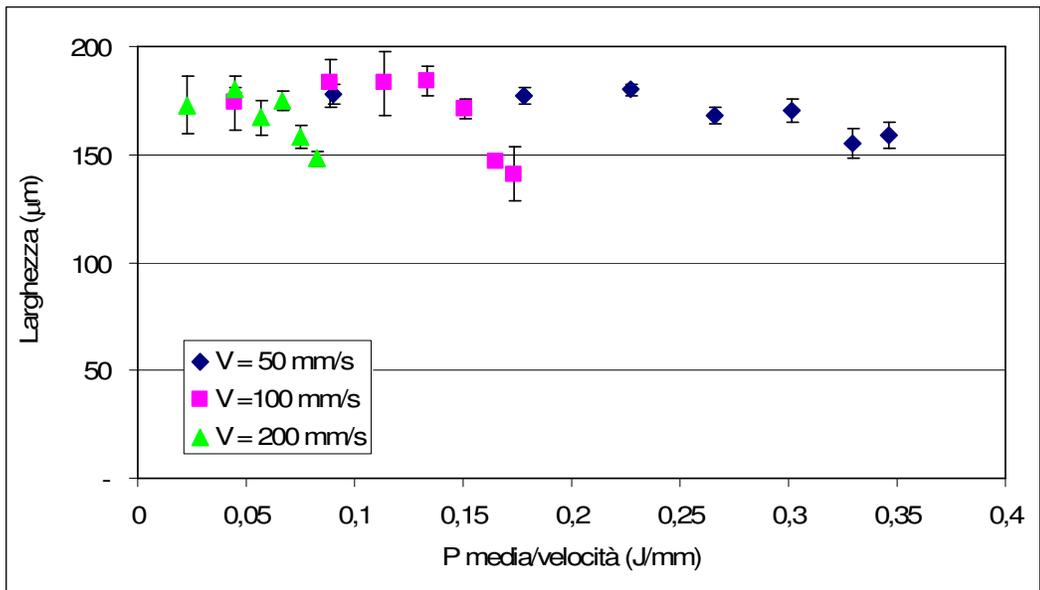


Figura IV.27 – Andamento della larghezza del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 304.

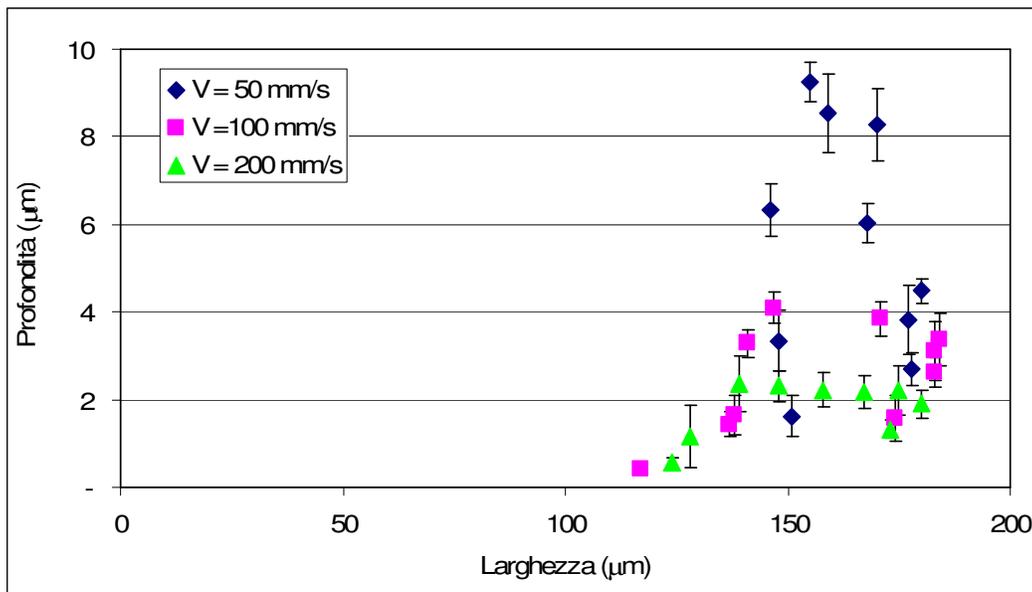


Figura IV.28 – Andamento della profondità al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 304.

Riportiamo alcuni diagrammi per valutare l’influenza dell’intensità di corrente di alimentazione dei diodi.

La figura IV.29 mostra come varia la profondità al variare della frequenza per una fissata velocità di lavorazione, ossia 50 mm/s, e per due diversi valori di intensità di corrente, 35 A e 45 A. Le curve presentano lo stesso andamento spostandosi però verso l’alto all’aumentare della corrente, quindi a parità delle altre condizioni correnti maggiori danno luogo a profondità maggiori.

In figura IV.30 si riporta l’andamento della profondità al variare del rapporto “potenza media/velocità” per i tre valori di corrente. Dal diagramma si evince che le tre curve hanno lo stesso andamento e tendono a spostarsi verso destra all’aumentare della corrente di alimentazione. Inoltre notiamo che i picchi raggiunti da tali curve aumentano con la corrente.

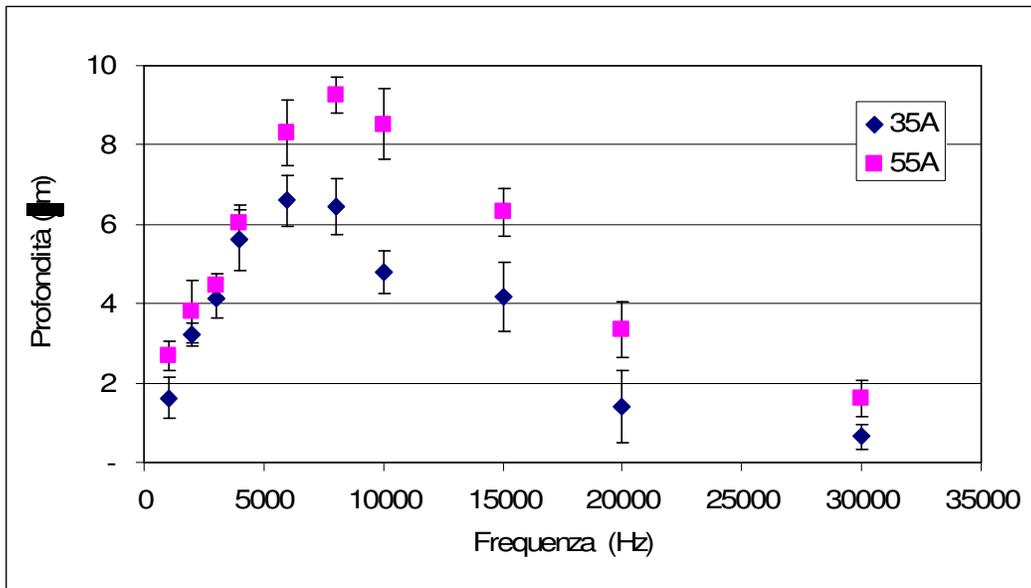


Figura IV.29 – Andamento della profondità del solco al variare della frequenza per tre valori di amperaggio, con velocità pari a 50mm/s, su acciaio AISI 304.

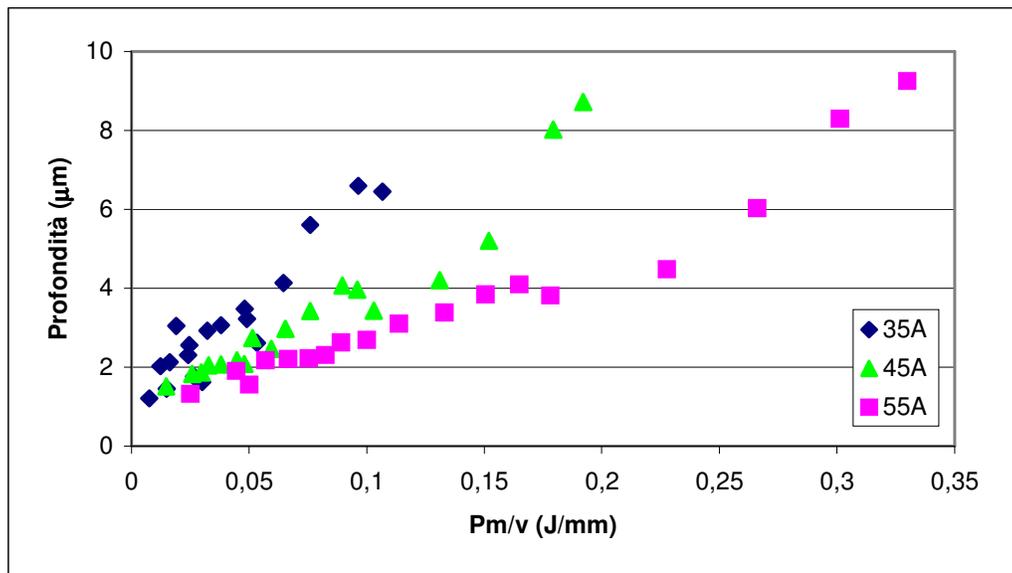


Figura IV.30 – Andamento della profondità del solco al variare del rapporto Pm/v per tre valori di amperaggio su acciaio AISI 304.

### IV.3 Prove su Acciaio AISI 430

#### IV.3.1 AISI 430 – 35A

In questo paragrafo verranno valutati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 430, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 35A.

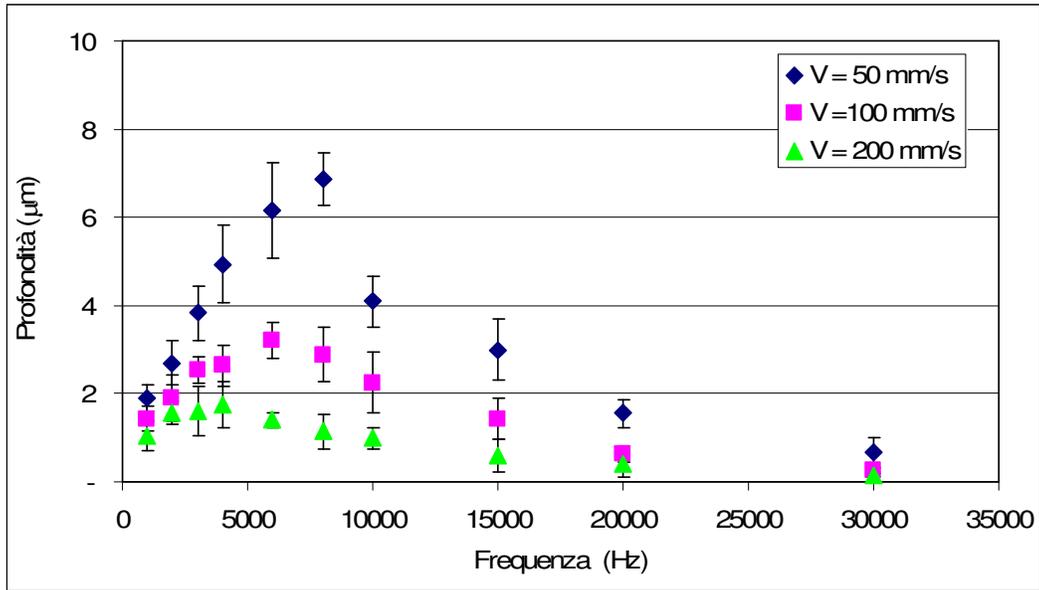


Figura IV.31 – Andamento della profondità del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

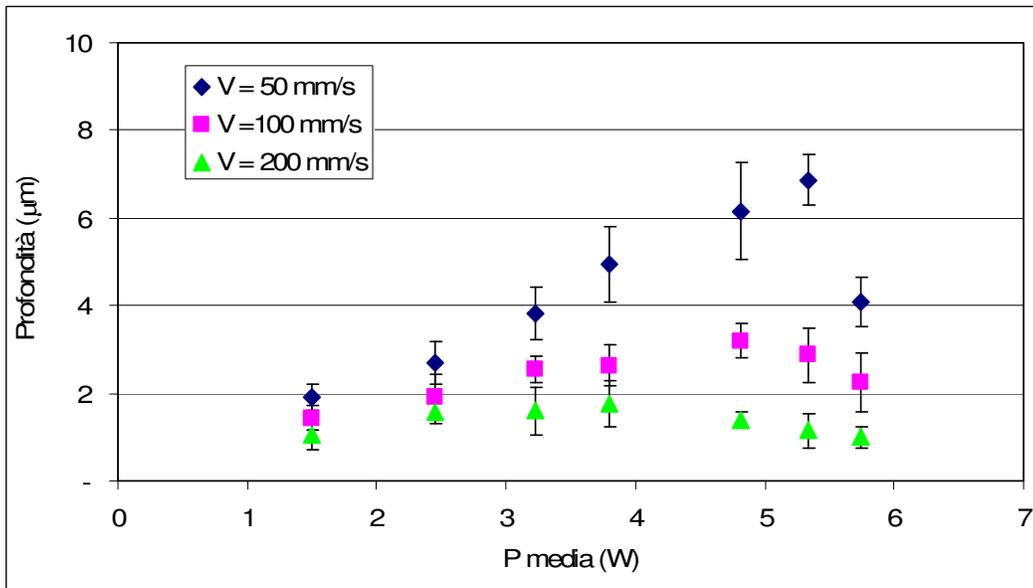


Figura IV.32 – Andamento della profondità al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

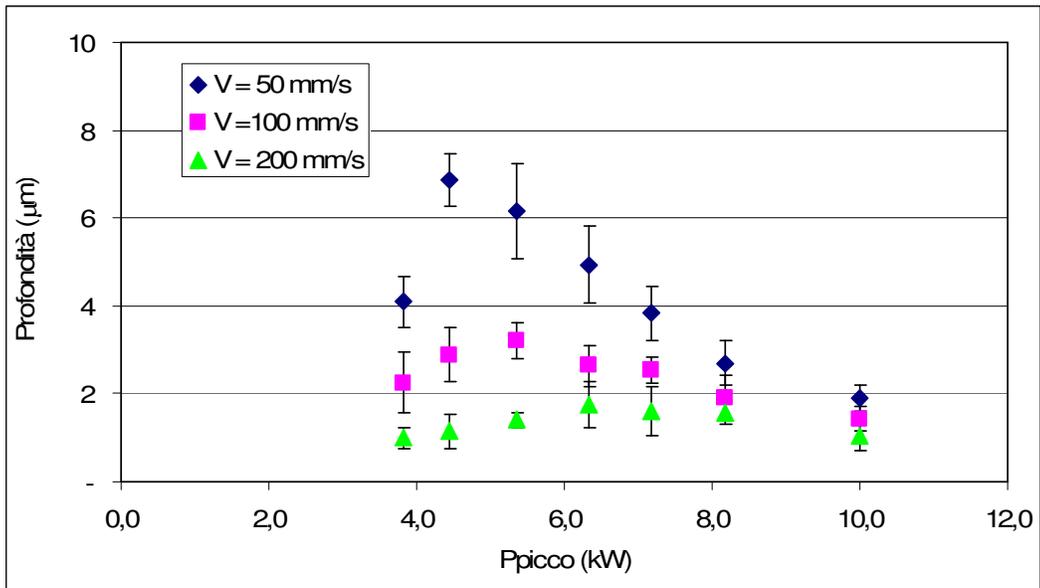


Figura IV.33 – Andamento della profondità al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

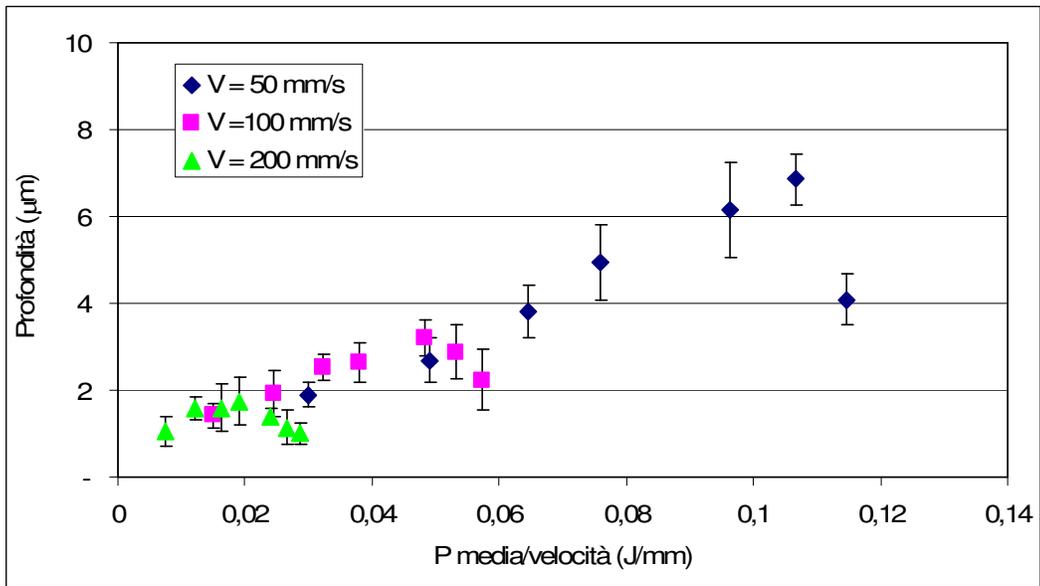


Figura IV.34 – Andamento della profondità del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

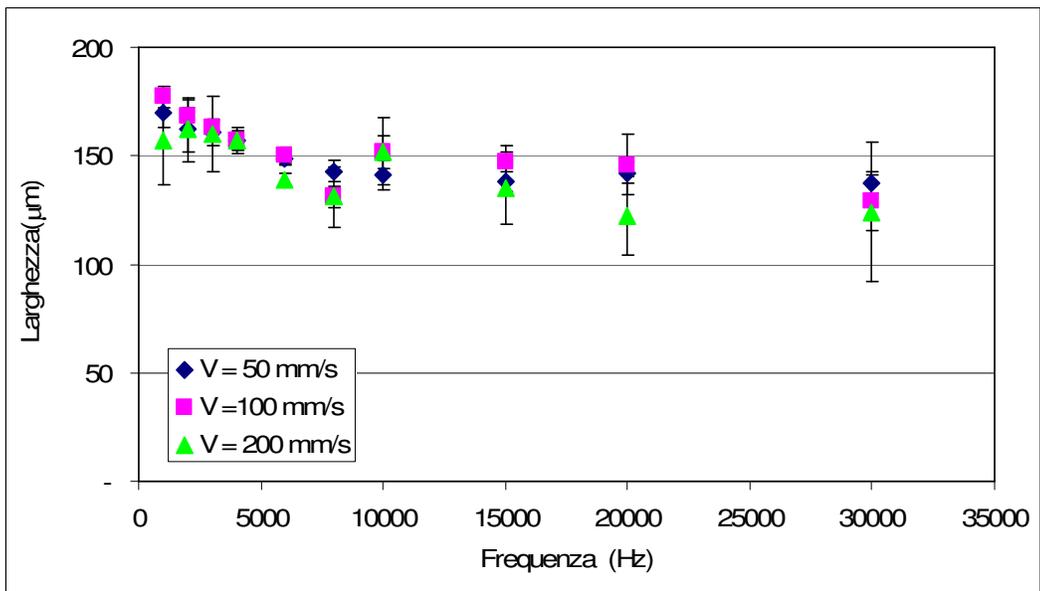


Figura IV.35 – Andamento della larghezza del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

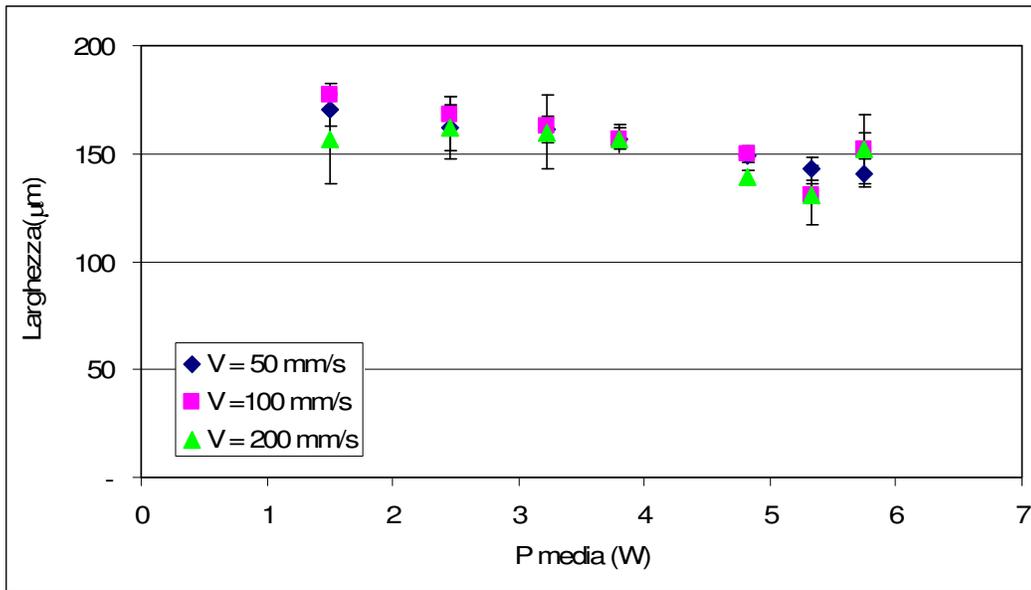


Figura IV.36 – Andamento della larghezza al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

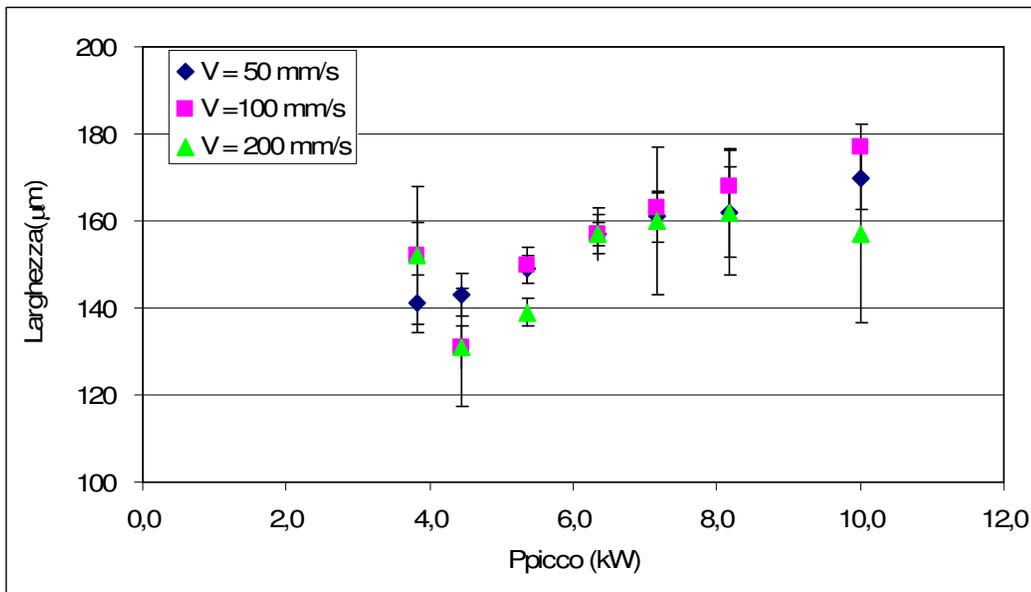


Figura IV.37 – Andamento della larghezza al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

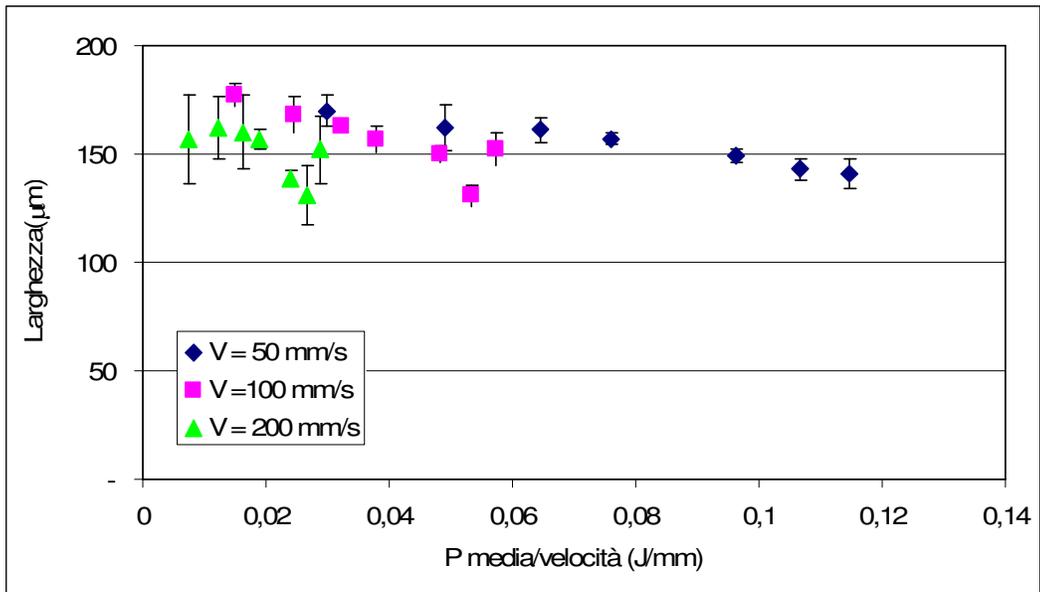


Figura IV.38 – Andamento della larghezza del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

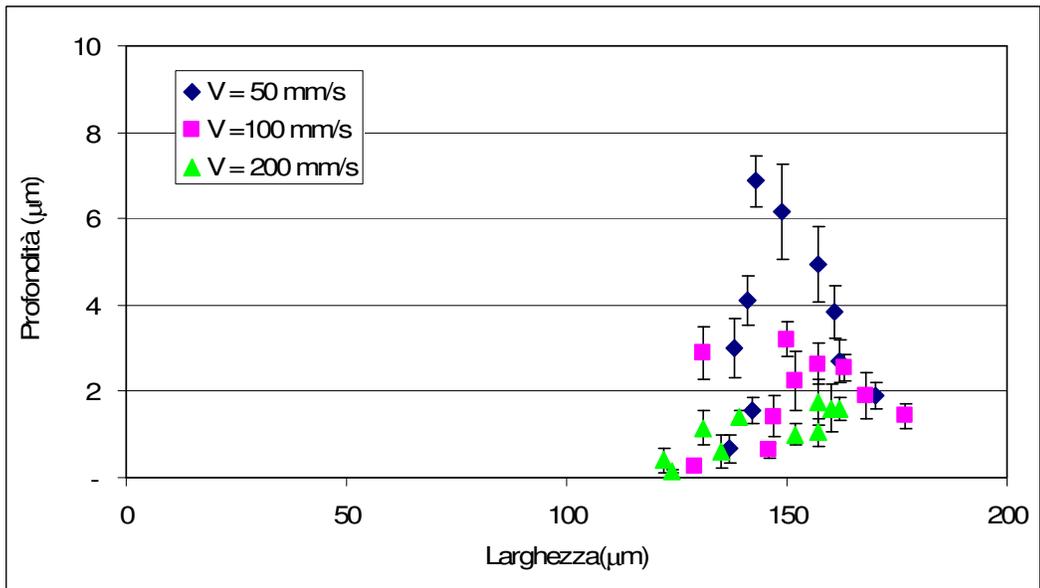


Figura IV.39 – Andamento della profondità del solco al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

### IV.3.2 AISI 430 – 45A

In questo paragrafo verranno valutati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 430, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 45 A.

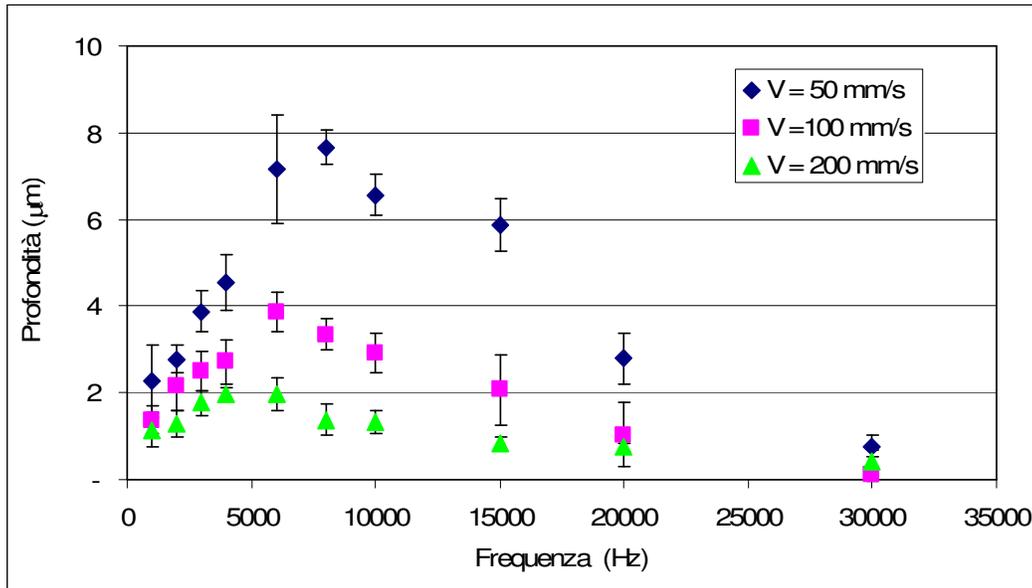


Figura IV.40 – Andamento della profondità del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 430.

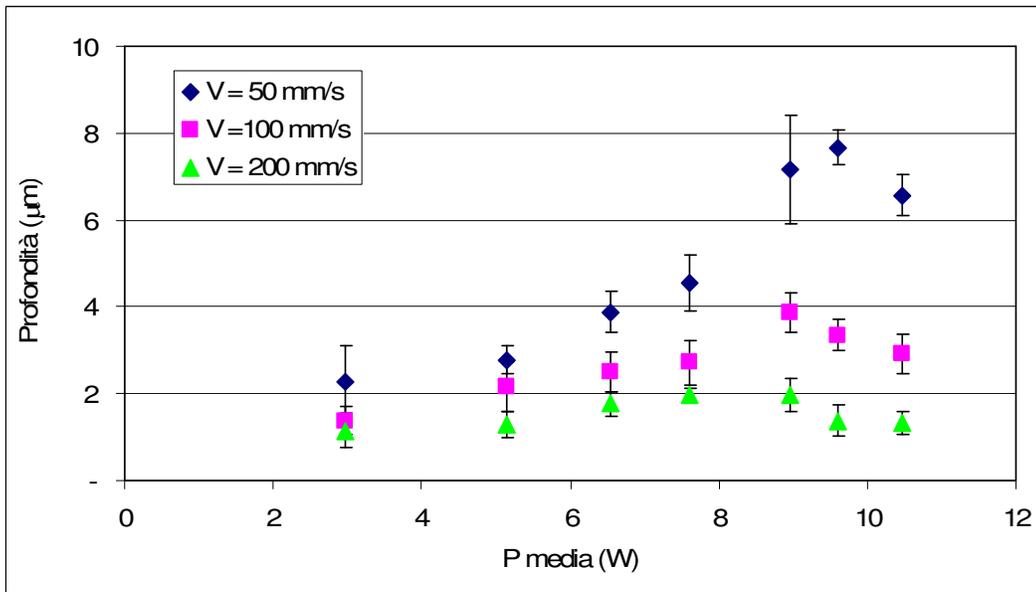


Figura IV.41 – Andamento della profondità del solco al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 430.

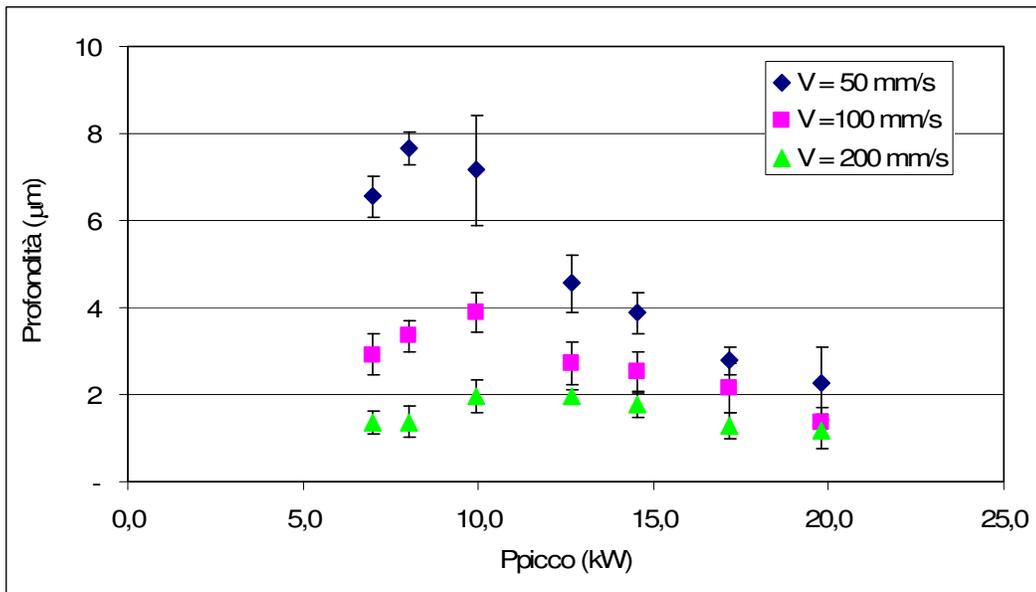


Figura IV.42 – Andamento della profondità del solco al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 430.

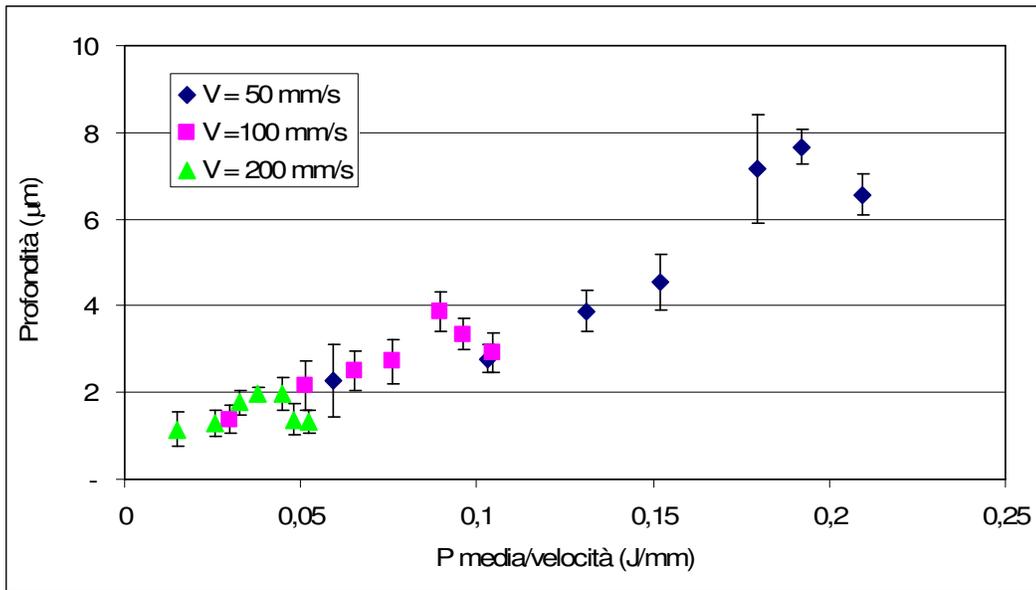


Figura IV.43 – Andamento della profondità del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 430.

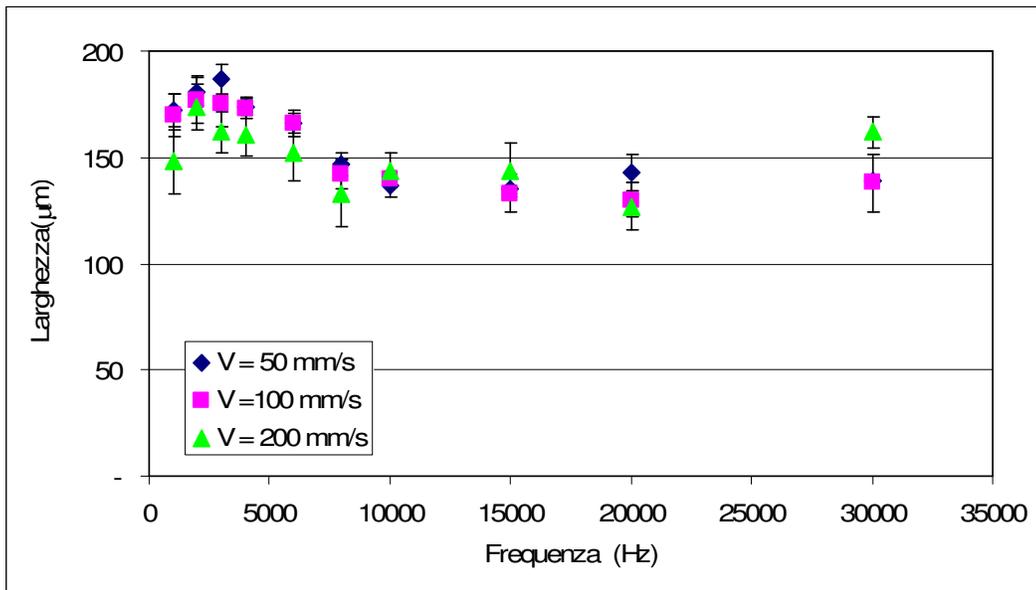


Figura IV.44 – Andamento della larghezza del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 430.

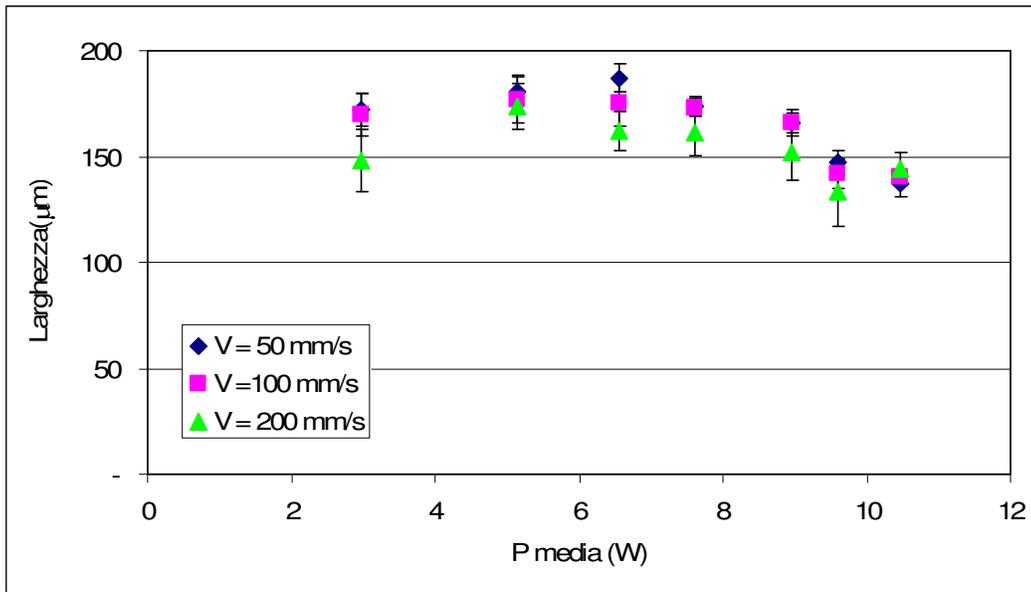


Figura IV.45 – Andamento della larghezza del solco al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 430.

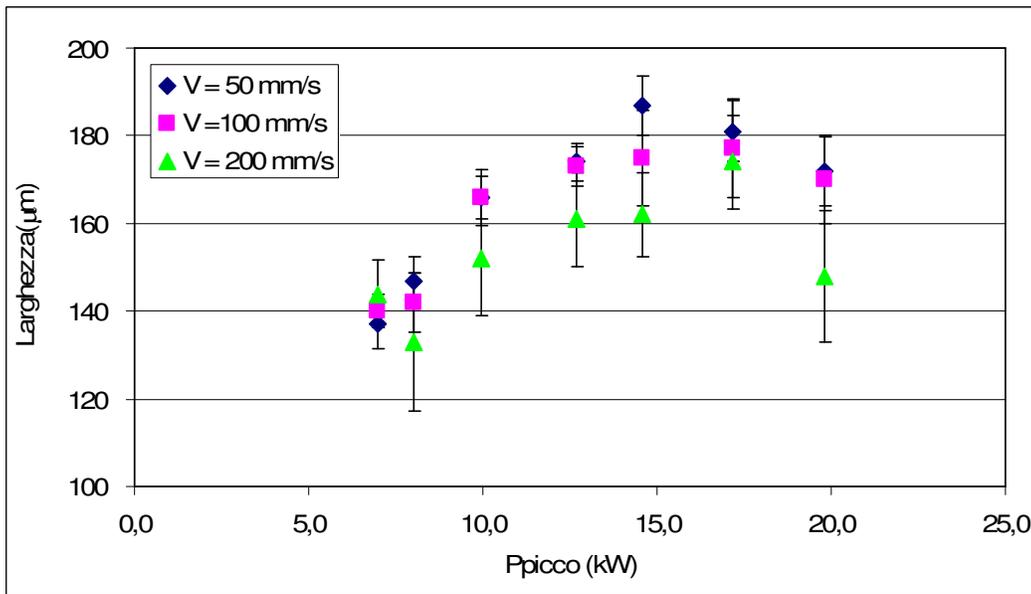


Figura IV.46 – Andamento della larghezza del solco al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 430.

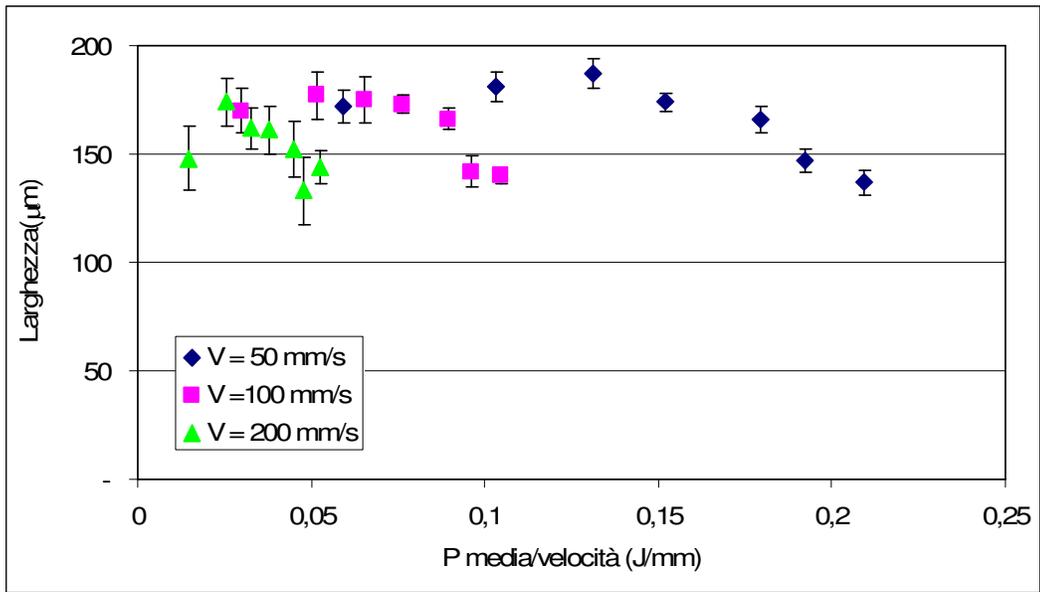


Figura IV.47 – Andamento della larghezza del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 430.

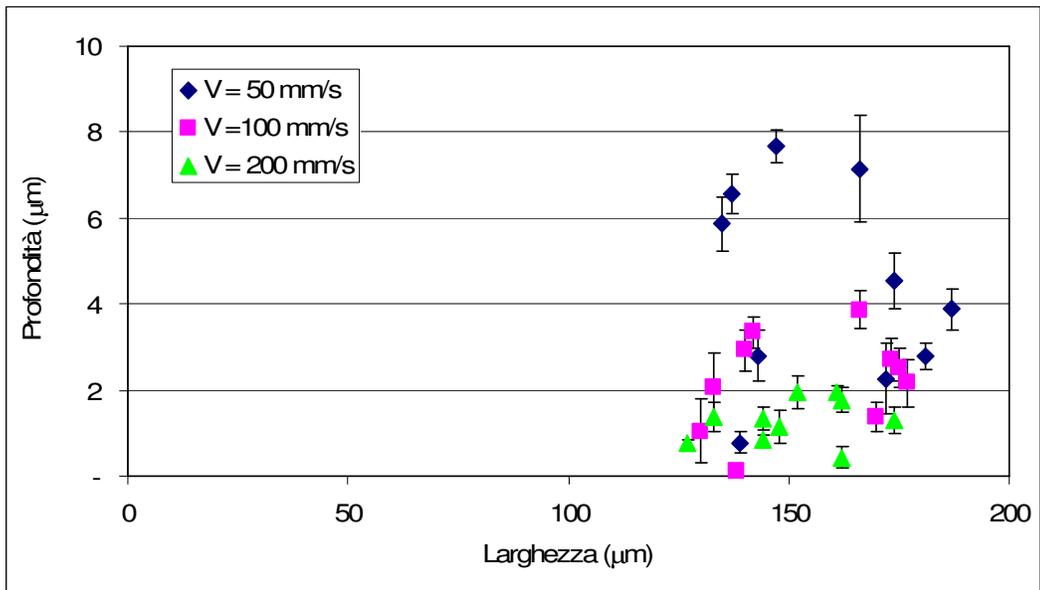


Figura IV.48 – Andamento della profondità al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 45A, su acciaio AISI 430.

### IV.3.3 AISI 430 – 55A

In questo paragrafo verranno valutati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 430, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 55 A.

I grafici riportati di seguito seguono lo stesso andamento di quelli riportati nei due paragrafi precedenti.

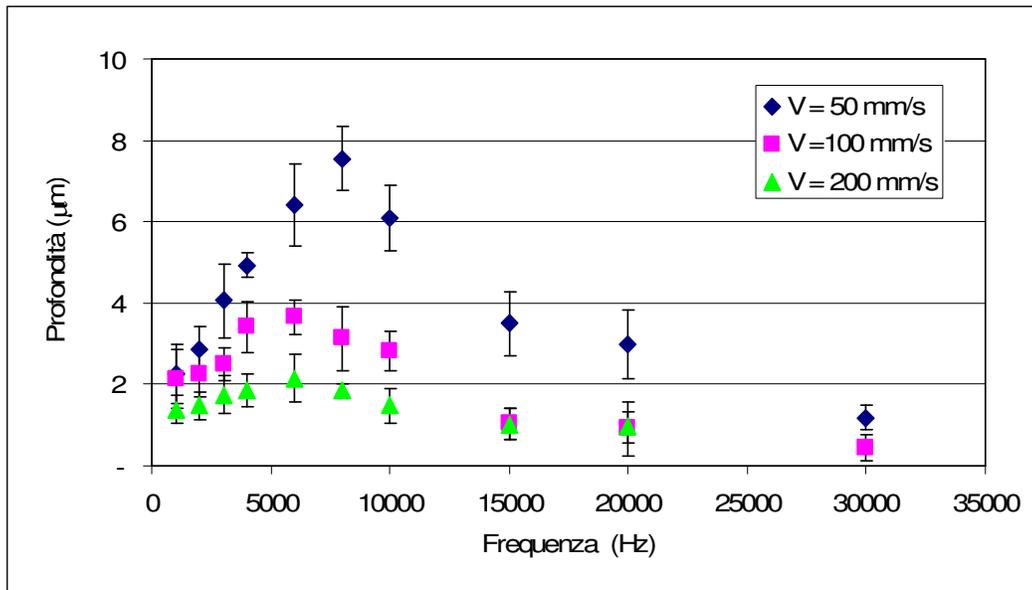


Figura IV.497 – Andamento della profondità del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 430.

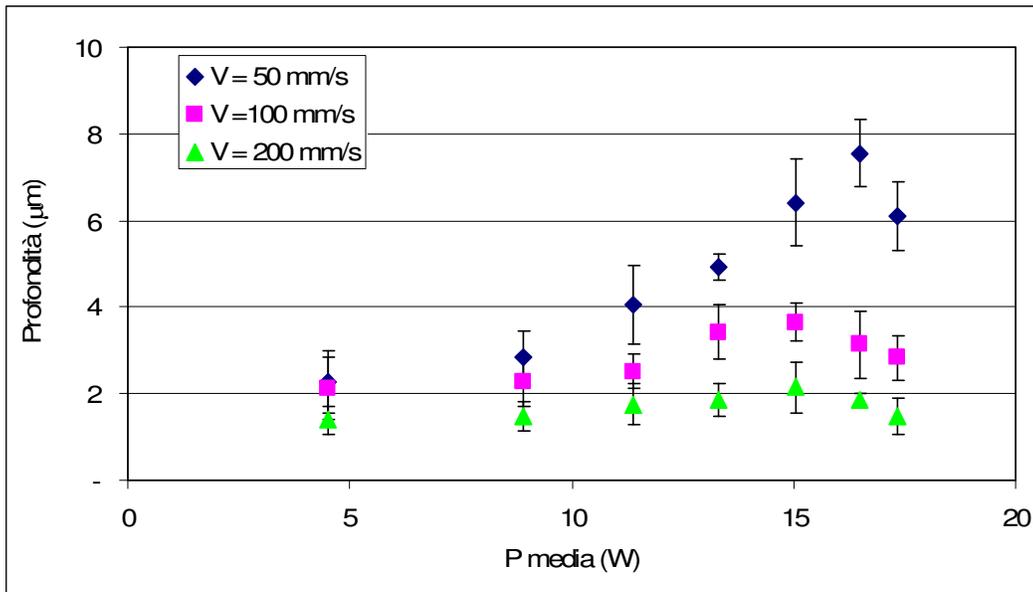


Figura IV.50 – Andamento della profondità del solco al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 430.

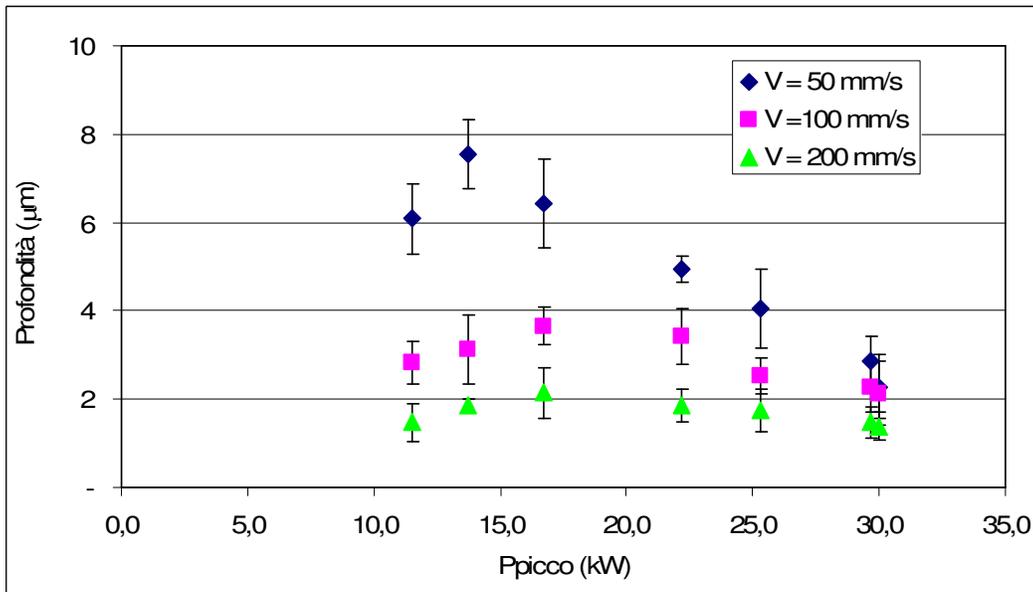


Figura IV.51 – Andamento della profondità del solco al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 430.

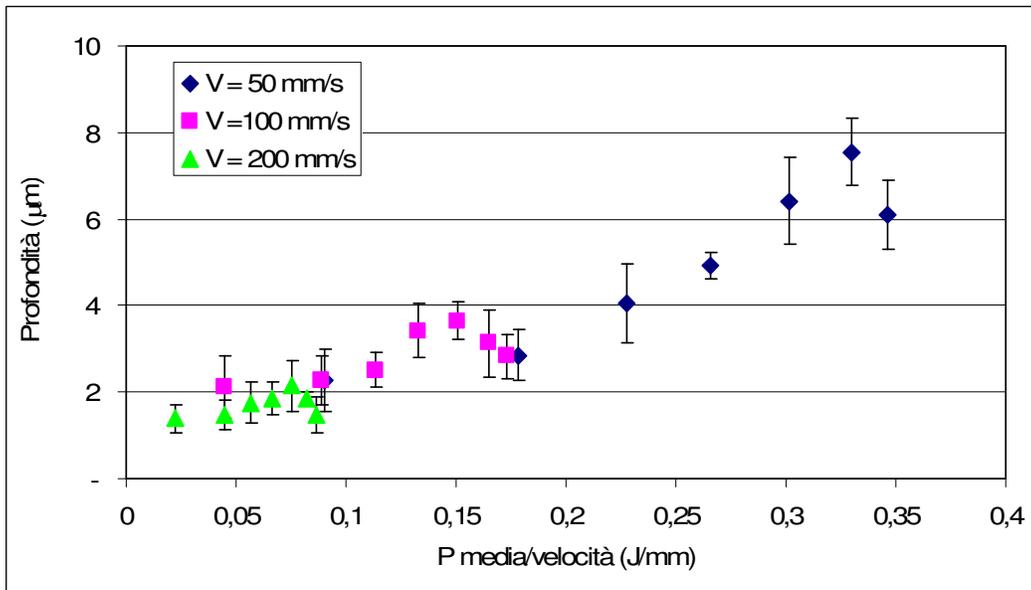


Figura IV.52 – Andamento della profondità del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 430.

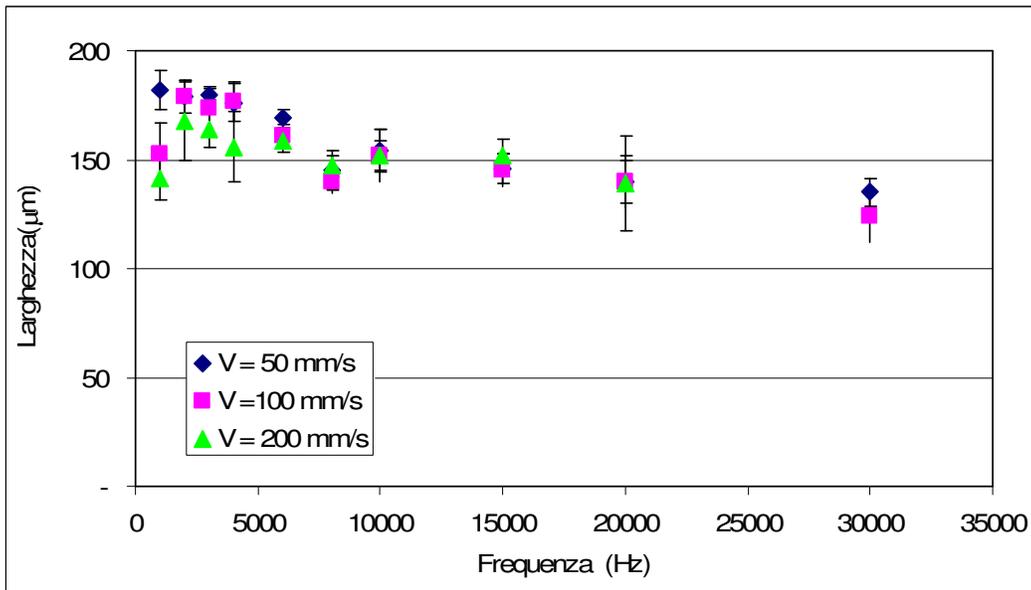


Figura IV.53 – Andamento della larghezza del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 430.

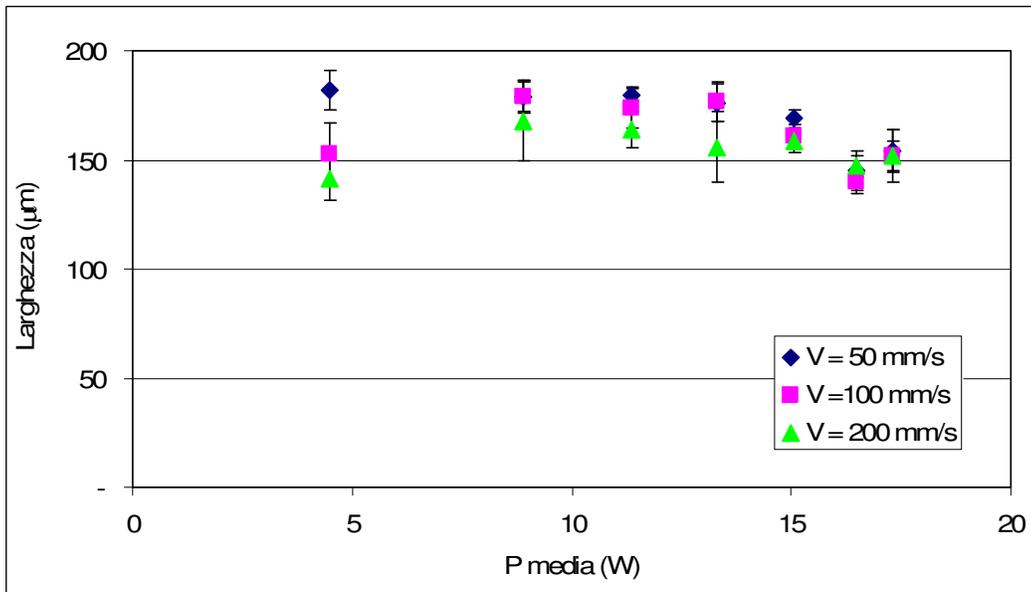


Figura IV.54 – Andamento della larghezza del solco al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 430.

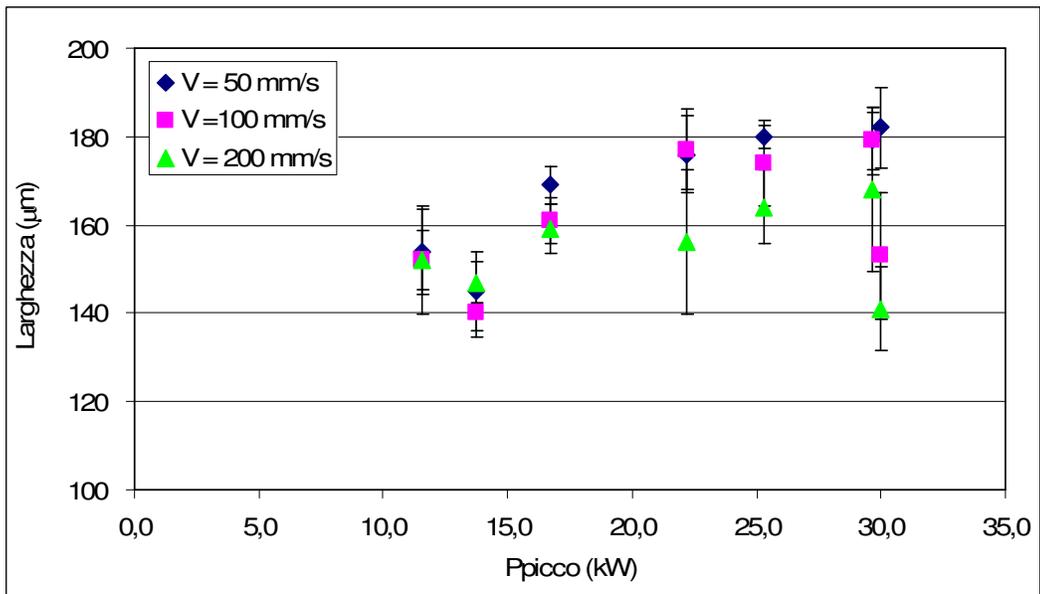


Figura IV.55 – Andamento della larghezza del solco al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 430.

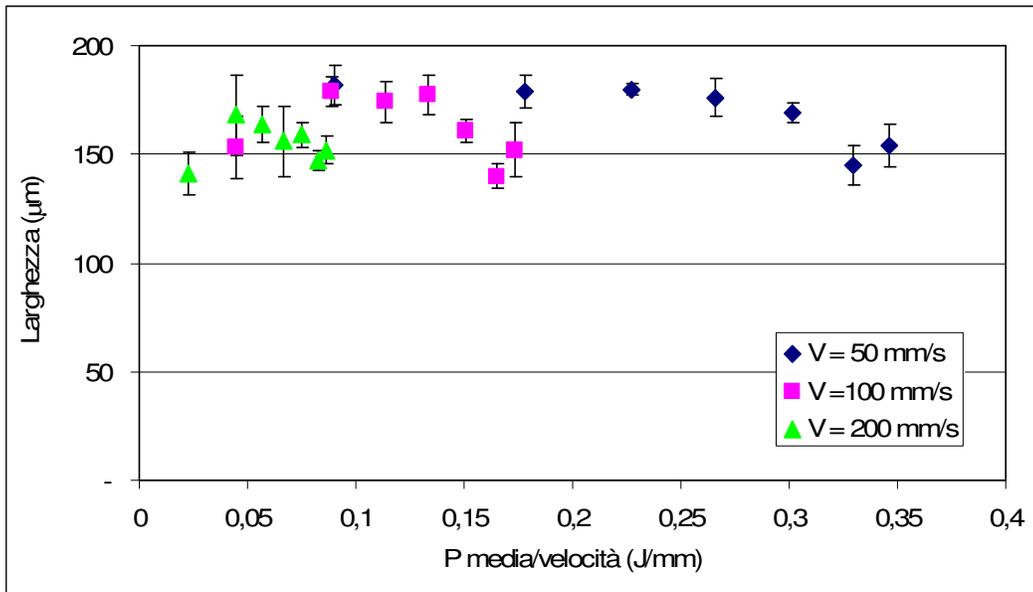


Figura IV.56 – Andamento della larghezza del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 430.

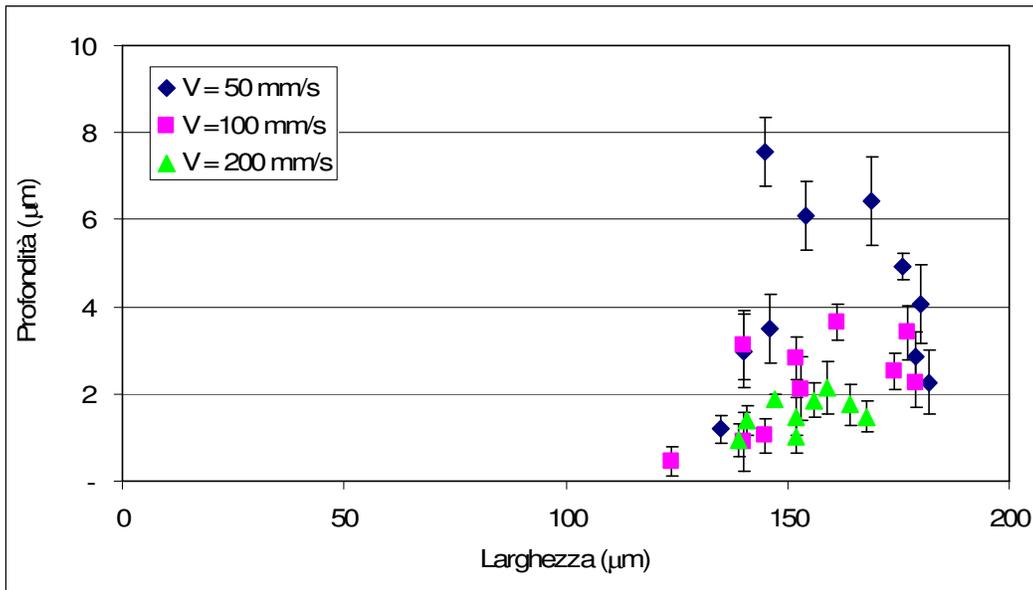


Figura IV.57 – Andamento della profondità al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 55A, su acciaio AISI 430.

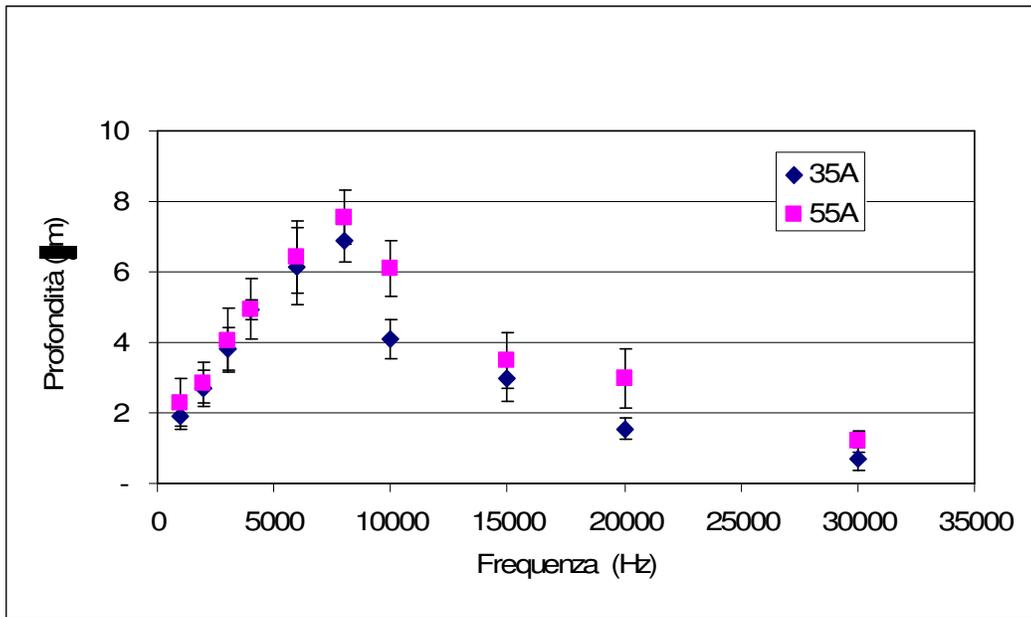


Figura IV.58 – Andamento della profondità del solco al variare della frequenza per tre valori di amperaggio, con velocità pari a 50mm/s, su acciaio AISI 430.

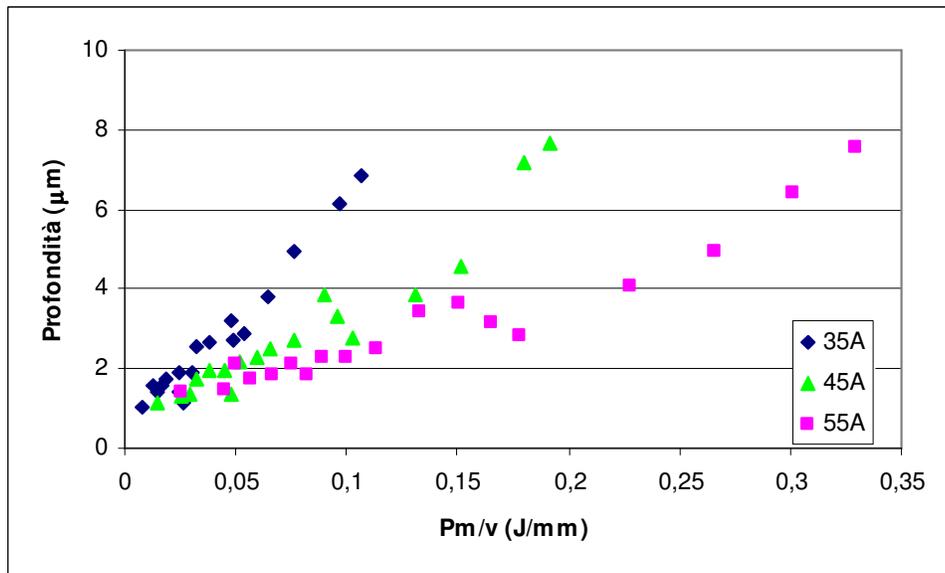


Figura IV.59 – Andamento della profondità del solco al variare del rapporto Pm/v per tre valori di amperaggio su acciaio AISI 430.

#### **IV.4 Modello teorico**

La determinazione della profondità di marcatura è complessa, in quanto durante il processo intervengono numerosi fenomeni, quali riscaldamento del materiale, fusione e vaporizzazione dello stesso accompagnati da altri, quali condensazione del vapore, trasmissione del calore (per irraggiamento e convezione). La radiazione laser incidente inoltre viene assorbita e dissipata dal materiale distrutto, principalmente dal plasma, la cui trasmittanza dipende dalla concentrazione e dalla temperatura [16] [17].

Sono stati sviluppati molti modelli per prevedere la distribuzione della temperatura nel pezzo, la geometria del solco, come pure la velocità di avanzamento e l'efficienza. I modelli vengono generalmente adoperati per analizzare gli effetti di alcuni parametri come ad esempio la potenza del laser, la durata dell'impulso,... I modelli tuttavia si discostano sempre dal processo reale, in quanto partono da alcune ipotesi e semplificazioni. Per tale motivo i dati numerici provenienti dai modelli devono essere sempre verificati con prove sperimentali.

Abbiamo quindi preso in considerazione vari modelli trovati in letteratura per poter scegliere quello che meglio si adattava al caso della marcatura laser; successivamente si è provveduto alla verifica dei dati sperimentali con quelli teorici.

Nella marcatura il raggio laser non attraversa completamente il materiale da lavorare. Il processo mostra caratteristiche complicate, come ad esempio la trasmissione del calore in tre dimensioni, due fasi del materiale, la sorgente di

calore distribuita nello spazio,... Una analisi numerica è stata fatta assumendo l'immediata vaporizzazione del materiale solido dovuta alla radiazione laser [18]. Un modello che separa il processo in differenti regioni è stato suggerito in [19]. Risultati sperimentali su marcature laser sono riportate in [20], su materiali metallici e ceramici.

Un approccio analitico alla relazione tra la profondità del solco e i parametri del processo è stato mostrato in [21]. Siccome il fronte d'avanzamento presenta una forma tridimensionale complicata ed è difficile da risolvere analiticamente, in questo approccio si assume che tale fronte possa essere suddiviso in un insieme di elementi di controllo infinitesimali (fig. IV.60).

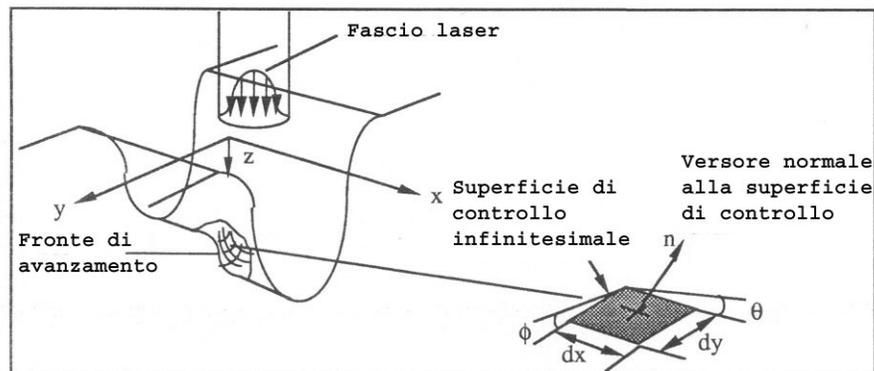


Figura IV.60– Superficie di controllo per il modello teorico di marcatura laser [22]

L'energia viene somministrata al volume di controllo attraverso il raggio laser e viene dissipata attraverso l'ablazione del materiale e la conduzione del calore. Numerose ipotesi sono state fatte in questo modello:

- l'interazione laser-materia porta alla rimozione del materiale alla temperatura di vaporizzazione; il materiale fuso non influenza l'interazione laser-materia;
- la conduzione termica avviene in direzione ortogonale alla superficie del solco; il processo viene considerato perfettamente adiabatico: vengono trascurate le perdite di calore per irraggiamento e convezione;
- il raggio laser ha una distribuzione di intensità di tipo Gaussiano:

$$J = \frac{P}{\pi R^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{R^2}}$$

dove P è la potenza del fascio laser.

Le lavorazioni laser coinvolgono processi di trasmissione del calore a tre dimensioni; tuttavia nel caso del taglio e della marcatura si può semplificare il modello: la superficie inferiore del pezzo da lavorare si può considerare come una parete adiabatica, in tal modo la trasmissione del calore avviene in due dimensioni.

La figura (IV.60) mostra schematicamente il processo di marcatura laser. Consideriamo una superficie infinitesima di controllo sul fronte di lavorazione come in figura. La superficie è inclinata di un angolo  $\vartheta$  con l'asse  $x$  e di un angolo  $\phi$  con l'asse  $y$  ed è esposto ad un raggio laser di intensità  $J(x,y)$ . Il sistema di riferimento cartesiano è solidale al raggio laser che si muove sulla superficie alla velocità  $v$ .

Dalle assunzioni precedenti, la relazione per la profondità del solco può essere derivata da un bilancio energetico sul volume di controllo[22]:

$$Q = Q_L + Q_S \quad (IV.1)$$

dove  $Q$  rappresenta l'energia laser assorbita dal materiale,  $Q_L$  il calore latente di fusione ed infine  $Q_S$  il calore sensibile.

$$aJ_0 e^{-(x^2+y^2)/R^2} dx dy = \rho L dx dy \tan \Theta - k \left( \frac{dT}{dn} \right)_{n=0} dx dy (1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \Phi)^{1/2}$$

dove  $a$  è il coefficiente di assorbimento del materiale da marcare,  $J_0$  l'intensità di picco,  $\rho$  la densità,  $L$  il calore latente di fusione,  $k$  è la conduttività termica. In questa equazione il primo termine rappresenta l'energia assorbita  $Q$  dal materiale da lavorare, mentre il secondo rappresenta l'energia interna, suddivisa in energia latente (legata ai cambiamenti di fase,  $Q_L$ ) e sensibile (legata all'aumento di temperatura,  $Q_S$ ).

Da tale equazione è possibile ricavare la profondità del solco:

$$s = \frac{aP\pi^{1/2}R}{\pi R^2 \rho v (c_p(T_s - T_0) + L)} = \frac{2aP}{\pi^{1/2} \rho v d (c_p(T_s - T_0) + L)} \quad (IV.2)$$

dove:  $P$  è la potenza del fascio laser,  $a$  il coefficiente di assorbimento del materiale,  $\rho$  la densità,  $v$  la velocità di avanzamento,  $d$  il diametro dello spot del raggio laser,  $c_p$  il calore specifico,  $T_s$  la temperatura superficiale (si può assumere pari alla temperatura di fusione del materiale),  $T_0$  è la temperatura del materiale in un punto lontano dalla lavorazione (si può assumere pari alla temperatura iniziale) e  $L$  è il calore latente di fusione del materiale.

La profondità di marcatura risulta allora proporzionale al termine  $P/vd$ , che rappresenta l'energia somministrata per unità di area. Inoltre la profondità, a parità di potenza, risulta essere inferiore per i materiali con elevate temperature di fusione ed alti calori latenti di fusione.

#### **IV.4.1 Validità del modello teorico**

La validità del presente modello, come in precedenza accennato, deve essere verificata con i risultati sperimentali, i quali sono stati esposti, per mezzo di grafici, nei paragrafi precedenti.

Questa operazione è stata condotta riportando su un diagramma i valori della profondità calcolata con la formula (IV.2) in funzione della profondità misurata sperimentalmente (fig. IV.61).

Dalla figura IV.61 si evince che il modello teorico non si adatta bene ai casi sperimentali; ciò trova una giustificazione nelle approssimazioni introdotte dal modello: secondo il modello preso in esame la distribuzione della densità di potenza è di tipo gaussiano ( $M^2=1$ ); in realtà non conosciamo l'effettiva distribuzione spaziale della densità di potenza dell'attrezzatura utilizzata, in quanto è noto solo, dai dati forniti dal costruttore, che la sorgente laser opera in regime multimodo ( $M^2>1$ ); d'altra parte variando la tensione di alimentazione dei diodi (35 A, 45 A, 55 A) è ipotizzabile un cambiamento del regime di funzionamento dell'apparecchiatura utilizzata, in quanto, osservando l'andamento dei dati sperimentali, si evidenzia un diverso comportamento in funzione della corrente di alimentazione dei diodi (figg.IV.30 e IV.59).

Inoltre non si può affermare, come si suppone nel modello, l'assenza di materiale fuso. Si rende allora necessaria la formulazione di un nuovo modello basato su i valori sperimentali e che possa tener conto dei parametri controllabili dal software della macchina, quali velocità di marcatura, frequenza e intensità di corrente dei diodi.

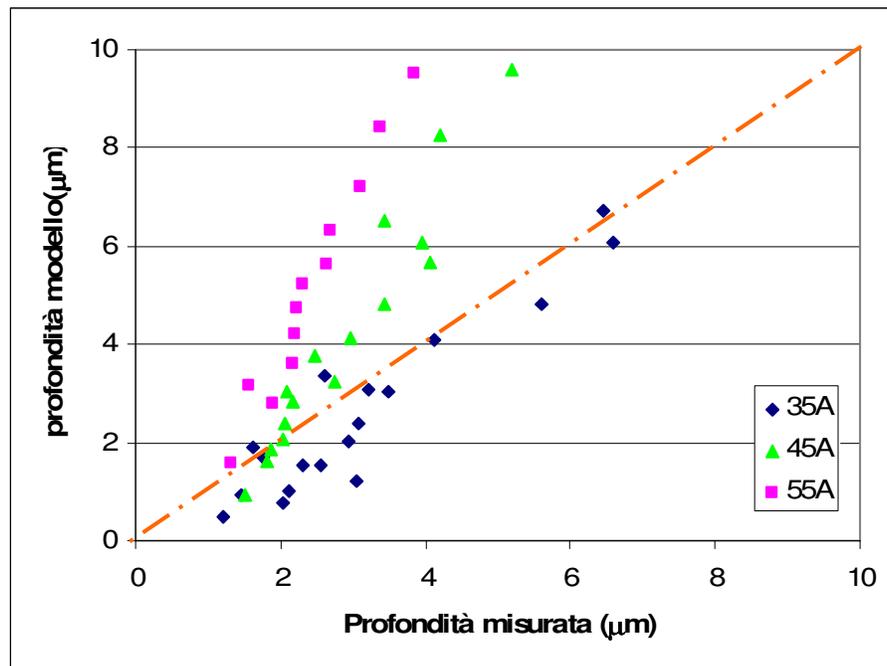


Figura IV.61 – Andamento della profondità del solco calcolata con la formula del modello teorico al variare della profondità misurata sperimentalmente, su acciaio AISI 304.

#### IV.5 Modello empirico

Nel modello precedentemente descritto la profondità di marcatura risulta proporzionale al termine  $P/v$ ; tale proporzionalità si evince anche dai grafici precedentemente riportati, escludendo i punti che competono ai valori di una frequenza di 10.000Hz (figg. IV.4, IV.14 e IV.23 per l'AISI 304 e figg. IV.34, IV.43 e IV.52 per l'AISI 430). Ricordiamo, infatti, che già dall'analisi al microscopio tali valori di frequenza, e quelli ad essa superiore, comportavano variazioni nella geometria del solco; per tali motivi nel modello che ora andiamo a formulare escluderemo i valori di profondità ottenuti in corrispondenza di tali frequenze. Nella figura IV.62 sono riportati gli andamenti della profondità del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per i tre valori di amperaggio

nel caso dell'acciaio AISI 304. Sono riportate inoltre le linee di minima dispersione dei punti del diagramma e le relative equazioni. Si può notare che tali curve sono tutte di uno stesso tipo e si presentano nella forma:

$$profondità = a * e^{b*(P_m/v)} \quad (IV.3)$$

dove  $P_m$  rappresenta la potenza media e  $v$  la velocità di lavorazione.

E' possibile allora esprimere i coefficienti  $a$  e  $b$  in funzione dell'intensità di corrente, in quanto le tre curve si differenziano per il valore di corrente utilizzata. Parametrizzando i coefficienti  $a$  e  $b$  in funzione della corrente si ha la figura IV.63 e da questa si osserva che i parametri possono essere espressi mediante le seguenti formule:

$$a = -0,0002i^2 + 0,0113i + 1,2863$$

$$b = 0,0129i^2 - 1,6313i + 56,472$$

con  $i$  l'intensità di corrente.

Sostituendo le espressioni così trovate dei coefficienti  $a$  e  $b$  nella formula (IV.3), è possibile ottenere un modello empirico che tiene conto della dipendenza della profondità di marcatura dalla potenza media, dalla velocità e dall'intensità di corrente:

$$profondità = (-0,0002i^2 + 0,0113i + 1,2863) * e^{(0,0129i^2 - 1,6313i + 56,472)*(P_m/v)} \quad (IV.4)$$

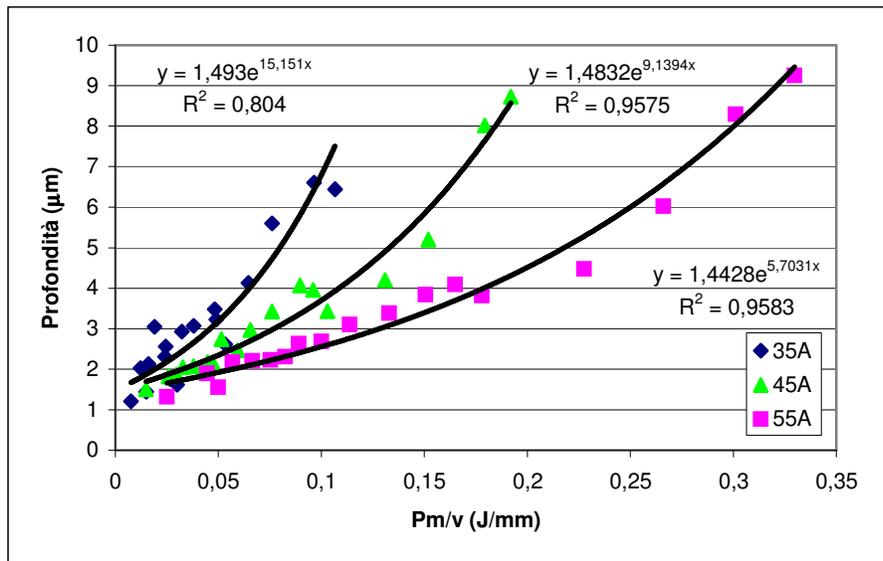
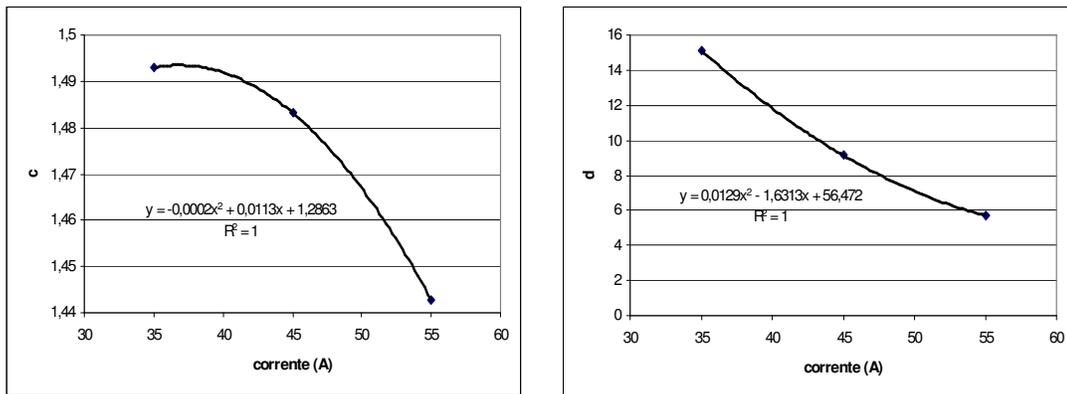


Figura IV.62 – Andamento della profondità del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di amperaggio, su acciaio AISI 304.



a) andamento di 'a' in funzione della corrente      b) andamento di 'b' in funzione della corrente

Figura IV.63 – Andamento dei coefficienti 'a' e 'b' al variare della corrente dei diodi per acciaio AISI 304.

Assegnando i tre valori dell'intensità  $i$  di corrente utilizzati nelle prove è possibile verificare la validità del modello, creando un diagramma che riporti la profondità così calcolata in funzione di quella misurata sperimentalmente (fig. IV.64).

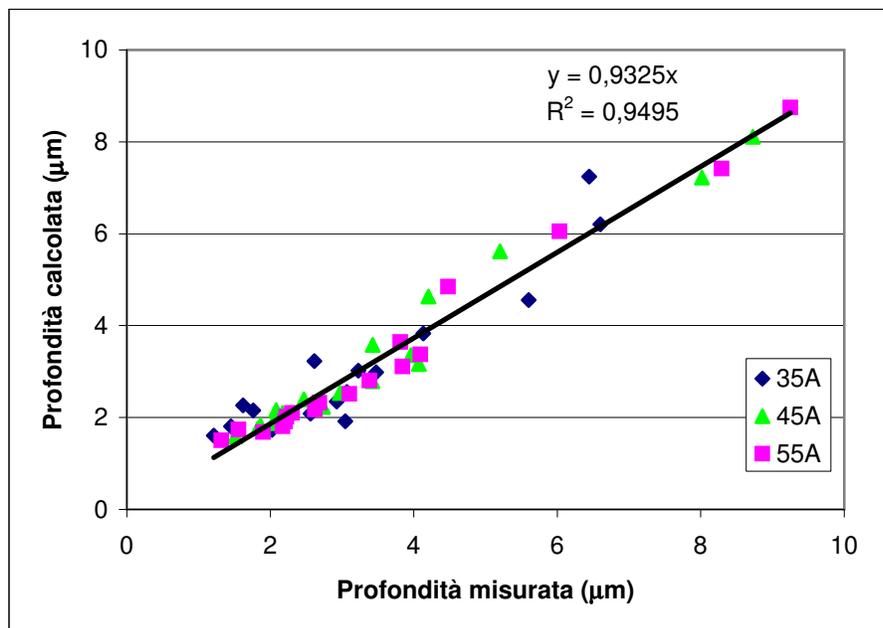


Figura IV.64– Andamento della profondità del solco calcolata con la formula (IV.4) al variare della profondità misurata sperimentalmente, su acciaio AISI 304.

Dall'analisi di quest'ultima appare evidente la buona corrispondenza tra i valori sperimentali e quelli calcolati con la formula (IV.4).

E' da tener presente, però, che la formula fin qui trovata non ci permette di prevedere la profondità di marcatura in funzione dei parametri impostabili dal software della macchina (corrente, frequenza, velocità), in quanto è ancora presente la potenza media. Per ottenere il diagramma di figura IV.64 sono stati utilizzati, infatti, i valori di potenza media ricavati sperimentalmente (vedi il diagramma di fig. III.11). A questo punto è opportuno trovare un'espressione che ben approssimi l'andamento della potenza media del laser in funzione dell'intensità di corrente e della frequenza. Tale equazione, come è possibile vedere dalla figura IV.65, è del tipo:

$$P_m = c * \ln(f) - d \quad (IV.5)$$

dove  $f$  rappresenta la frequenza di ripetizione degli impulsi e i coefficienti  $c$  e  $d$  possono essere espressi in funzione dell'intensità di corrente, in particolare si presentano nella forma:

$$c = 0,1636i - 3,9472$$

$$d = -0,9117i + 20,679$$

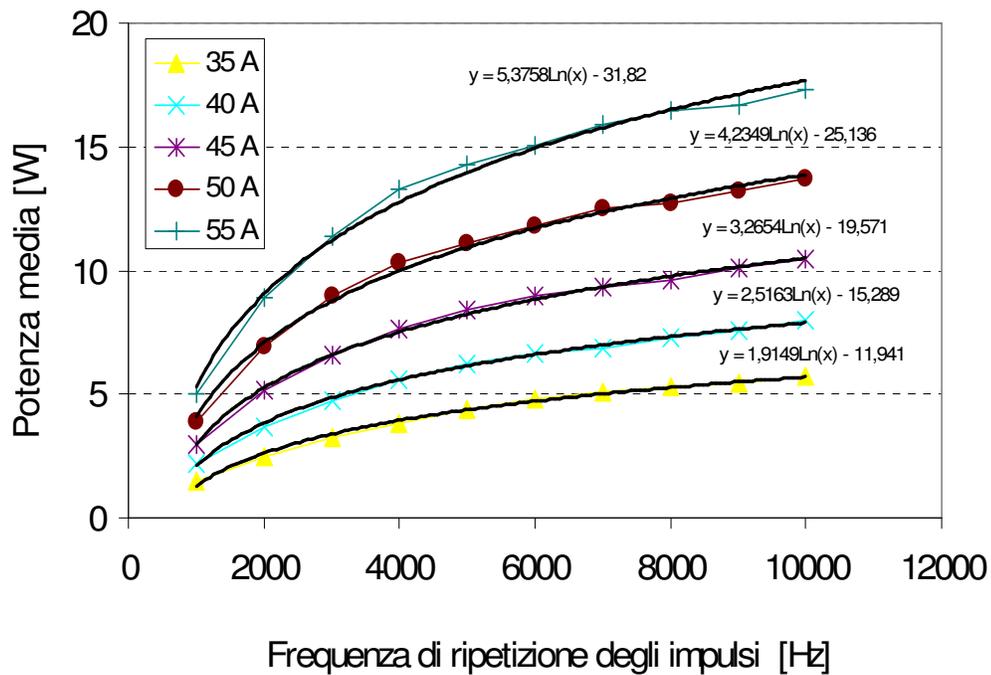
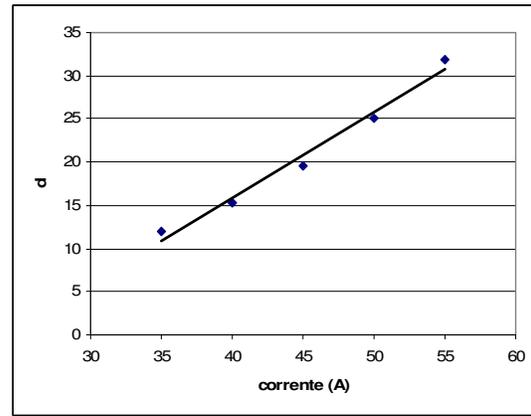
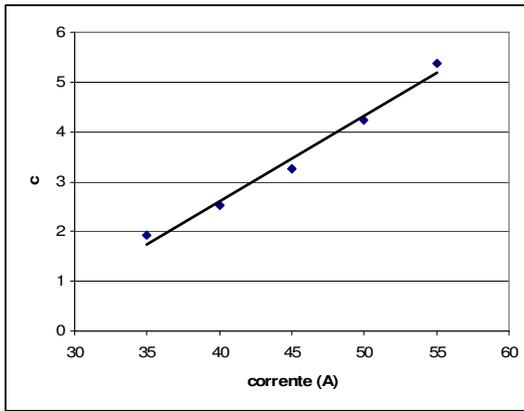


Figura IV.65 – Andamento della potenza media al variare della frequenza degli impulsi per diversi valori di corrente di alimentazione dei diodi.

La dipendenza di tali coefficienti dalla corrente è riportata nel figura IV.66.

Sostituendo le espressioni trovate nella equazione (IV.7), si ottiene:

$$P_m = (0,1636i - 3,9472) * \ln(f) - (-0,9117i + 20,679) \quad (IV.6)$$



a) andamento di 'c' in funzione della corrente

b) andamento di 'd' in funzione della corrente

Fig. IV.66 – Andamento dei coefficienti 'c' e 'd' al variare della corrente dei diodi

Sostituendo l'espressione della potenza media trovata (IV.6) nell'equazione della profondità (IV.4), si ottiene un modello empirico, ovvero basato su risultati sperimentali, che ci permette di valutare la profondità in funzione della frequenza  $f$ , velocità di lavorazione  $v$  e intensità di corrente di alimentazione dei diodi  $i$ , ovvero quei parametri che si possono impostare sul software della macchina:

$$pr = (-0,0002i^2 + 0,0113i + 1,2863) * e^{(0,0129i^2 - 1,6313i + 56,472) * ((0,1636i - 3,9472) * \ln(f) - (-0,9117i + 20,679)) / v} \quad (IV.7)$$

Nella figura IV.67 è riportata la profondità calcolata con la formula (IV.7) in funzione di quella misurata sperimentalmente, per poter dimostrare l'attendibilità del modello. Come è possibile notare, l'andamento è leggermente peggiorato rispetto a quello della figura IV.64, a causa delle approssimazioni dovute all'introduzione nella (IV.4) dell'espressione della potenza media.

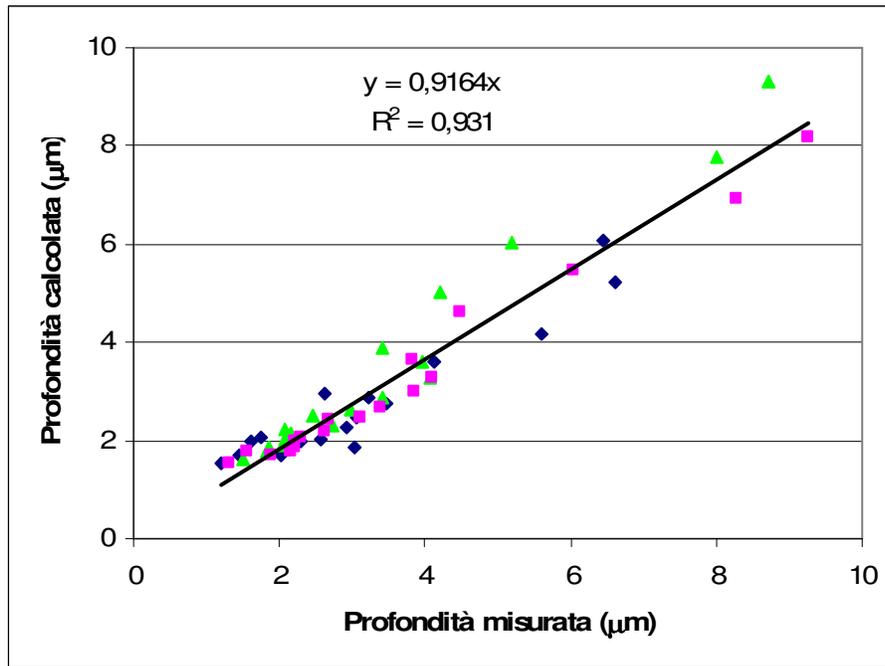


Figura IV.67 – Andamento della profondità del solco calcolata con la formula empirica al variare della profondità misurata sperimentalmente, su acciaio AISI 304

Analoghe considerazioni è possibile fare nel caso dell'acciaio AISI 430, giungendo ad una formula del tutto simile a quella trovata in precedenza.

Per questo materiale facciamo riferimento alla figura IV.68, la quale riporta l'andamento della profondità del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di amperaggio, mentre dalla figura IV.69 possiamo vedere come variano i coefficienti 'a' e 'b' al variare della corrente dei diodi.

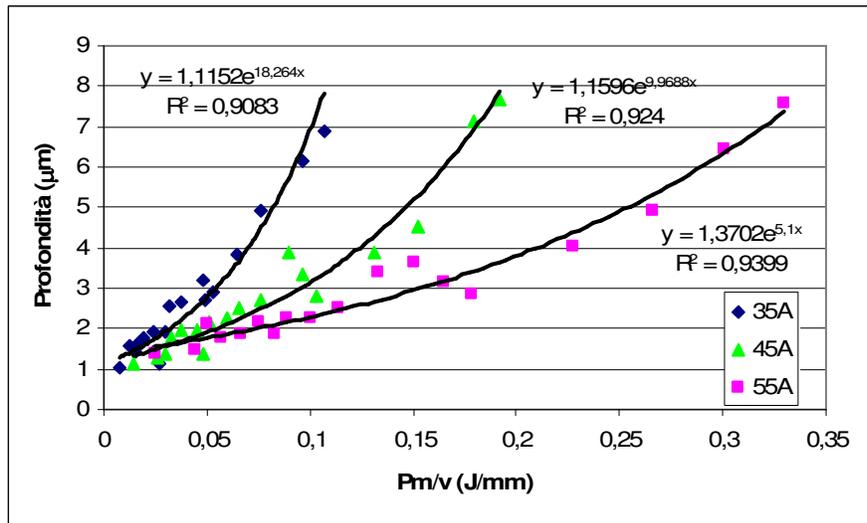
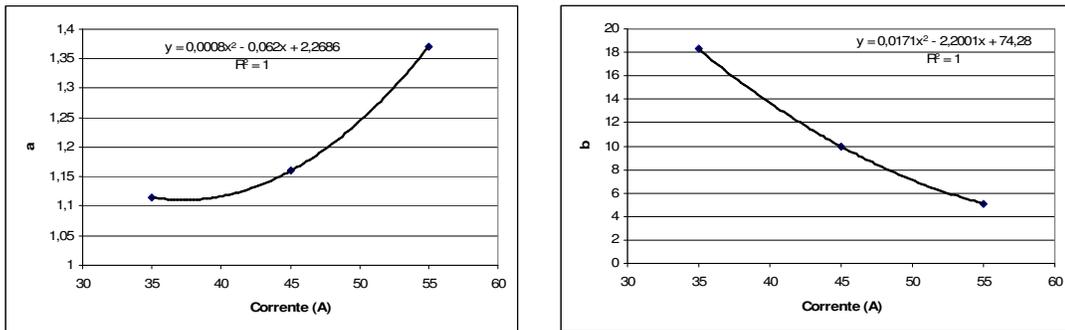


Figura IV.68 – Andamento della profondità del solco al variare del rapporto potenza media/velocità per tre valori di amperaggio, su acciaio AISI430



a) andamento di 'a' in funzione della corrente      b) andamento di 'b' in funzione della corrente

Figura IV.69 – Andamento dei coefficienti 'a' e 'b' al variare della corrente dei diodi per acciaio AISI 430.

Sono riportate inoltre le linee di minima dispersione dei punti del diagramma e le relative equazioni. Si può notare che tali curve sono tutte di uno stesso tipo e si presentano nella forma:

$$profondità = a * e^{b*(P_m/v)} \quad (IV.3)$$

Le espressioni dei coefficienti sono:

$$a = 0,0008i^2 + 0,062i + 2,2686$$

$$b = 0,01271i^2 - 2,2001i + 74,28$$

Sostituendo le espressioni così trovate dei coefficienti  $a$  e  $b$  nella formula (IV.3), è possibile ottenere un secondo modello empirico:

$$profondità = (0,0008i^2 + 0,062i + 2,2686) * e^{(0,01271i^2 - 2,2001i + 74,28)*(P_m/v)} \quad (IV.4bis)$$

Come fatto per l'AISI 304 anche per l'AISI 430 dimostriamo la validità del nostro modello empirico, tracciando un diagramma dove in ascissa riportiamo le profondità misurate e in ordinate quelle calcolate con la (IV.4bis) (figura IV.70).

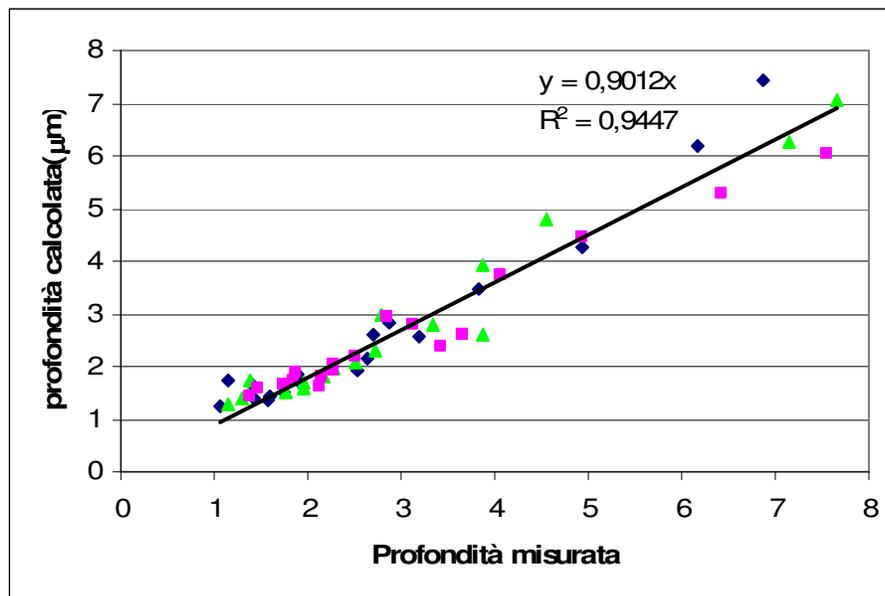


Figura IV.70– Andamento della profondità del solco calcolata con la formula (IV.4bis) al variare della profondità misurata sperimentalmente, su acciaio AISI 430.

I risultati sono ancora soddisfacenti.

Possiamo infine scrivere l'equazione empirica completa che ci permette di valutare la profondità del solco di marcatura in funzione della frequenza, della velocità e dell'intensità di corrente; non dobbiamo fare altro che sostituire l'espressione (IV.6) in quella (IV.4bis):

$$pr = (0,0008i^2 + 0,062i + 2,2686) * e^{(0,01271i^2 - 2,2001i + 74,28) * ((0,1636i - 3,9472) * \ln(f) - (-0,9117i + 20,679)) / v} \quad (\text{IV.7bis})$$

Come si può osservare i risultati a cui siamo pervenuti in entrambi i casi sono sostanzialmente identici, ciò che cambia tra le due relazioni empiriche sono solo le costanti che compaiono nelle equazioni, in quanto è cambiato il materiale marcato, in spessore e tipo.

Il grafico IV.71 è stato riportato per dimostrare l'attendibilità del modello proposto.

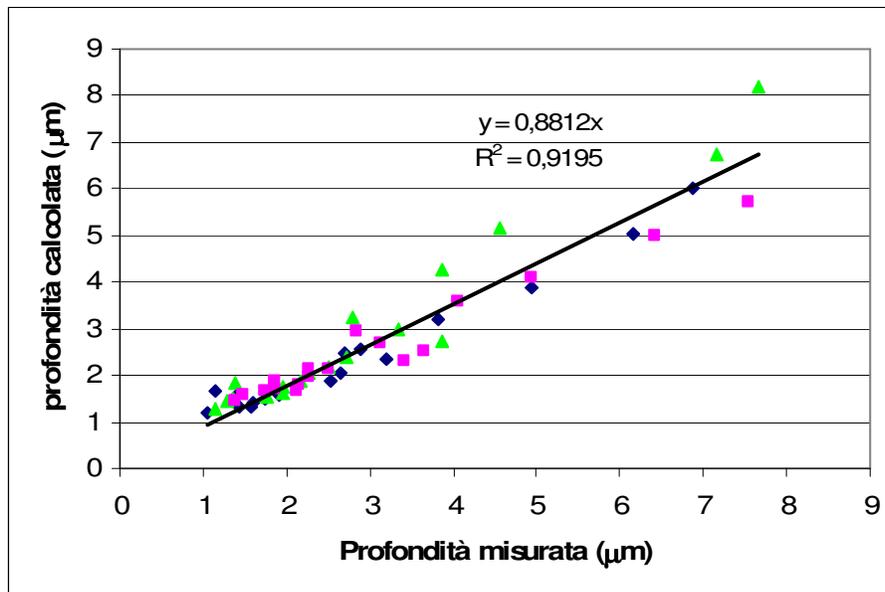


Figura IV.71 – Andamento della profondità del solco calcolata con la formula empirica al variare della profondità misurata sperimentalmente, su acciaio AISI 430

# **Capitolo V**

# **Conclusioni**

## V.1. Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi si è affrontato uno studio sull'influenza dei parametri di lavorazione sulla geometria dei solchi in un processo di marcatura laser.

Le caratteristiche geometriche della marcatura, profondità e larghezza, sono state analizzate, unitamente all'aspetto, al variare dei parametri di processo: frequenza di ripetizione degli impulsi, velocità di movimentazione del fascio e la corrente di alimentazione dei diodi, ai quali corrispondono valori di potenza media e potenza di picco variabili.

Inoltre si è sviluppato un modello empirico per la previsione della profondità in funzione dei parametri di lavorazione impostabili tramite software.

I principali risultati possono essere riassunti nelle seguenti osservazioni:

- La profondità di marcatura risulta fortemente influenzata dalla tensione di alimentazione dei diodi, dalla velocità di movimentazione del fascio e dalla frequenza di ripetizione degli impulsi; in particolare aumenta all'aumentare della corrente e al diminuire della velocità mentre presenta un massimo per valori di frequenza intorno ai 6.000 – 8.000 Hz.
- La larghezza della marcatura al contrario è poco influenzata dalla velocità e dalla corrente, mentre risulta debolmente decrescente con la frequenza fino a un valore prossimo ai 5.000 Hz, per poi mantenere un andamento sostanzialmente costante.
- E' stato individuato un valore di frequenza ottimale: 8.000 Hz. A tale valore infatti corrisponde una geometria del solco regolare e la profondità risulta massima.

- Il modello empirico conduce a risultati che sono in buon accordo con quelli sperimentali.
- Il modello trovato è particolarmente utile poiché permette di prevedere la profondità dell'incisione utilizzando direttamente i parametri impostabili dalla macchina.

# **Appendice**

## Premessa

Come precedentemente evidenziato, in questo capitolo sono riportati i diagrammi relativi al primo set di prove, servite a studiare le potenzialità del laser e a giungere al modello descritto nel capitolo IV.

### A.1 AISI 304 – 15A

In questo paragrafo verranno illustrati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 304, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 15A.

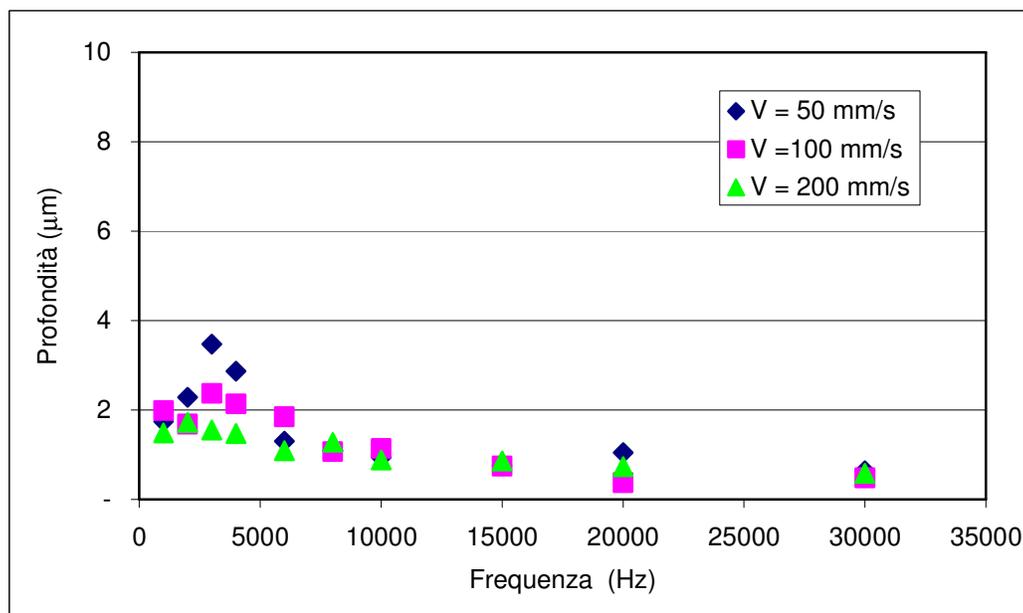


Figura A. 1 – Andamento della profondità al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

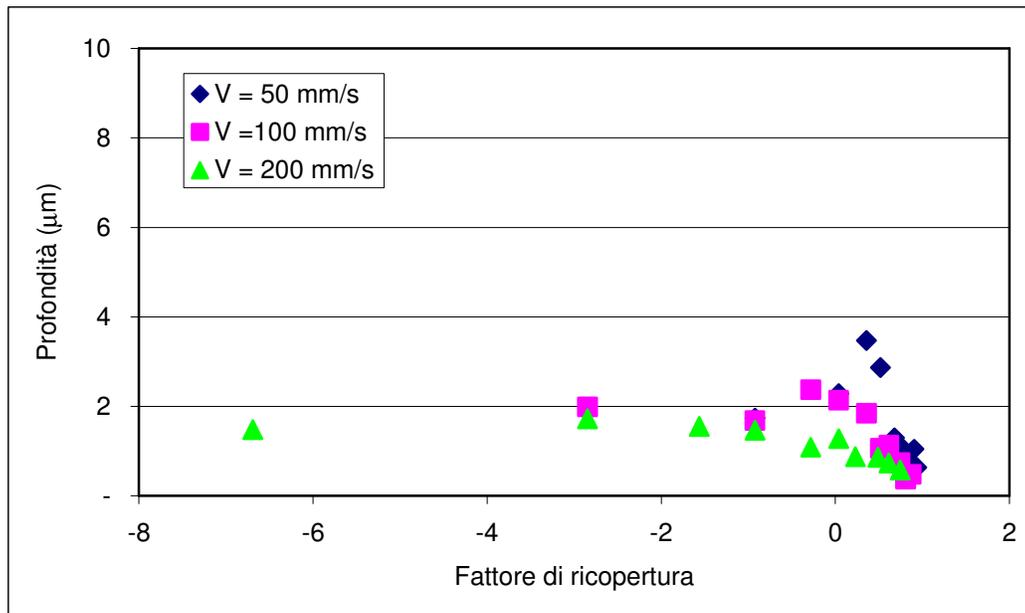


Figura A.2 – Andamento della profondità al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

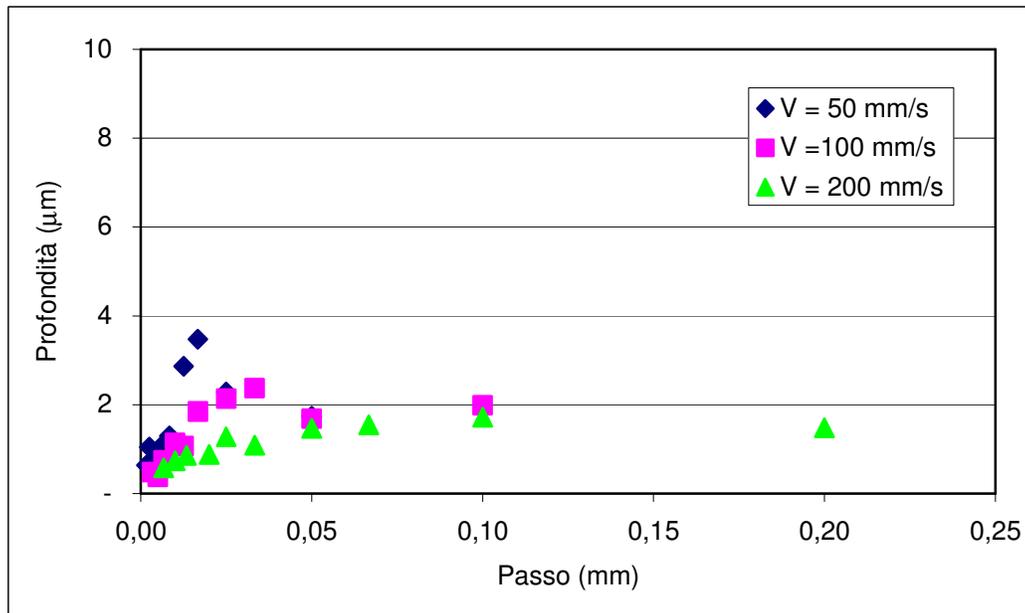


Figura A.3 – Andamento della profondità al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

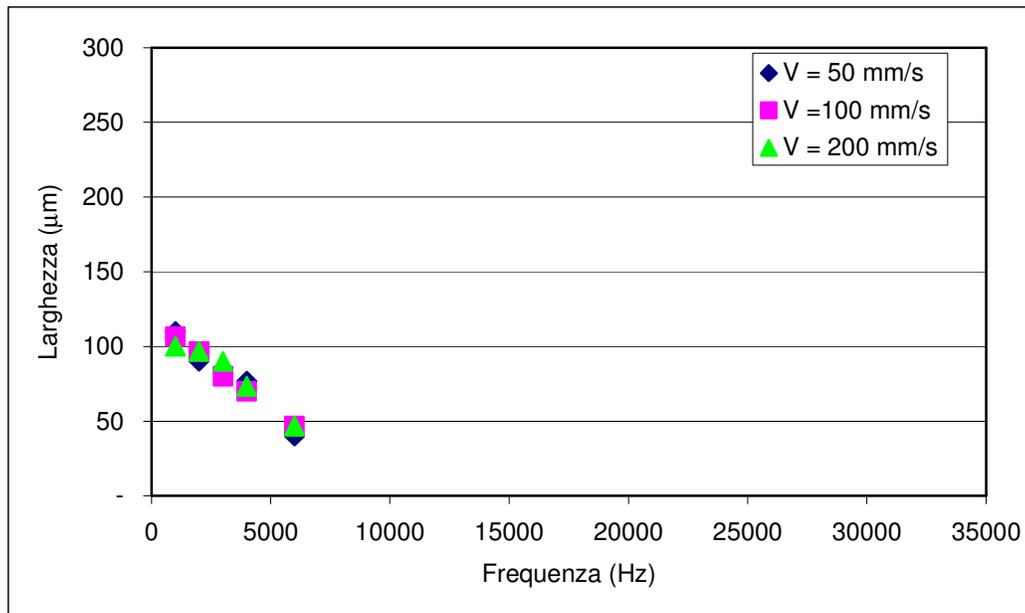


Figura A.4 – Andamento della larghezza al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

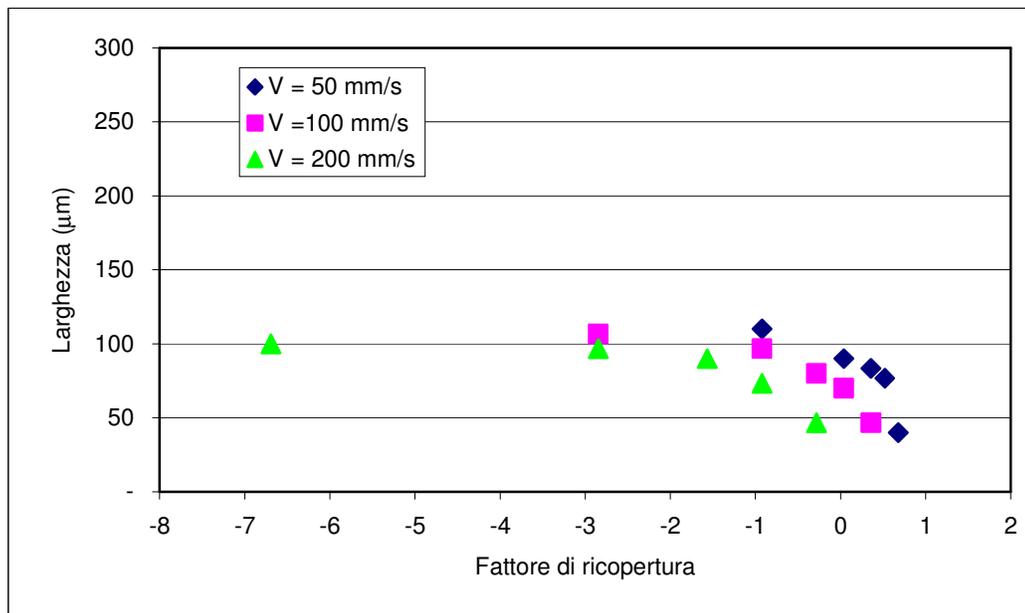


Figura A.5 – Andamento della larghezza al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

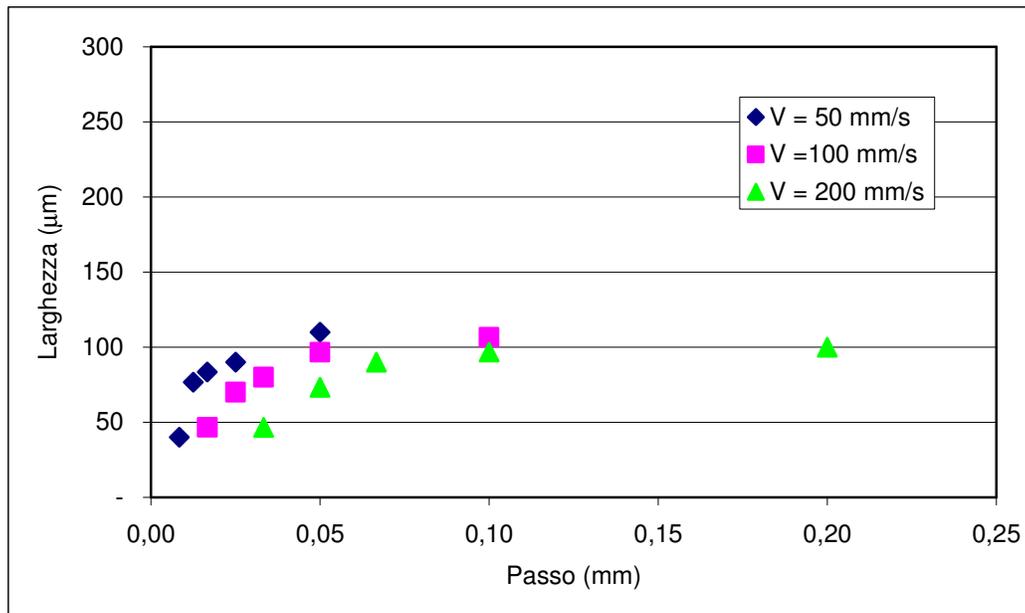


Figura A.6 – Andamento della larghezza al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

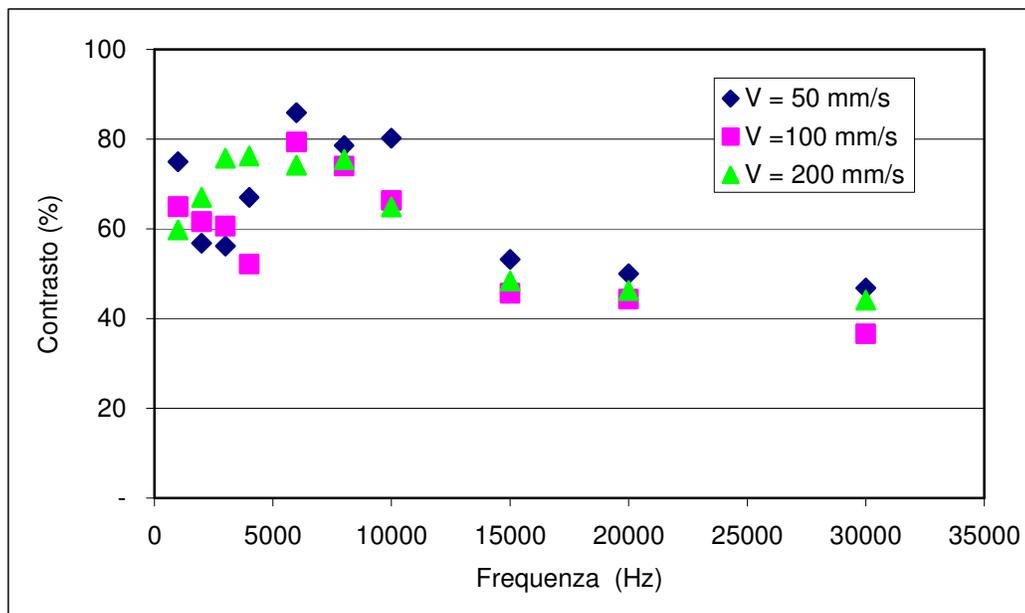


Figura A.7 – Andamento del contrasto al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

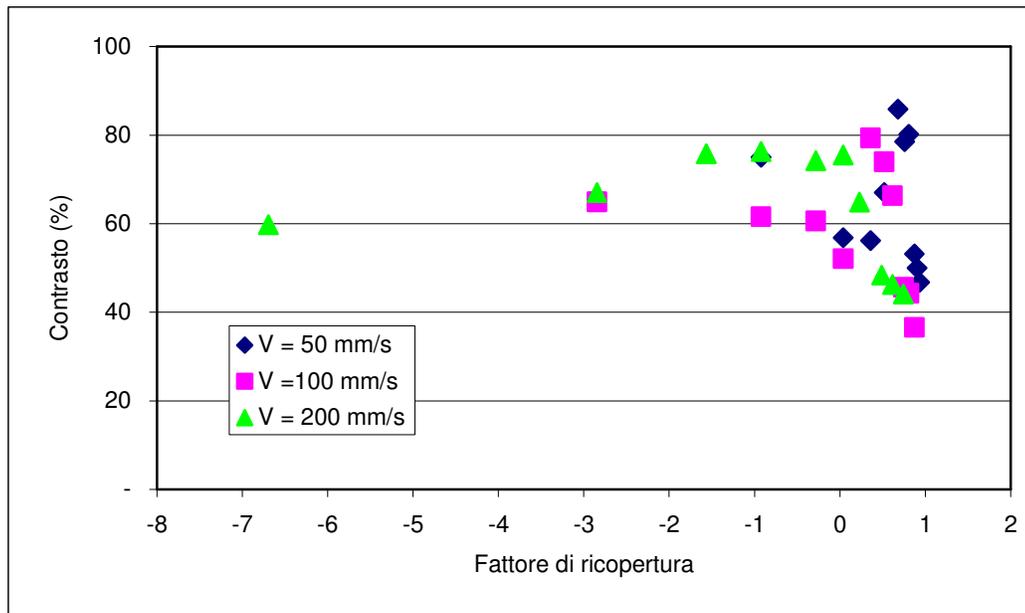


Figura A.8 – Andamento del contrasto al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

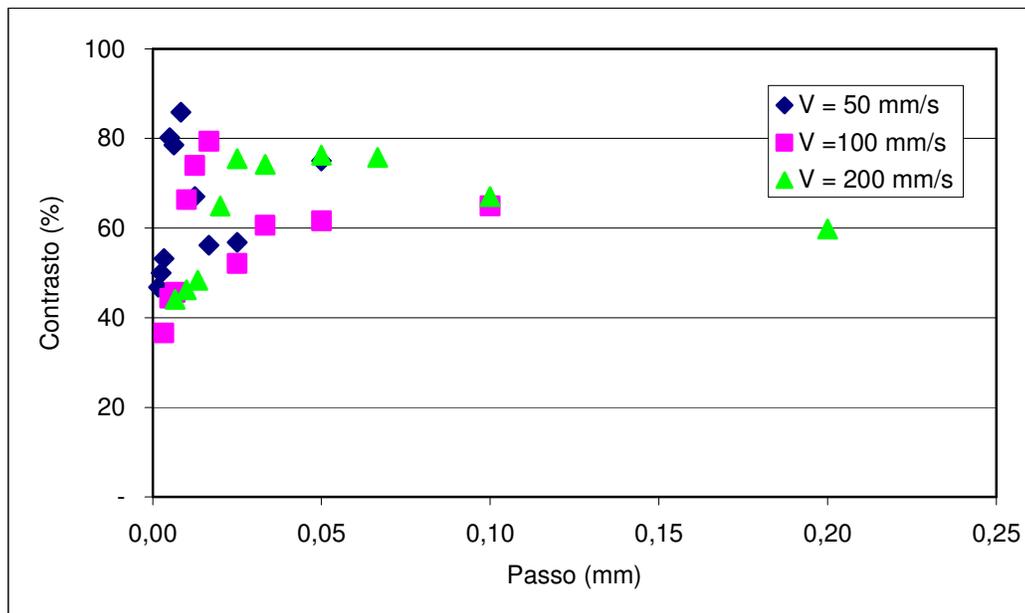


Figura A.9 – Andamento del contrasto al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

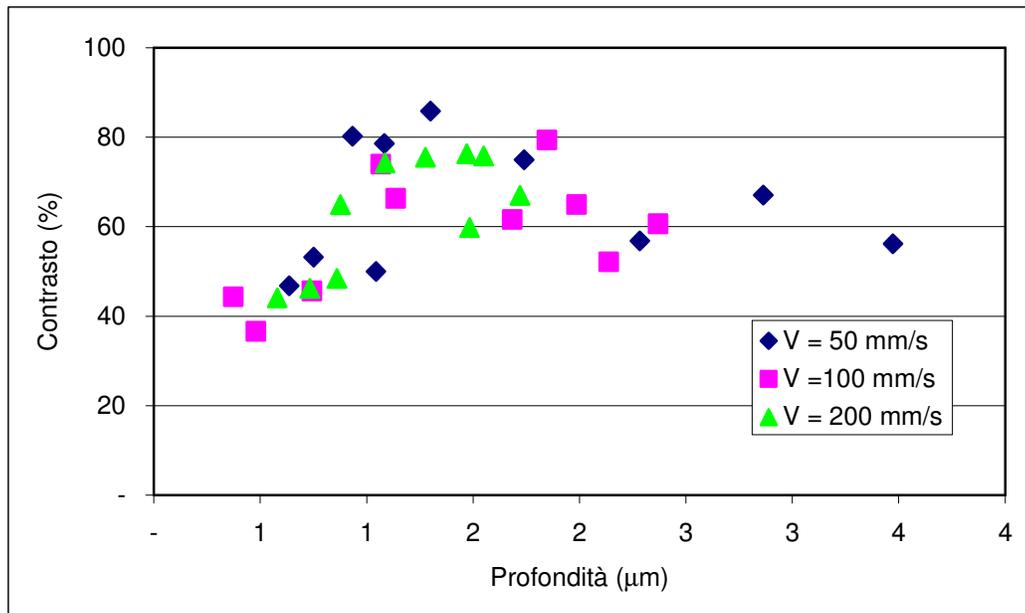


Figura A.10 – Andamento del contrasto al variare della profondità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

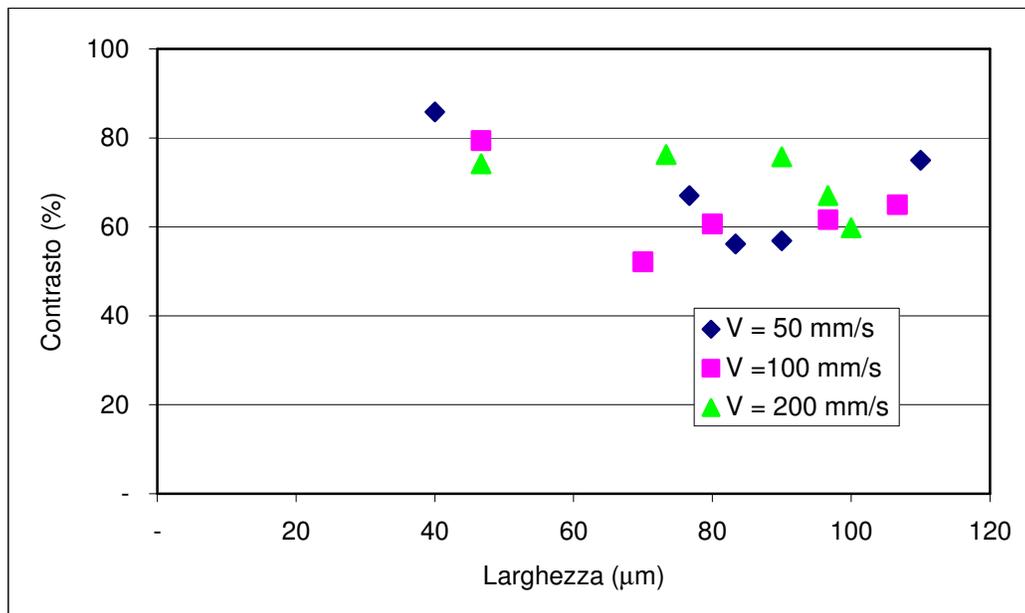


Figura A.11 – Andamento del contrasto al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

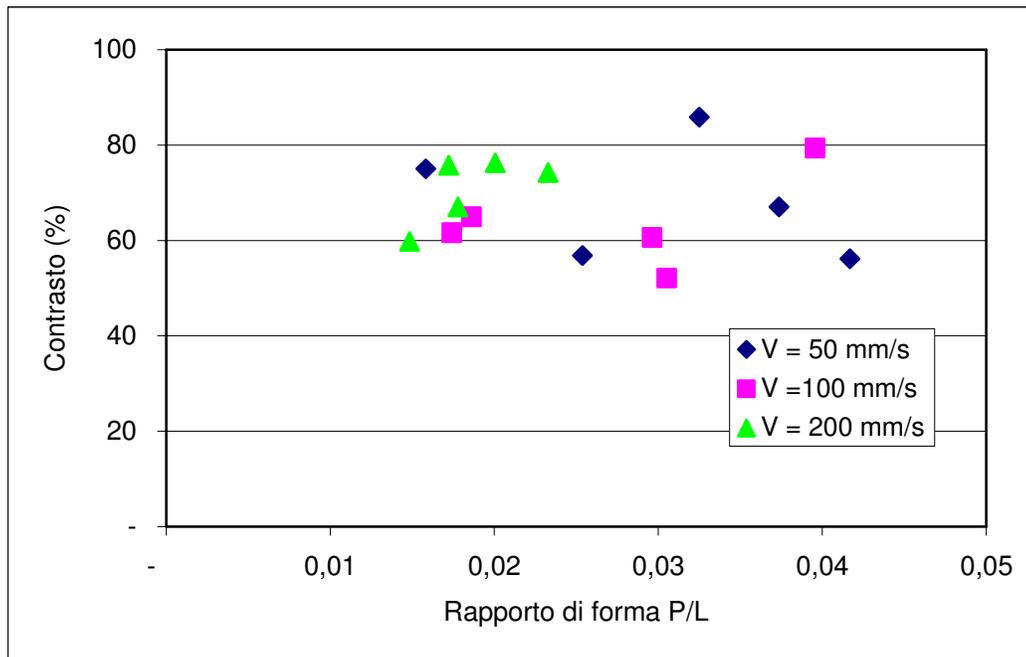


Figura A.12 – Andamento del contrasto al variare del rapporto di forma per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

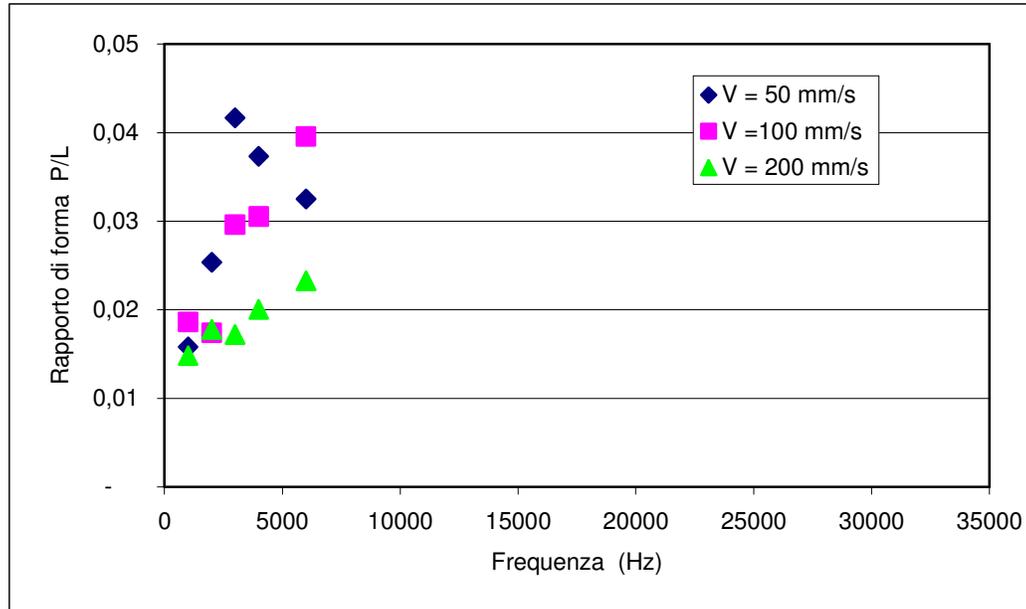


Figura A.13 – Andamento del rapporto di forma al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

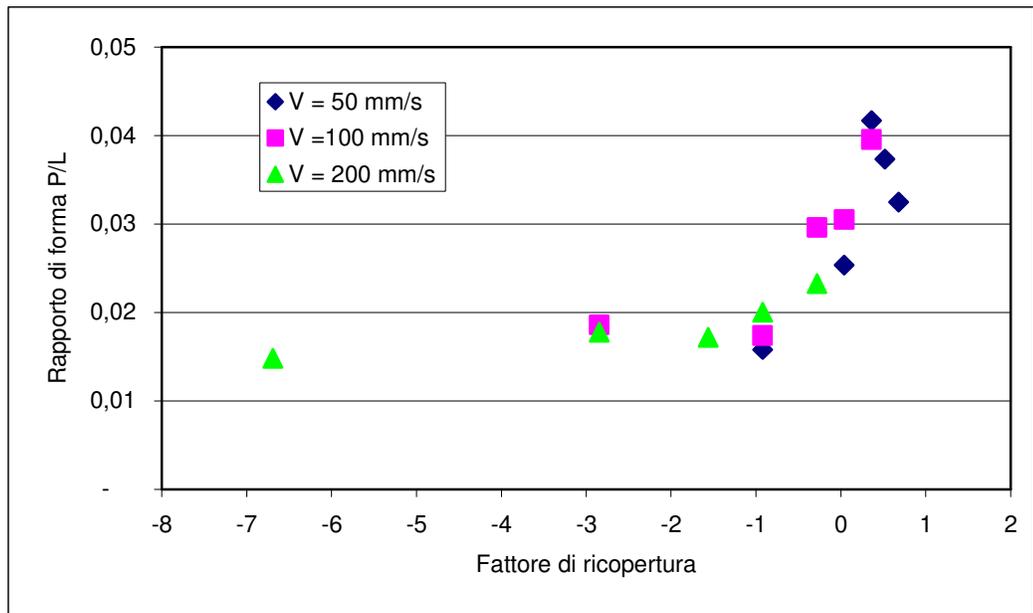


Figura A.14 – Andamento del rapporto di forma al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

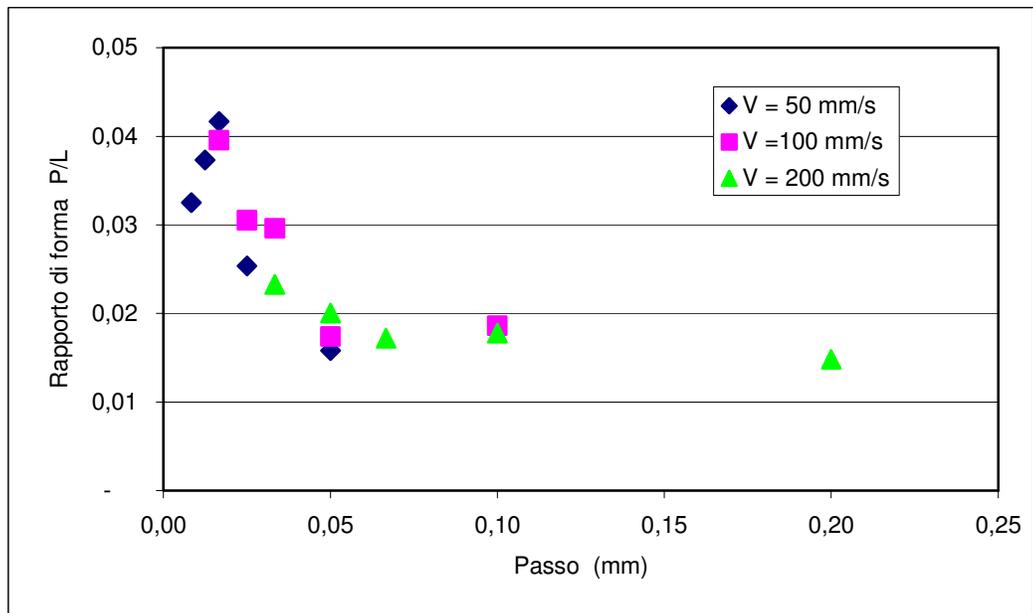


Figura A.15 – Andamento del rapporto di forma al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

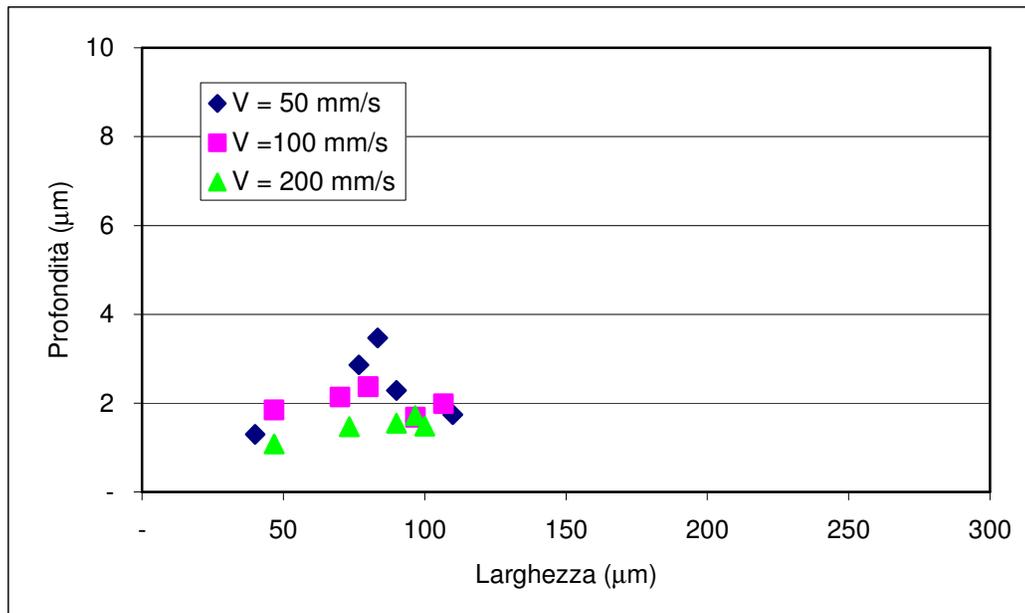


Figura A.16 – Andamento della profondità al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 304.

## A.2 AISI 304 – 25A

In questo paragrafo verranno illustrati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 304, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 25A.

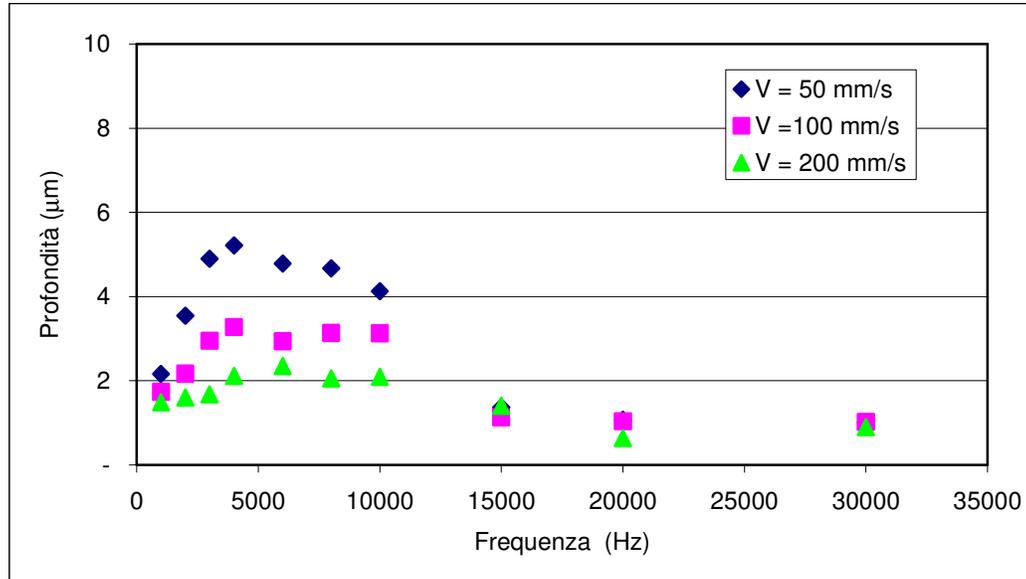


Figura A.25 – Andamento della profondità al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

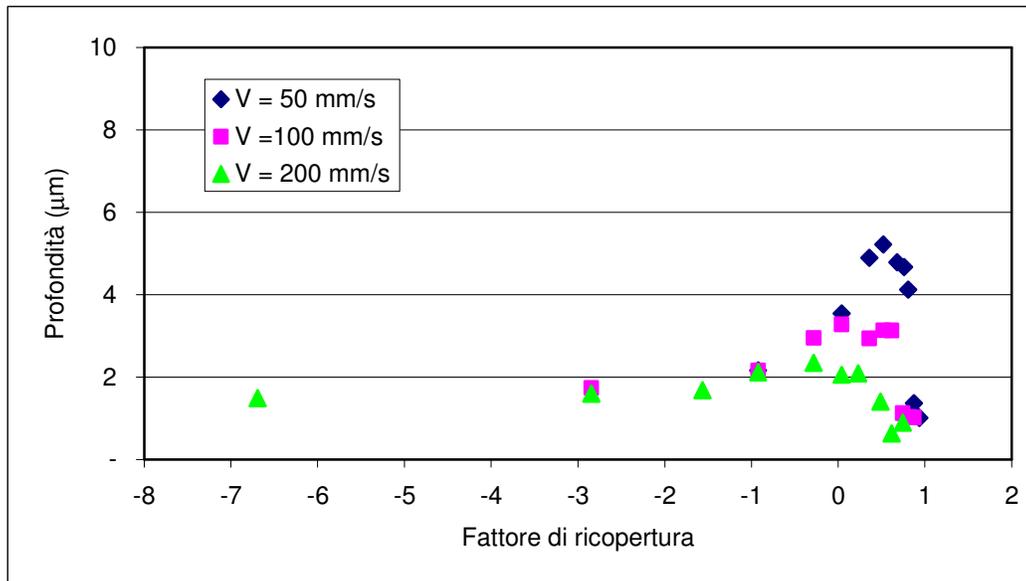


Figura A.26 – Andamento della profondità al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

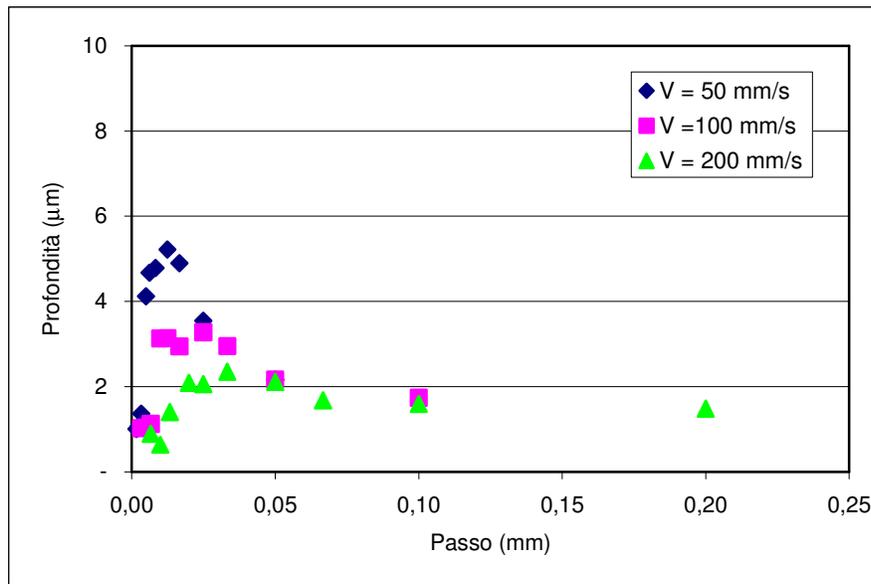


Figura A.27 – Andamento della profondità al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

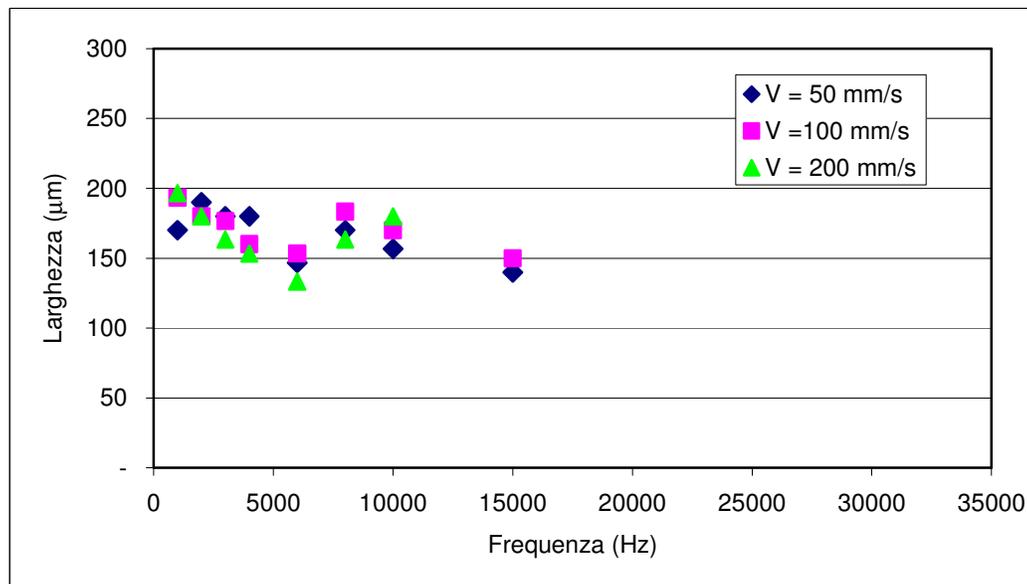


Figura A.28 – Andamento della larghezza al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

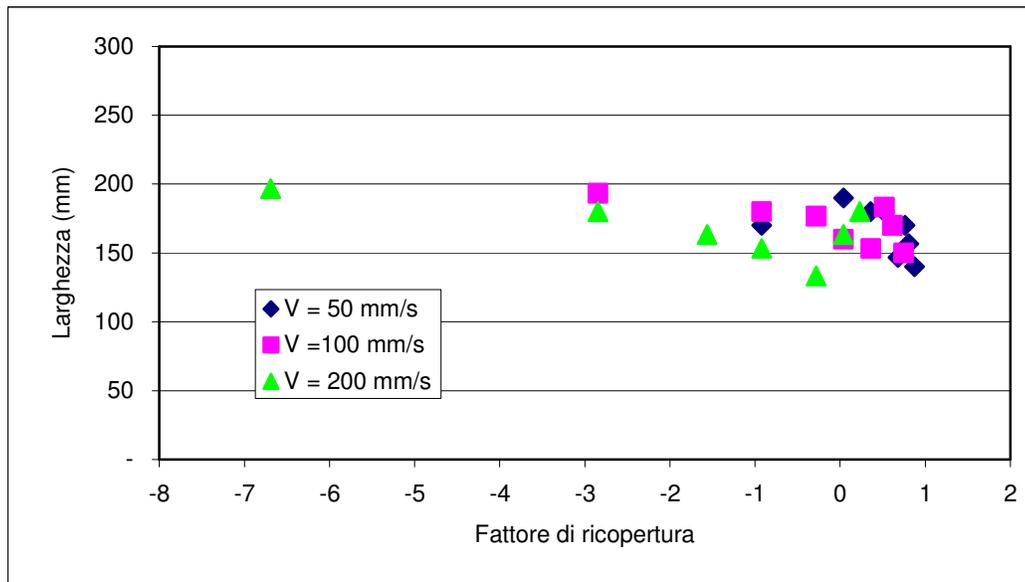


Figura A.29 – Andamento della larghezza al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

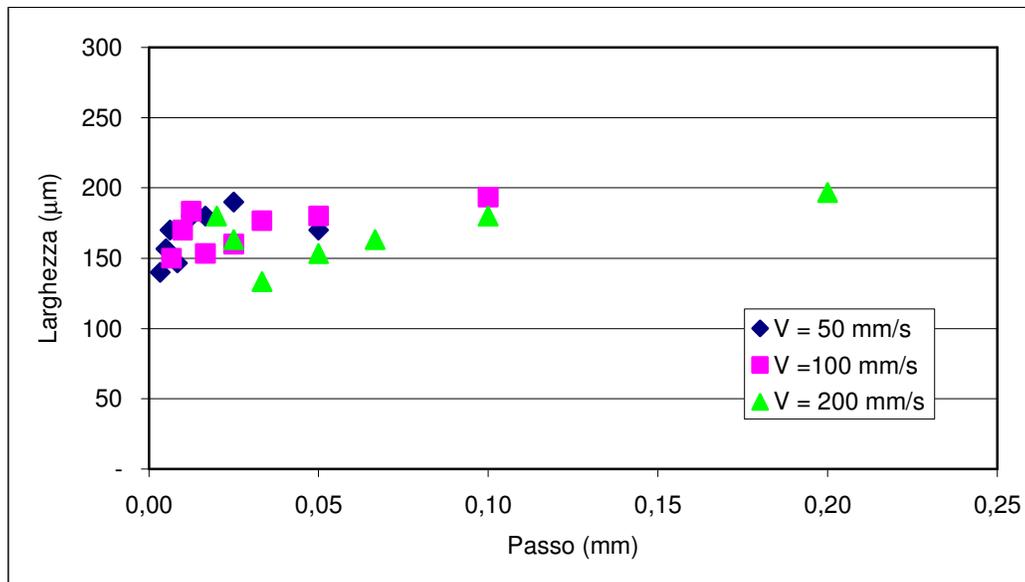


Figura A.30 – Andamento della larghezza al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

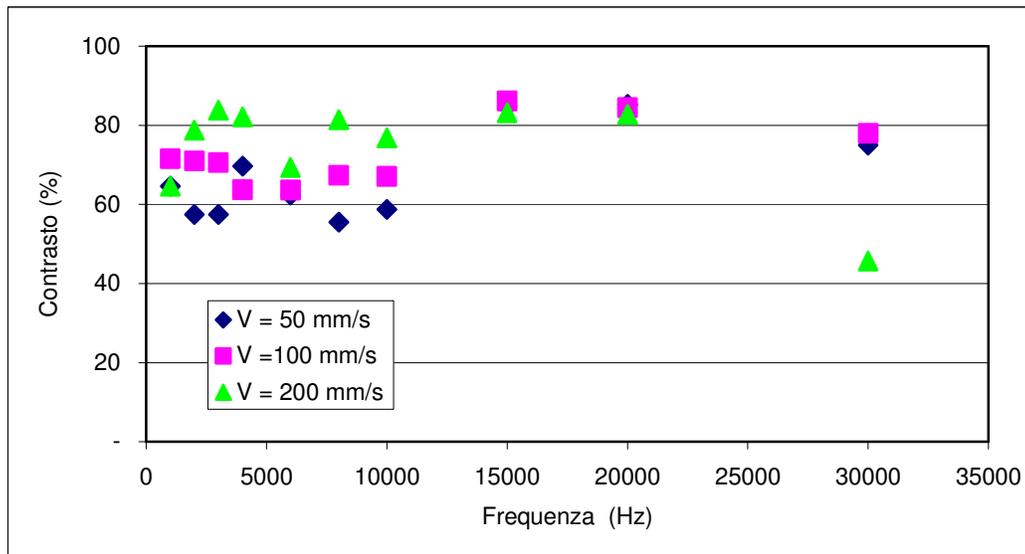


Figura A.31 – Andamento del contrasto al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

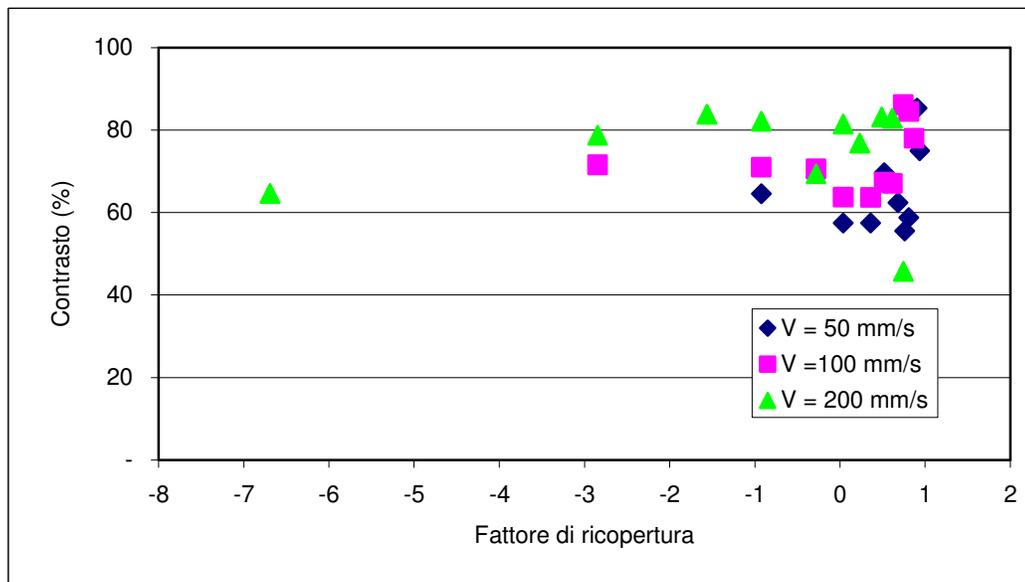


Figura A.32 – Andamento del contrasto al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

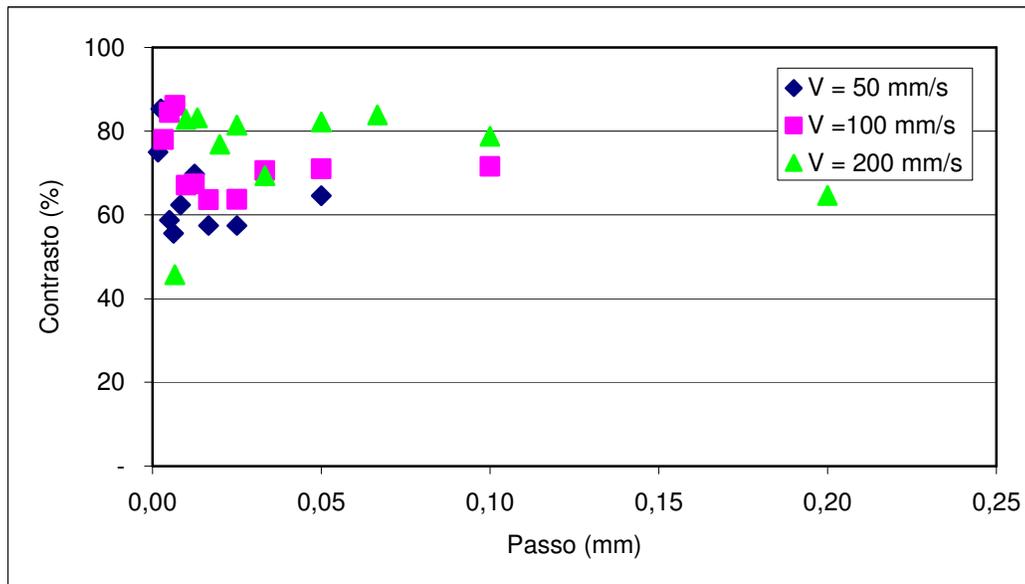


Figura A.33 – Andamento del contrasto al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

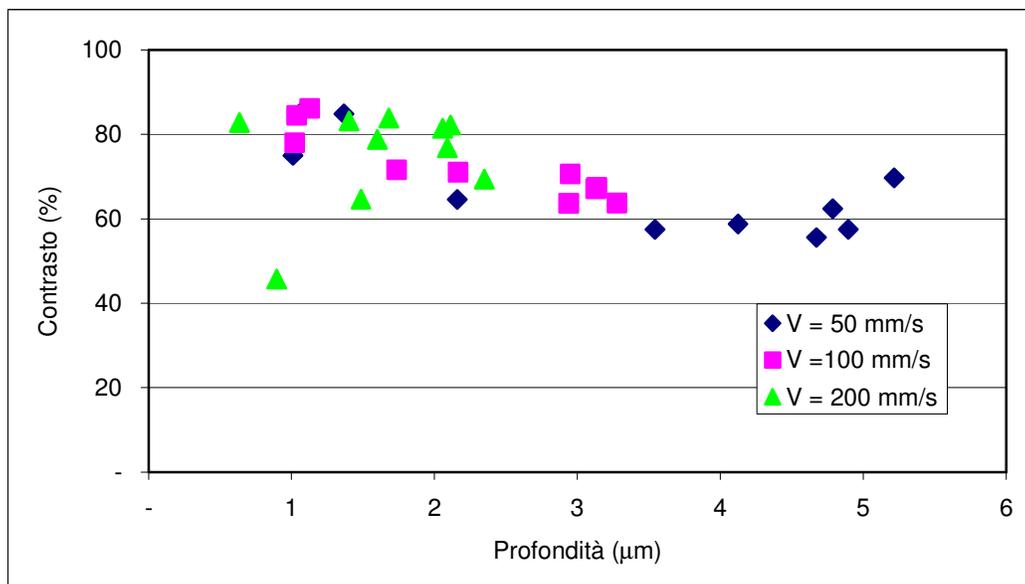


Figura A.34 – Andamento del contrasto al variare della profondità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

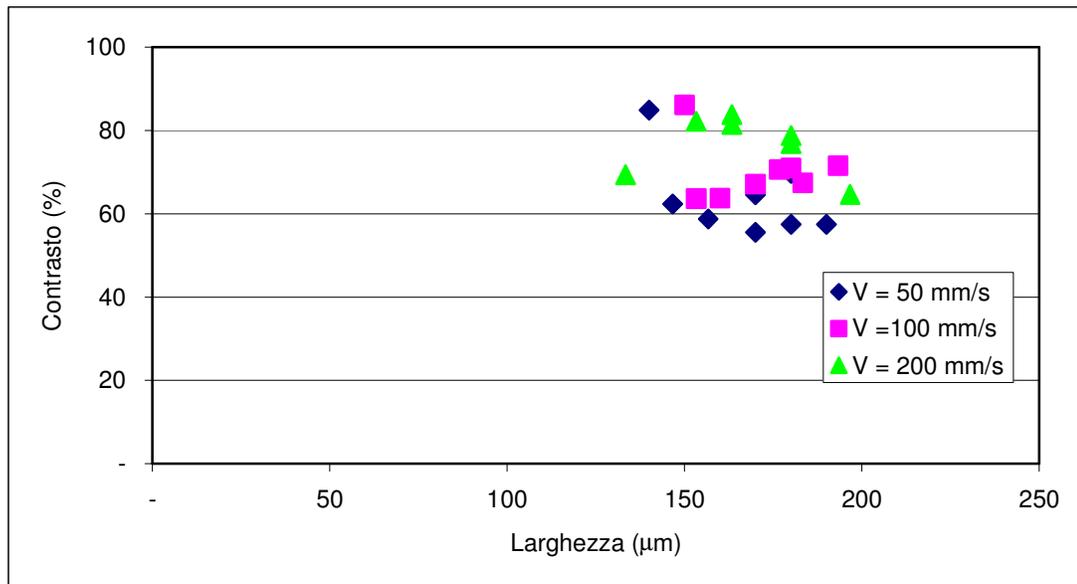


Figura A.35 – Andamento del contrasto al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

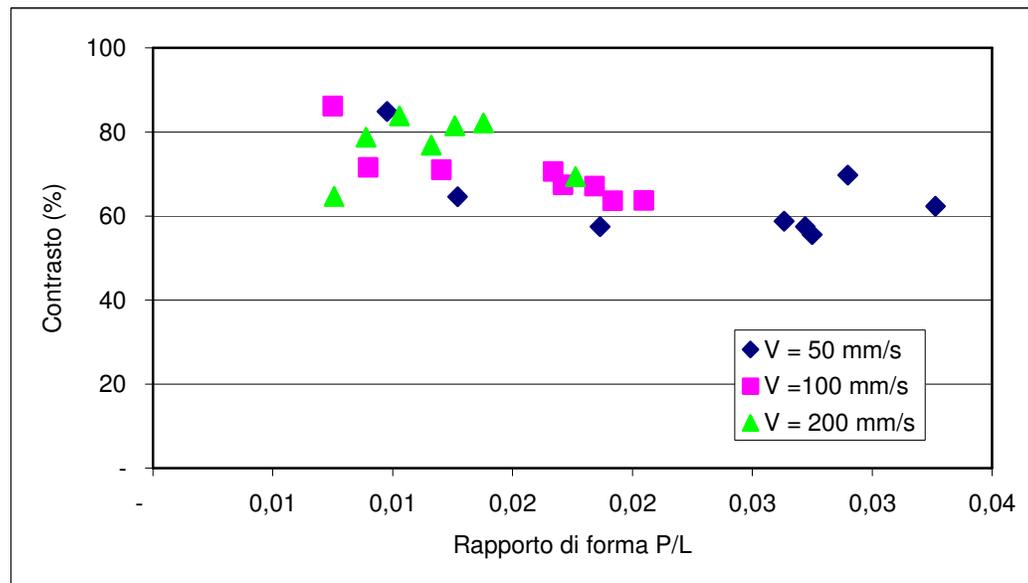


Figura A.36 – Andamento del contrasto al variare del rapporto di forma per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

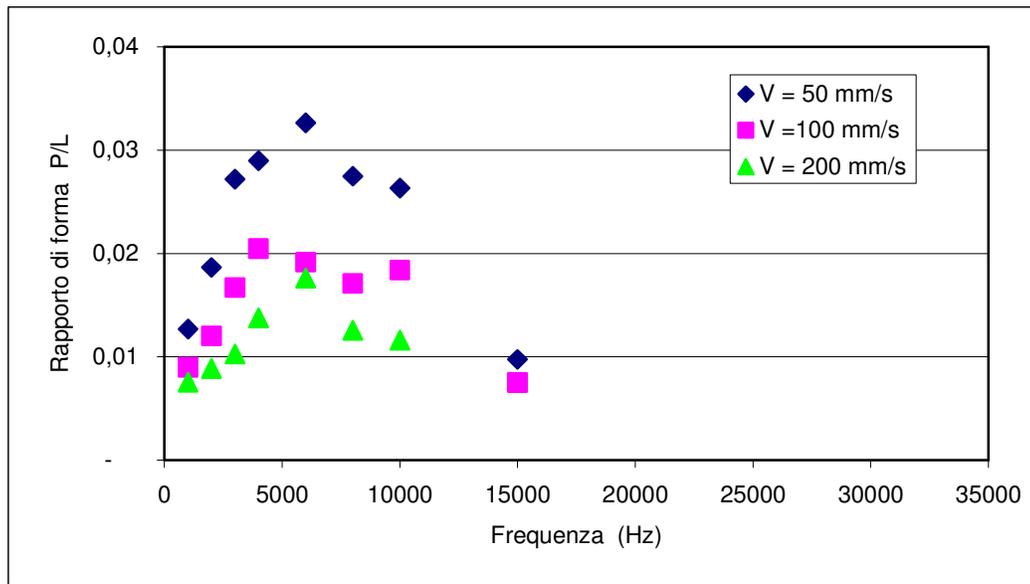


Figura A.37 – Andamento del rapporto di forma al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

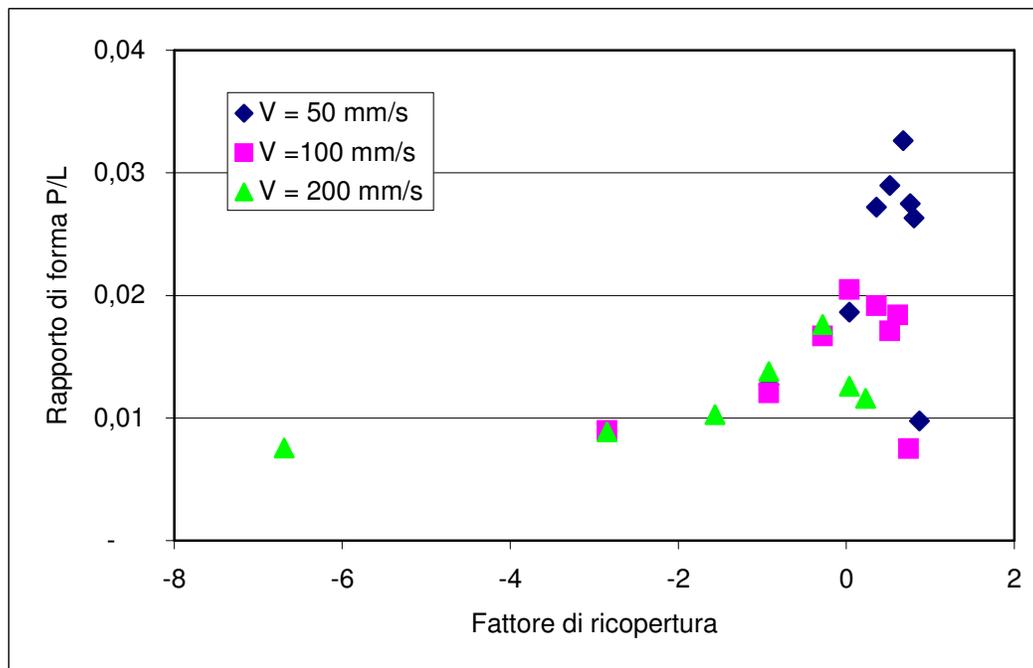


Figura A.38 – Andamento del rapporto di forma al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

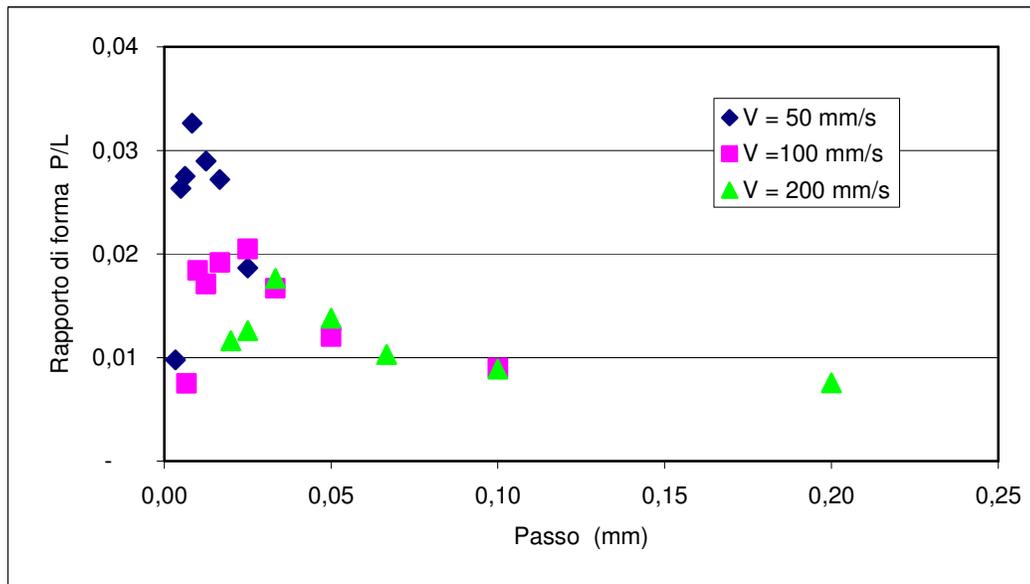


Figura A.39 – Andamento del rapporto di forma al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

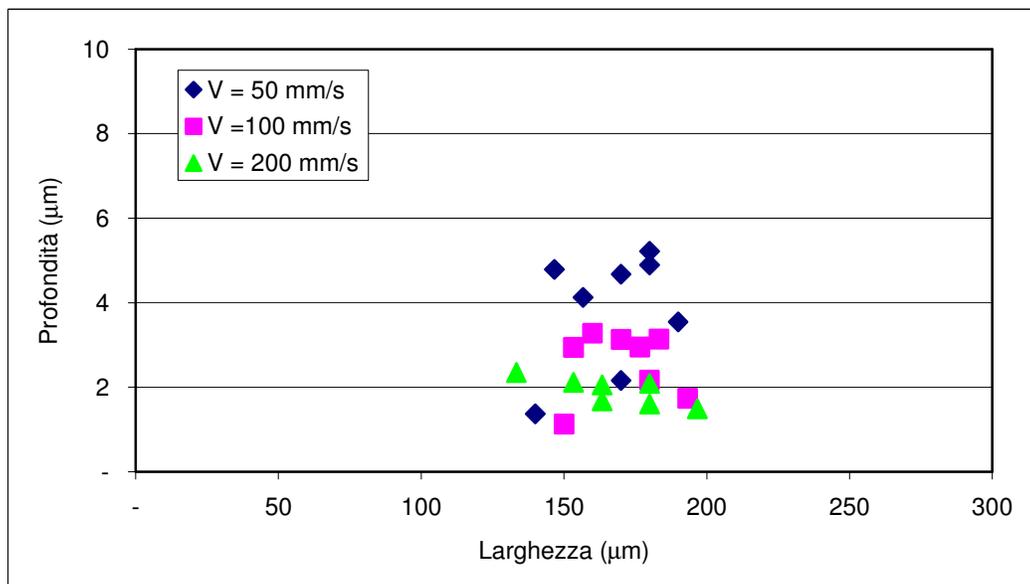


Figura A.40 – Andamento della profondità al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 304.

### A.3 AISI 304 – 35A

In questo paragrafo verranno illustrati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 304, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 35A.

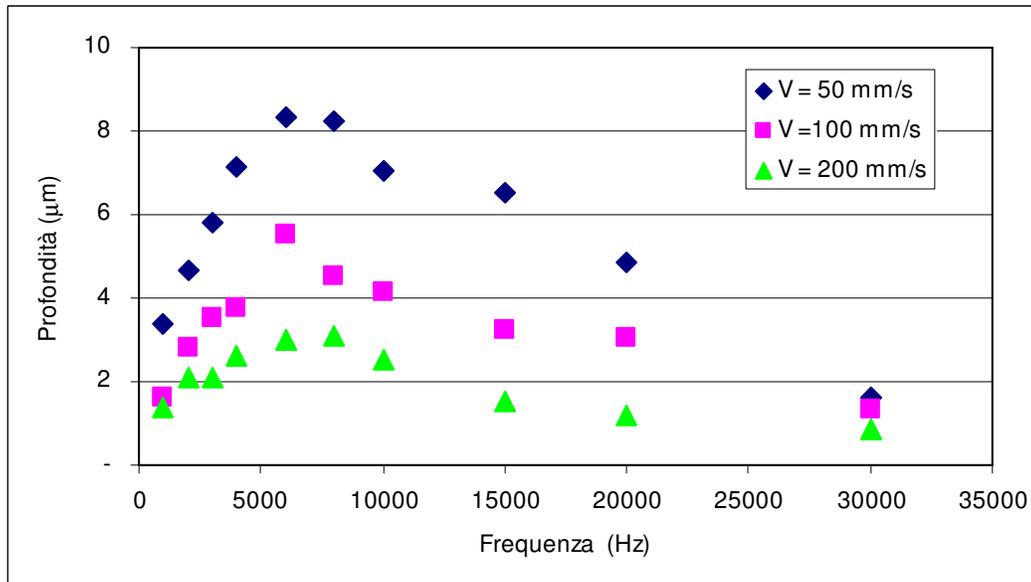


Figura A.41 – Andamento della profondità del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

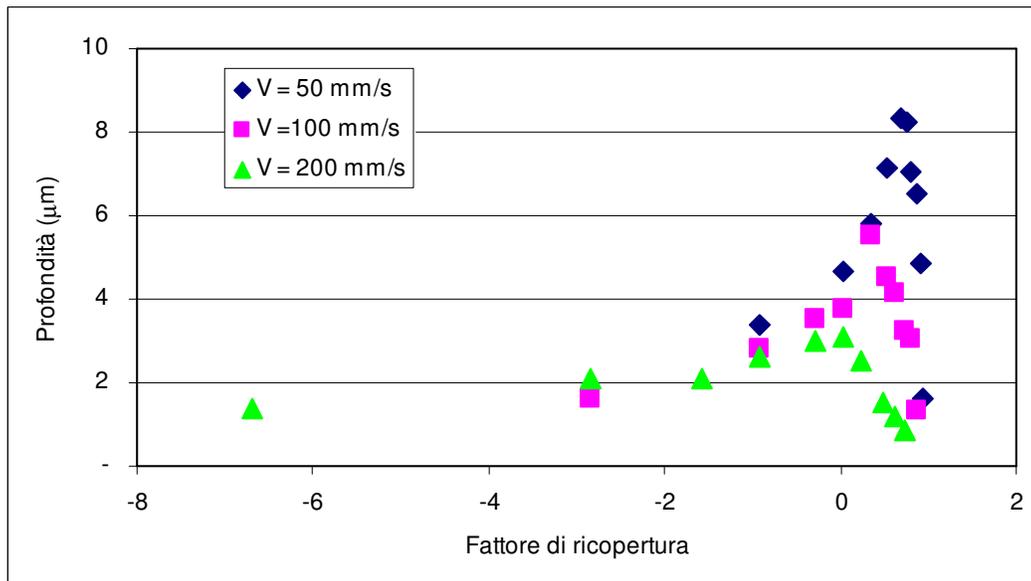


Figura A.42 - Andamento della profondità del solco al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

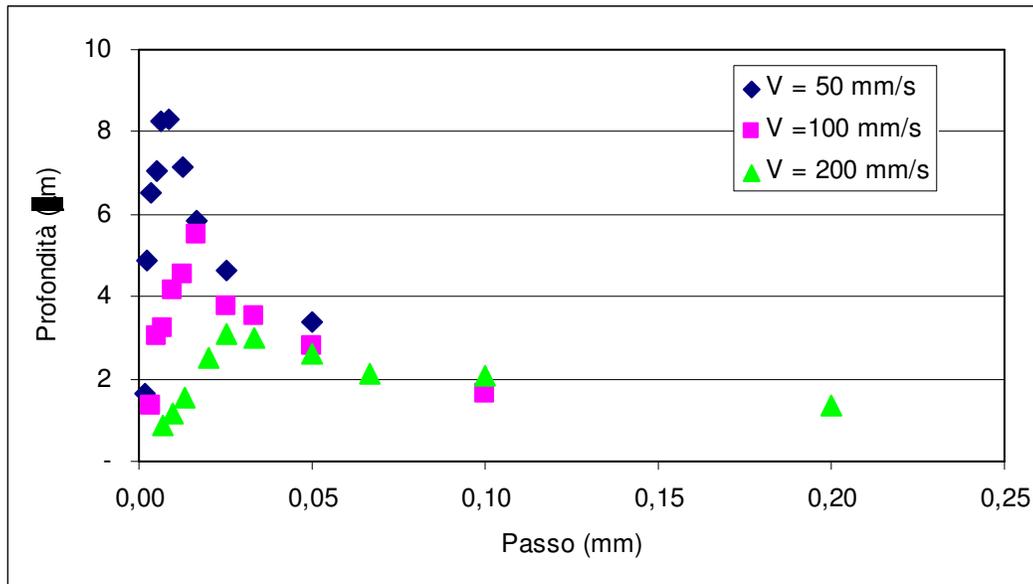


Figura A.43 – Andamento della profondità del solco al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

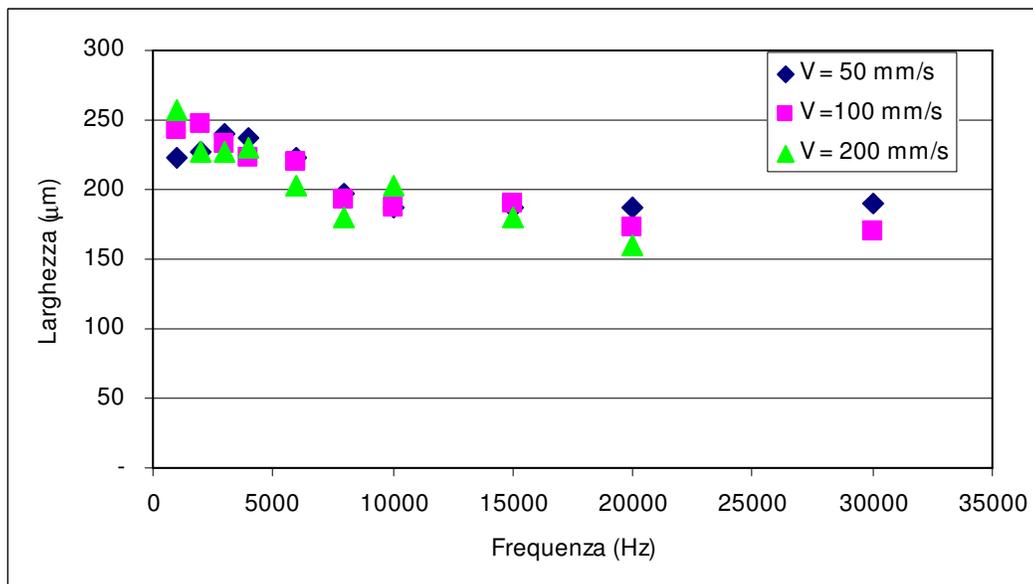


Figura A.44 – Andamento della larghezza del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

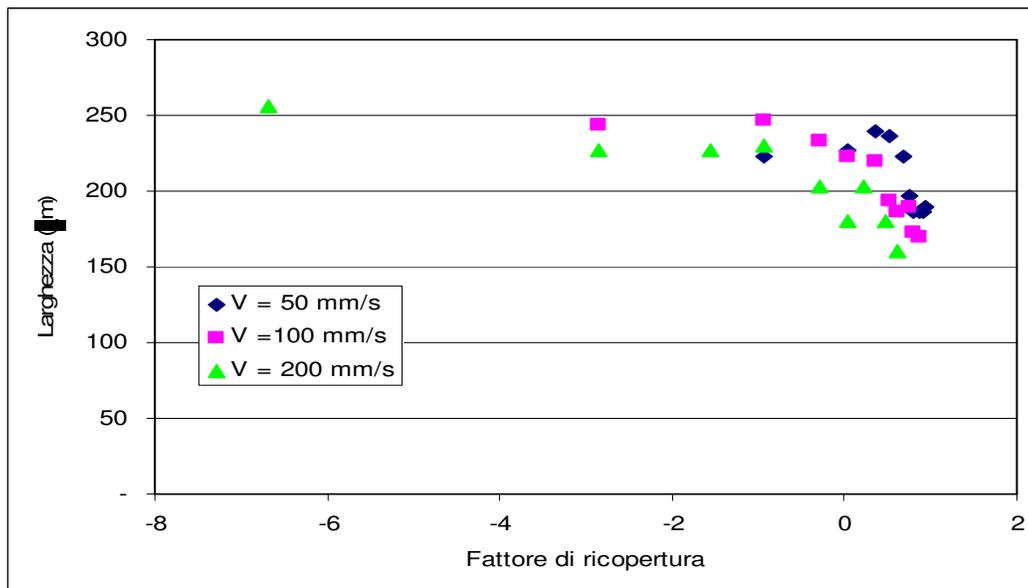


Figura A.45 – Andamento della larghezza del solco al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

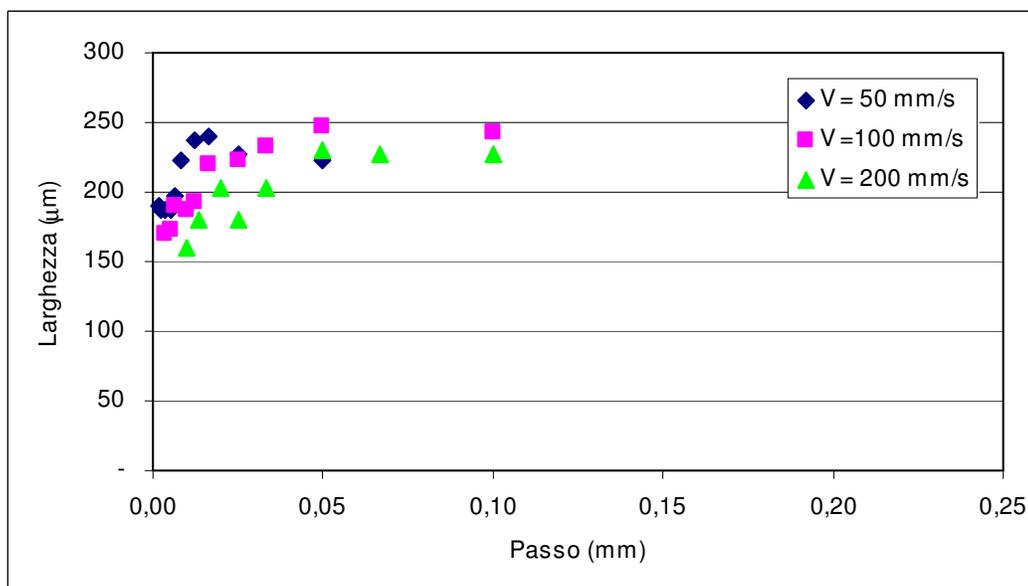


Figura A.46 – Andamento della larghezza del solco al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

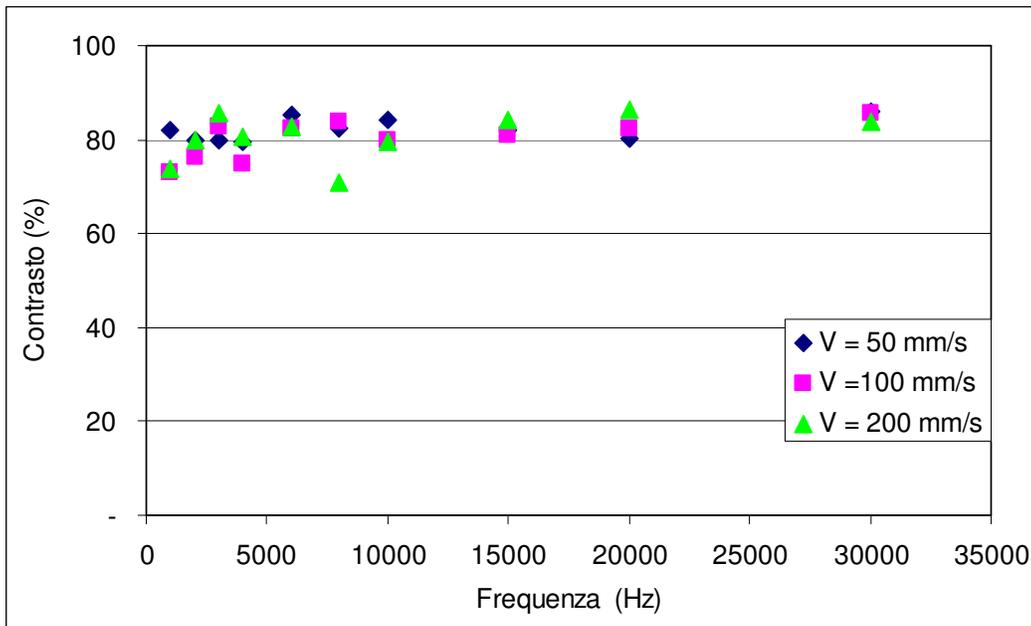


Figura A.47 – Andamento della percentuale di contrasto al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

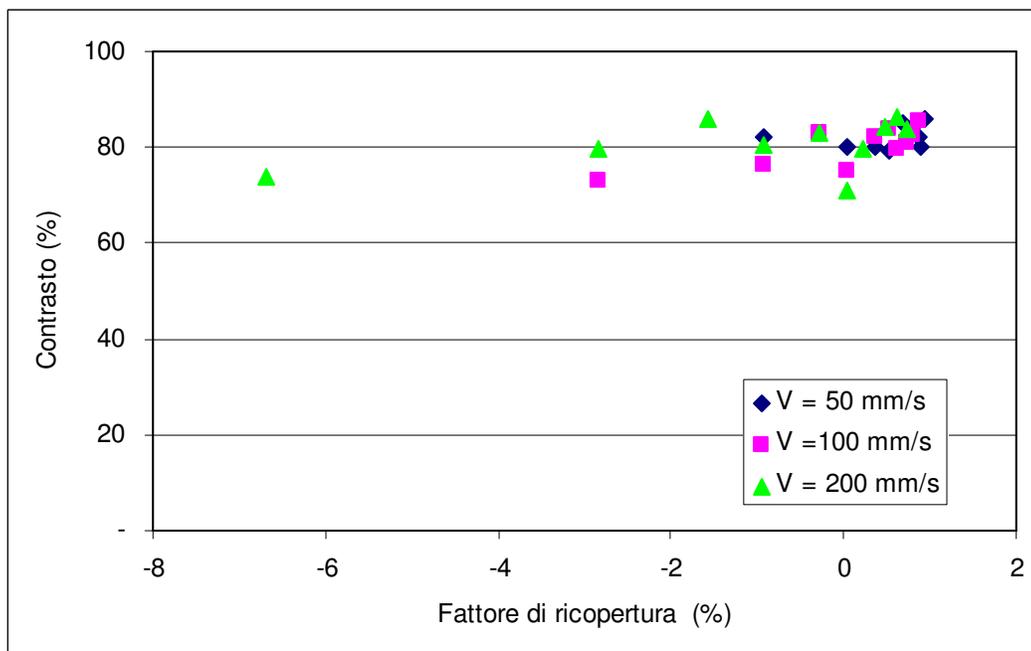


Figura A.48 – Andamento della percentuale di contrasto al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

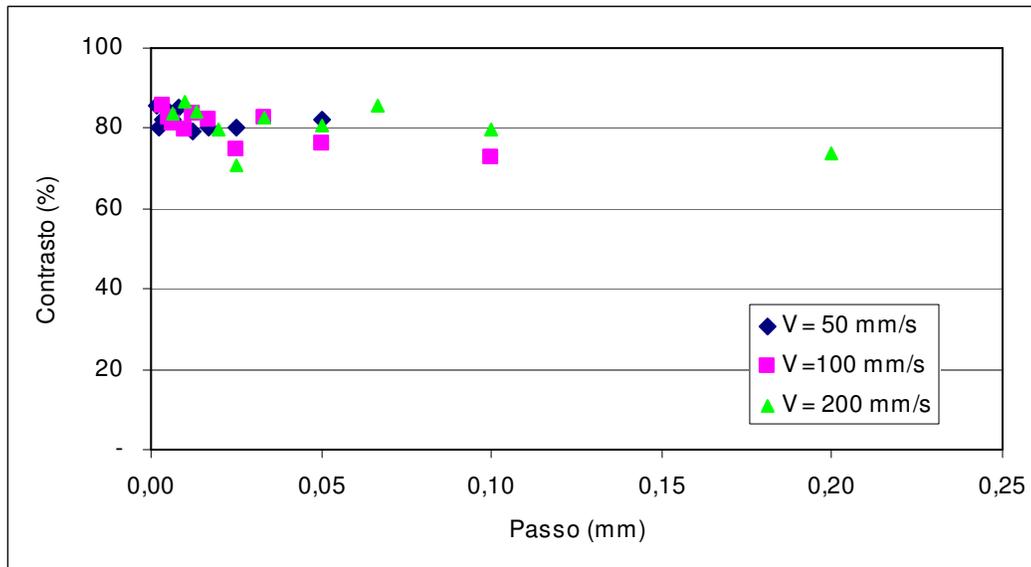


Figura A.49 – Andamento della percentuale di contrasto al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

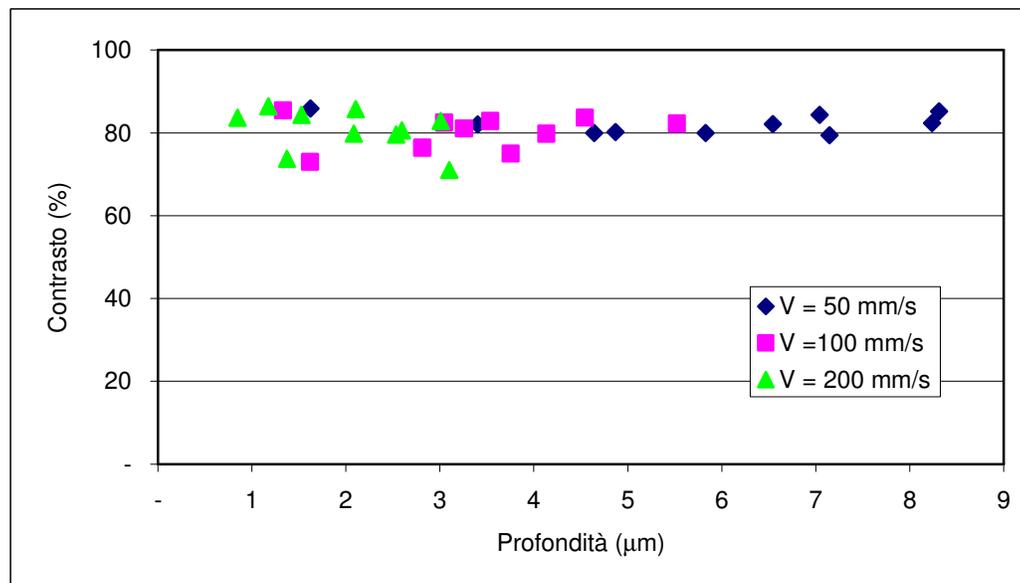


Figura A.50 – Andamento della percentuale di contrasto al variare della profondità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

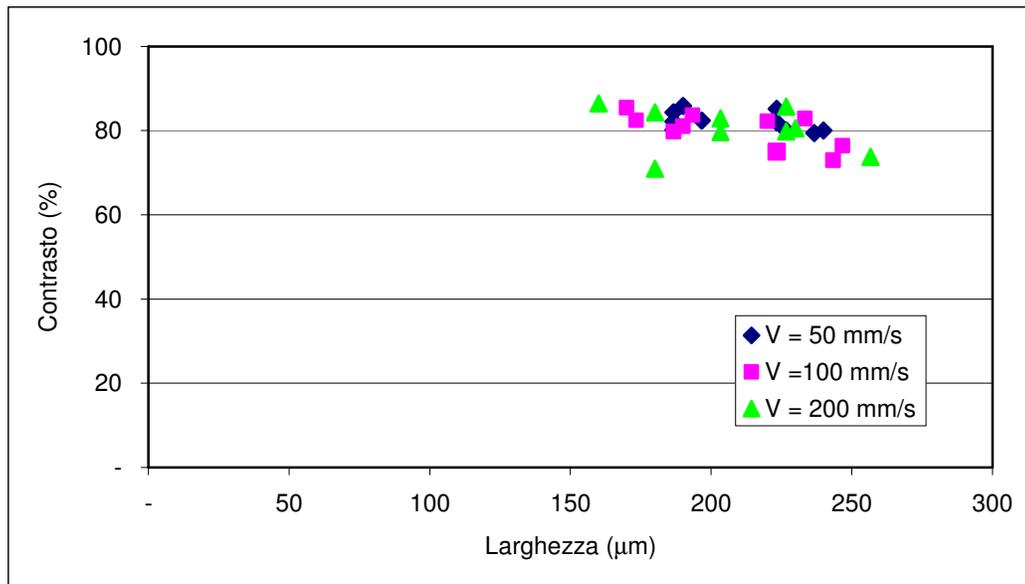


Figura A.51 – Andamento della percentuale di contrasto al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

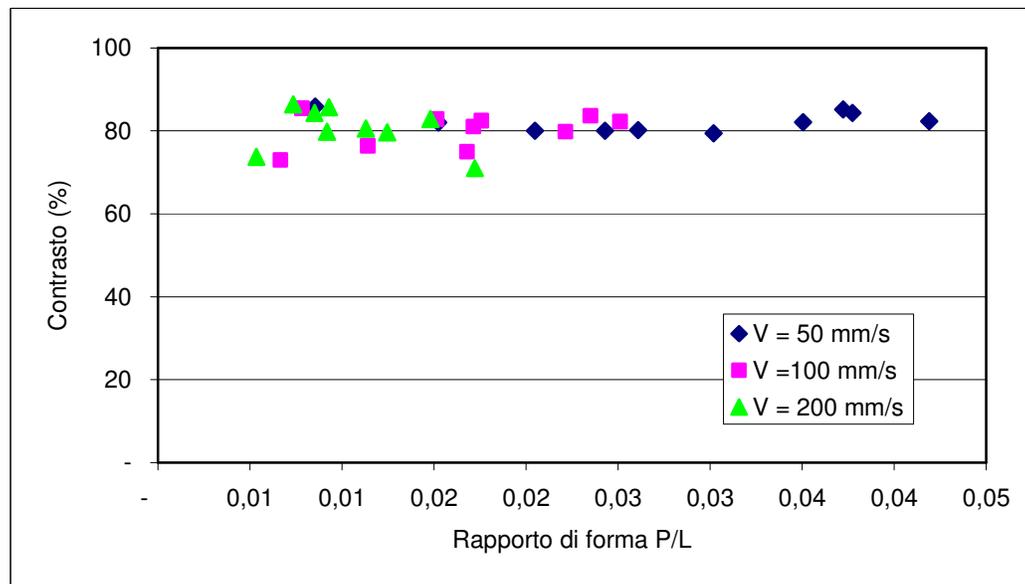


Figura A.52 – Andamento della percentuale di contrasto al variare del rapporto di forma per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

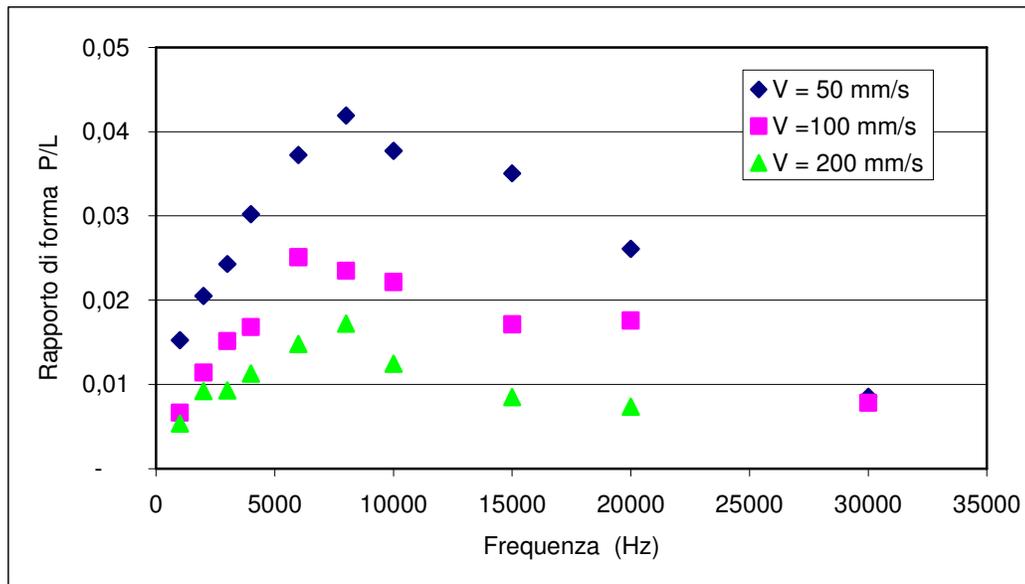


Figura A.53 – Andamento del rapporto di forma al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

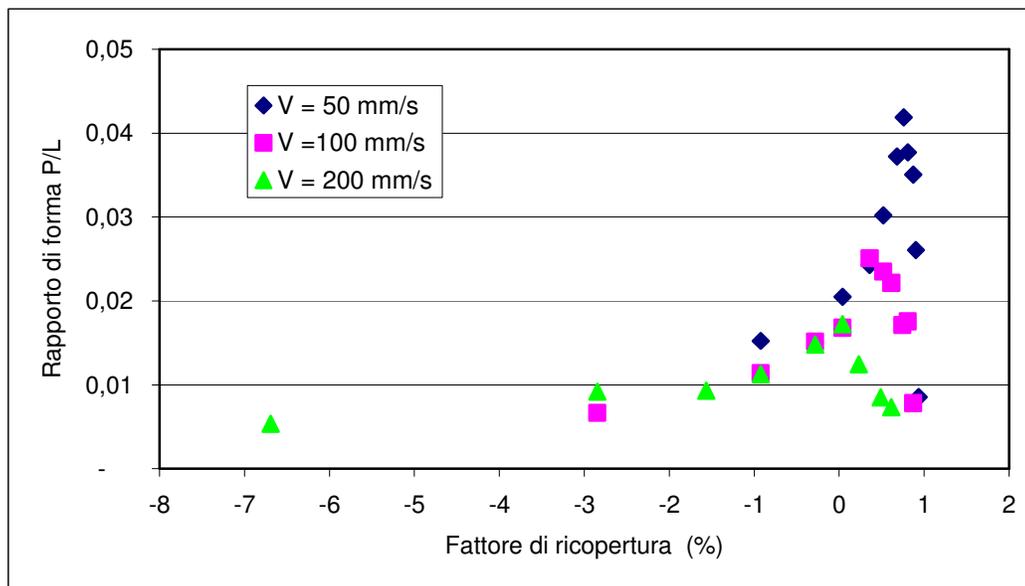


Figura A.54 – Andamento del rapporto di forma al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

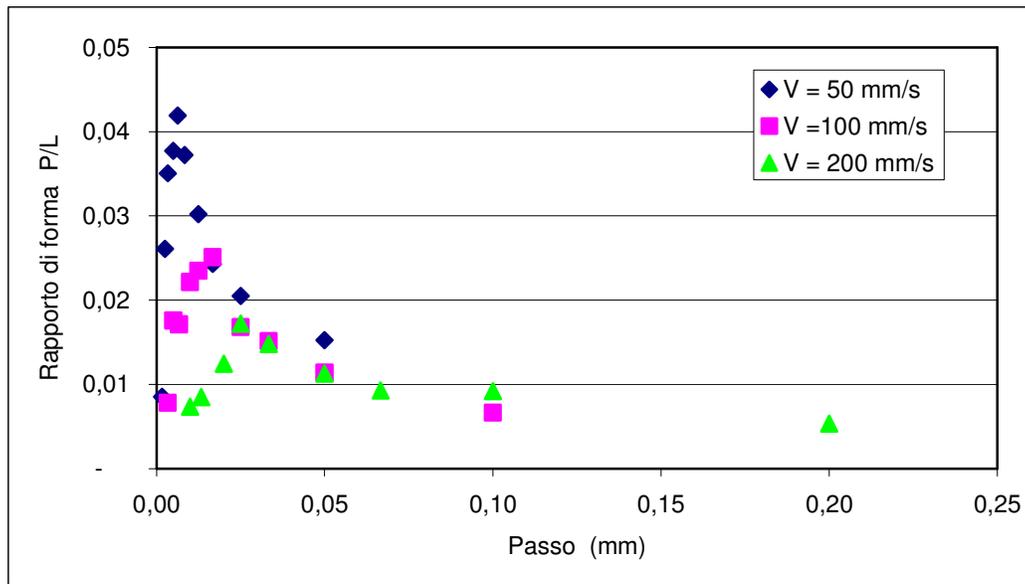


Figura A.55 – Andamento del rapporto di forma al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

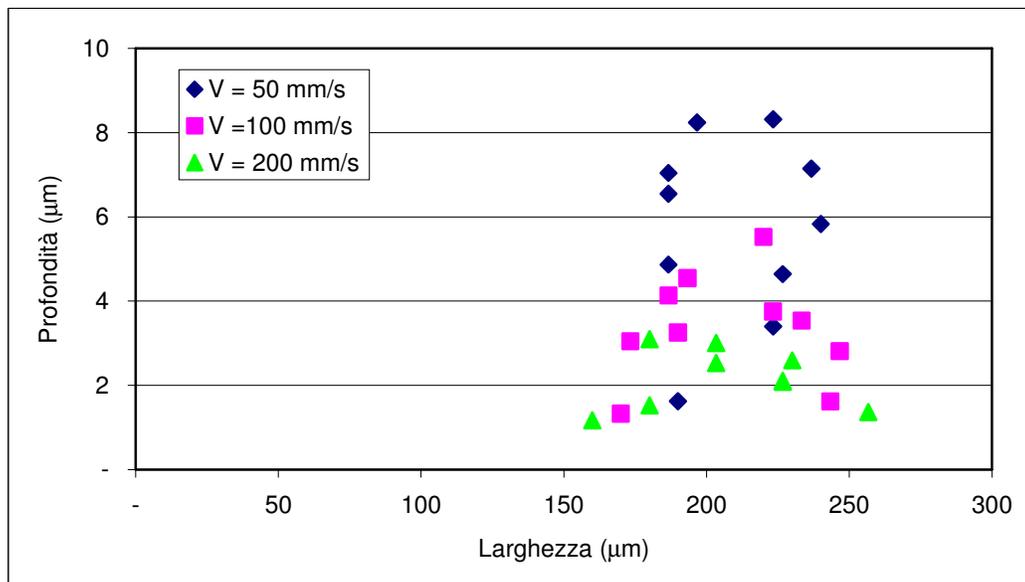


Figura A.56 – Andamento della profondità al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

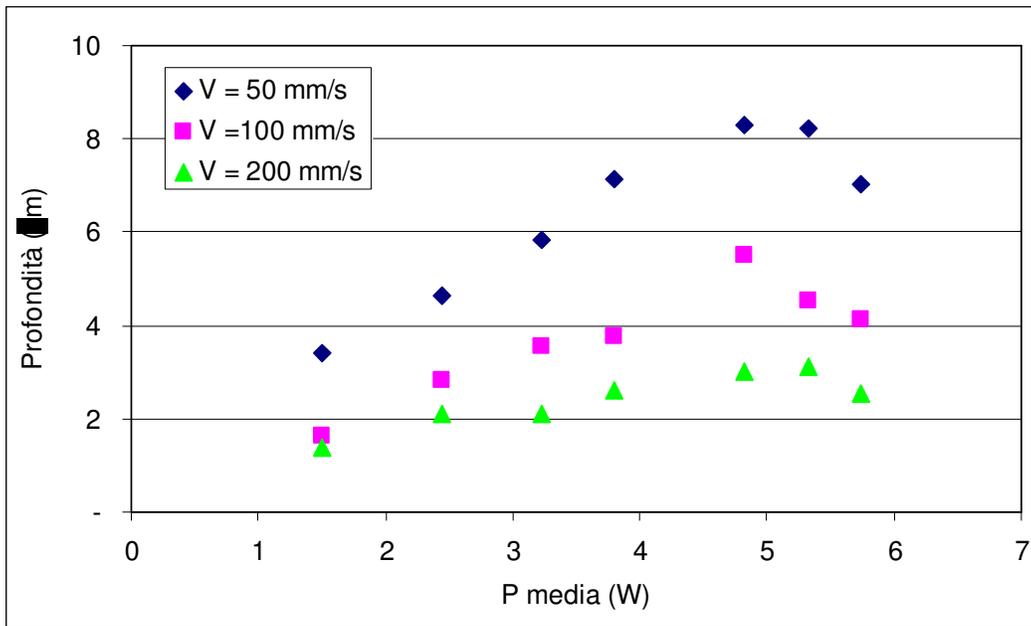


Figura A.57 – Andamento della profondità al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

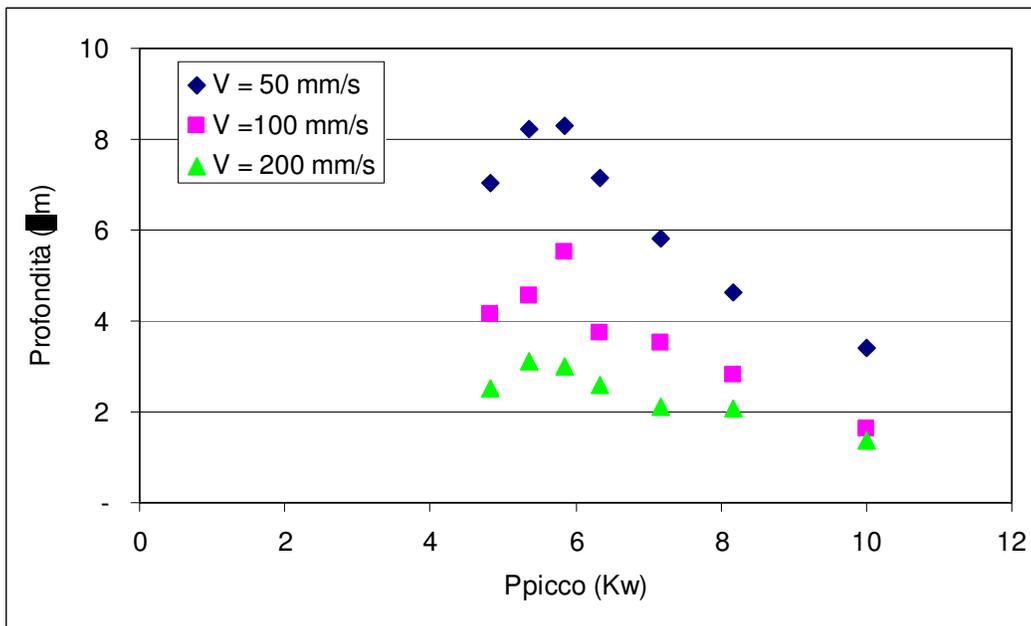


Figura A.58 – Andamento della profondità al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

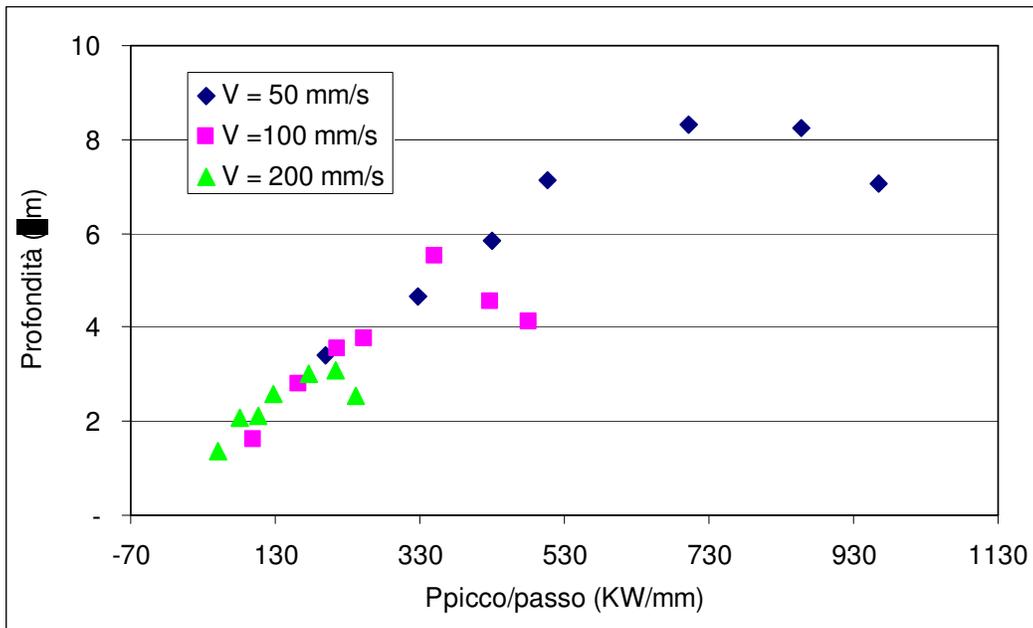


Figura A.59 – Andamento della profondità al variare della potenza di picco/passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

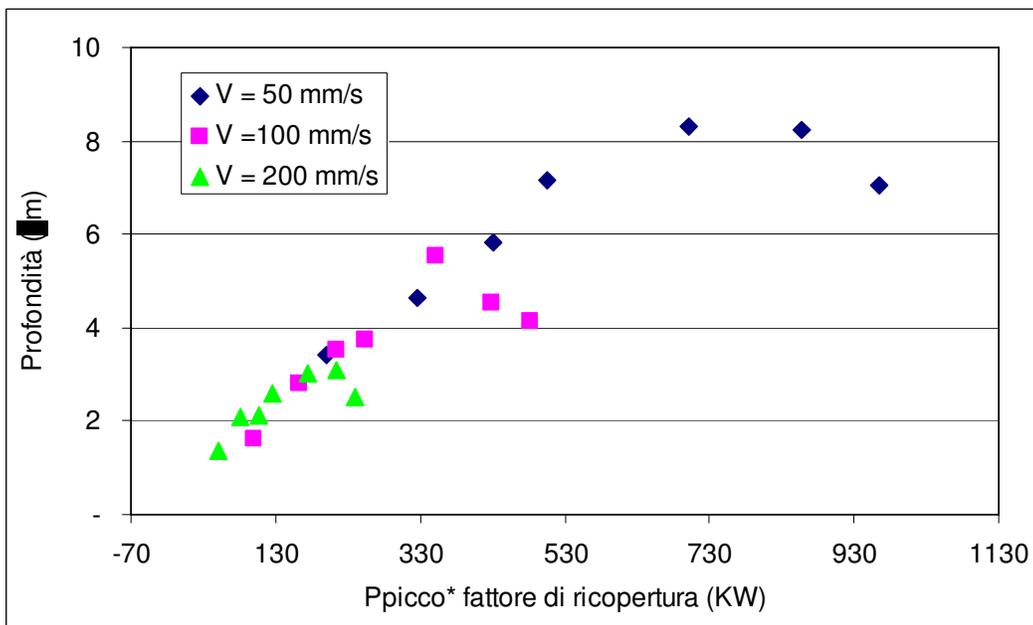


Figura A.60 – Andamento della profondità al variare della potenza di picco x fattore di ricopertura per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

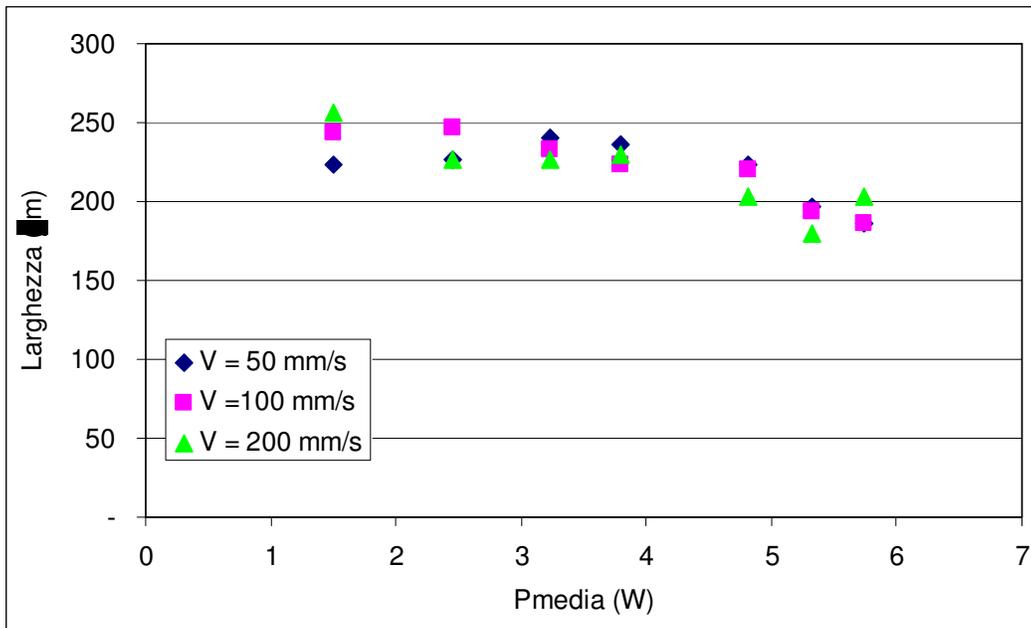


Figura A.61 – Andamento della larghezza al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

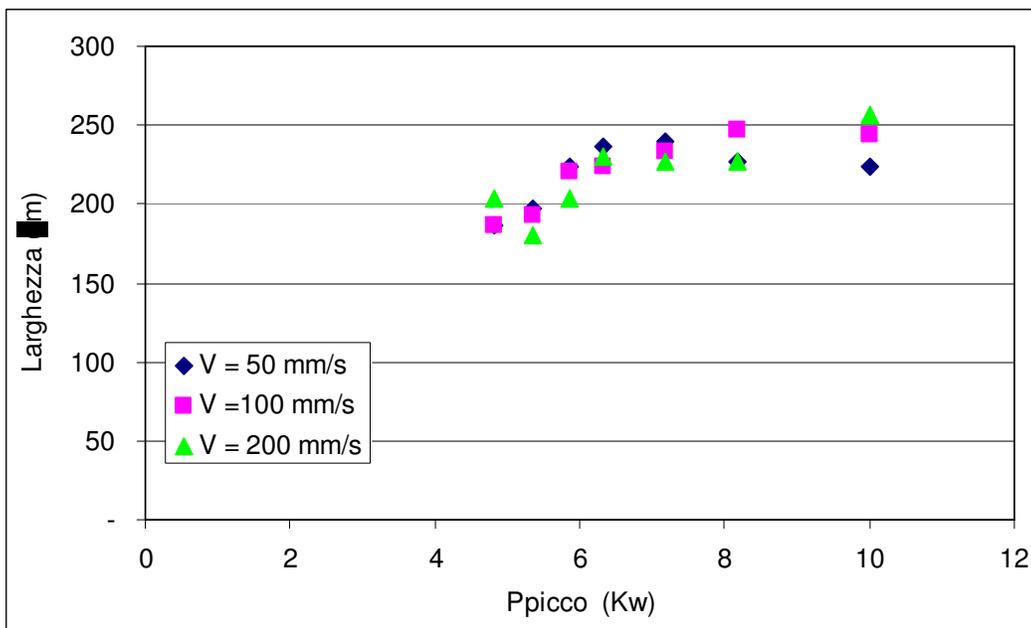


Figura A.62 – Andamento della larghezza al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

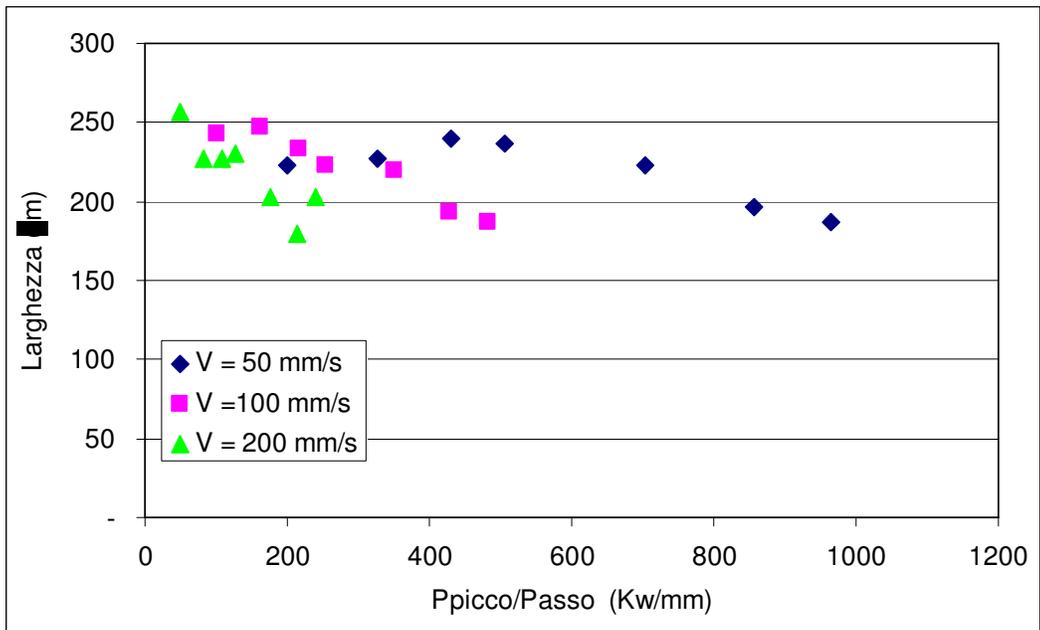


Figura A.63 – Andamento della larghezza al variare della potenza di picco/passato per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 304.

#### A.4 AISI 430 – 15A

In questo paragrafo verranno illustrati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 430, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 15A.

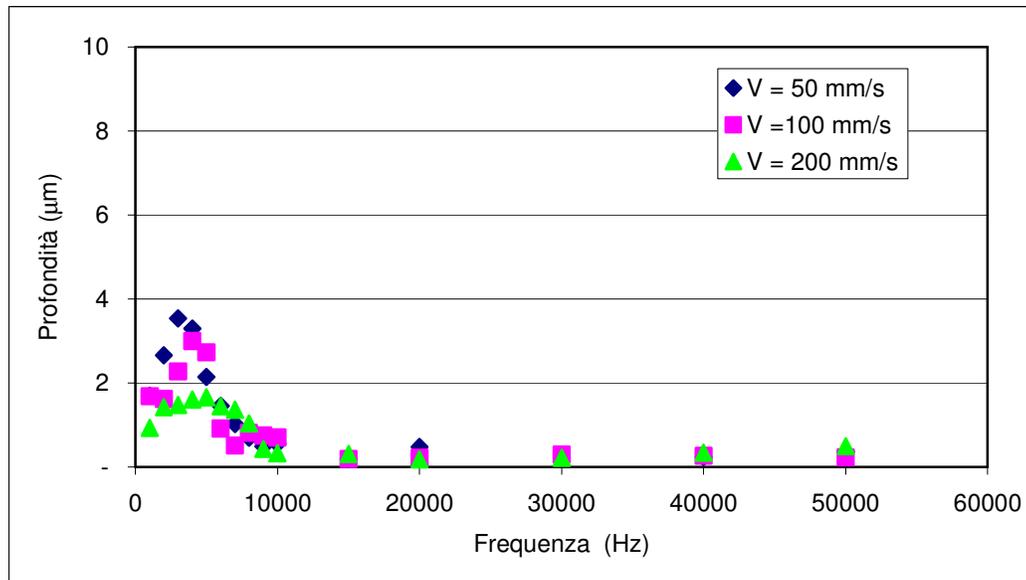


Figura A.64 – Andamento della profondità al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

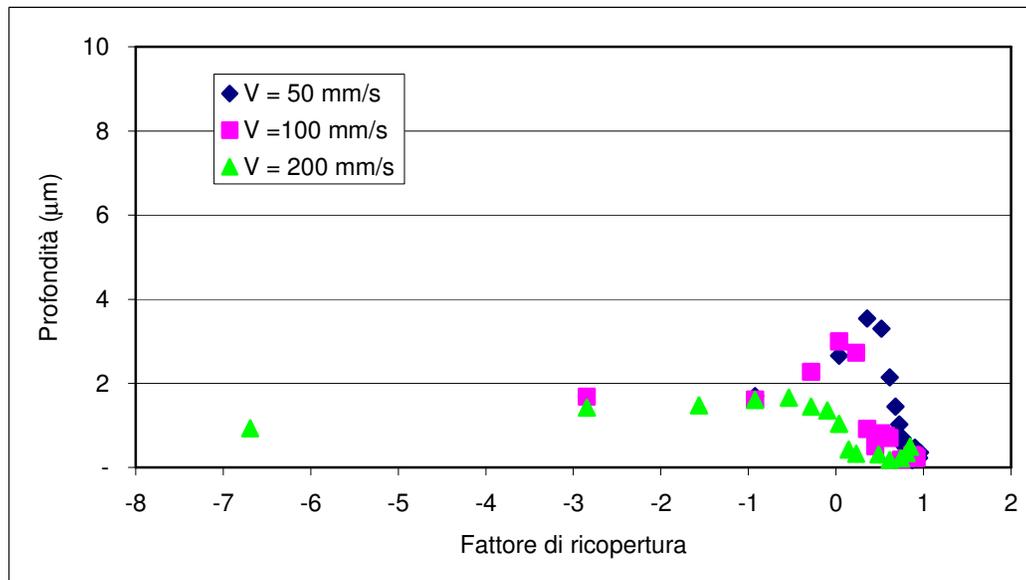


Figura A.65 – Andamento della profondità al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

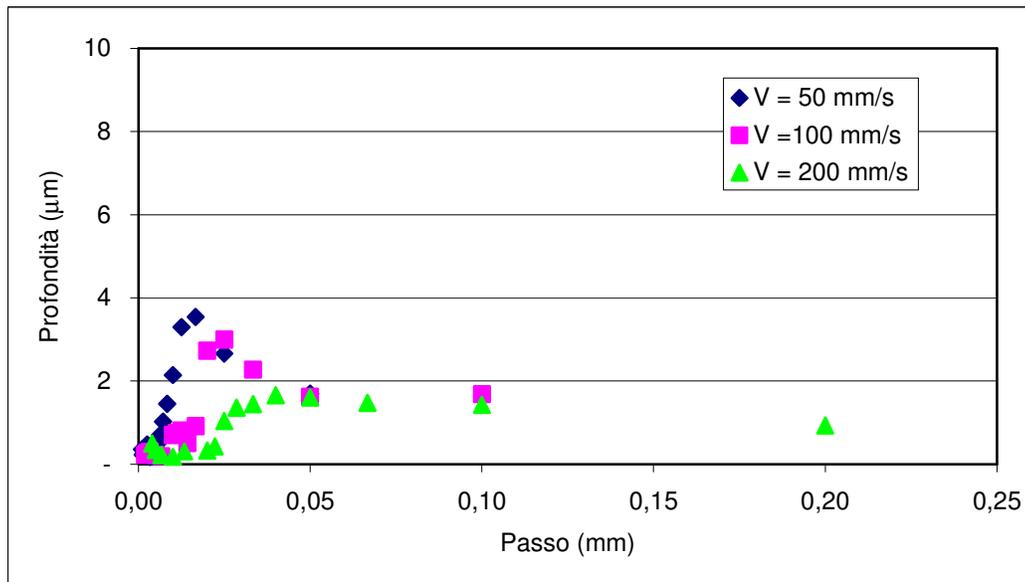


Figura A.66 – Andamento della profondità al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

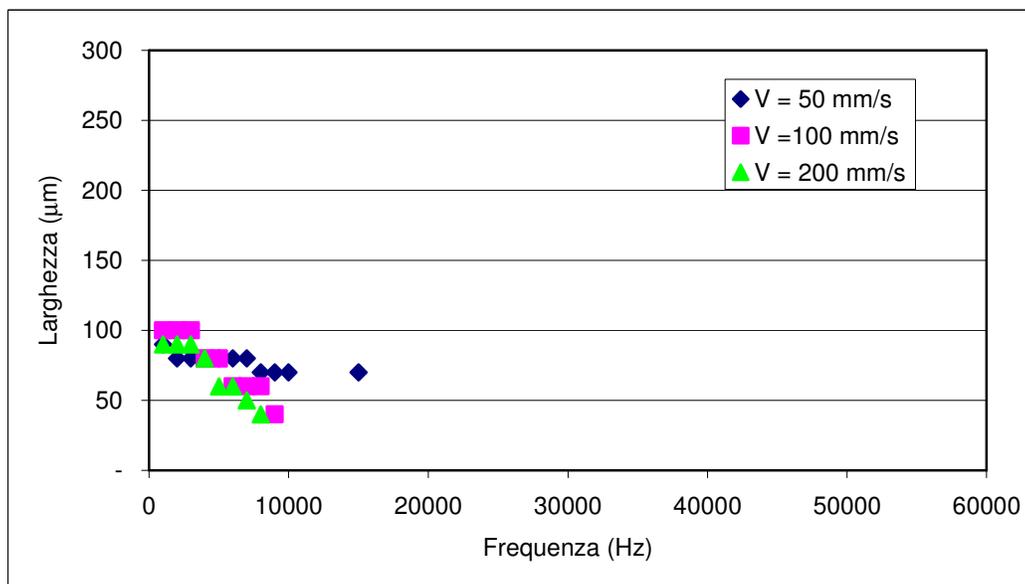


Figura A.67 – Andamento della larghezza al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

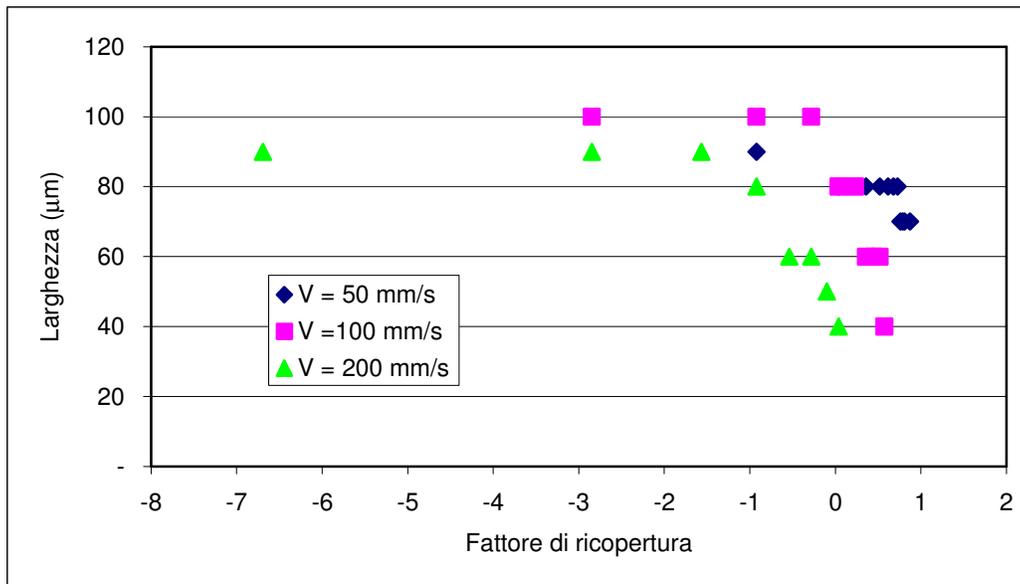


Figura A.68 – Andamento della larghezza al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

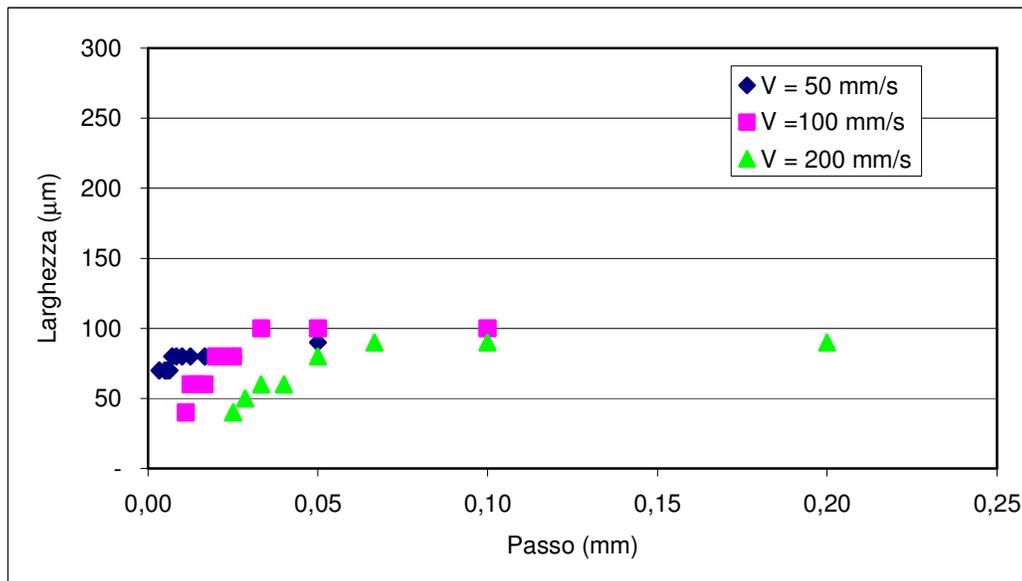


Figura A.69 – Andamento della larghezza al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

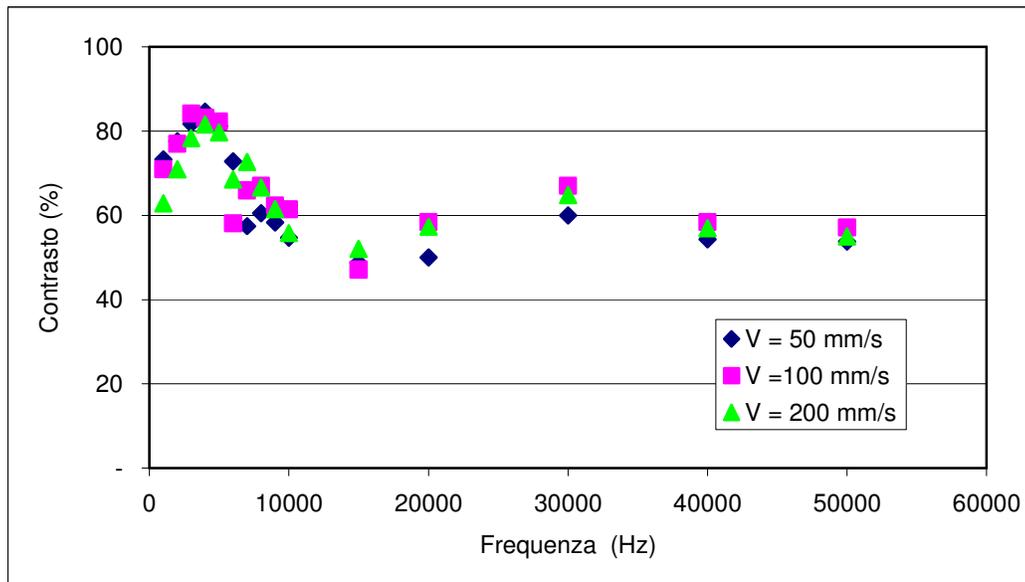


Figura A.70 – Andamento del contrasto al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

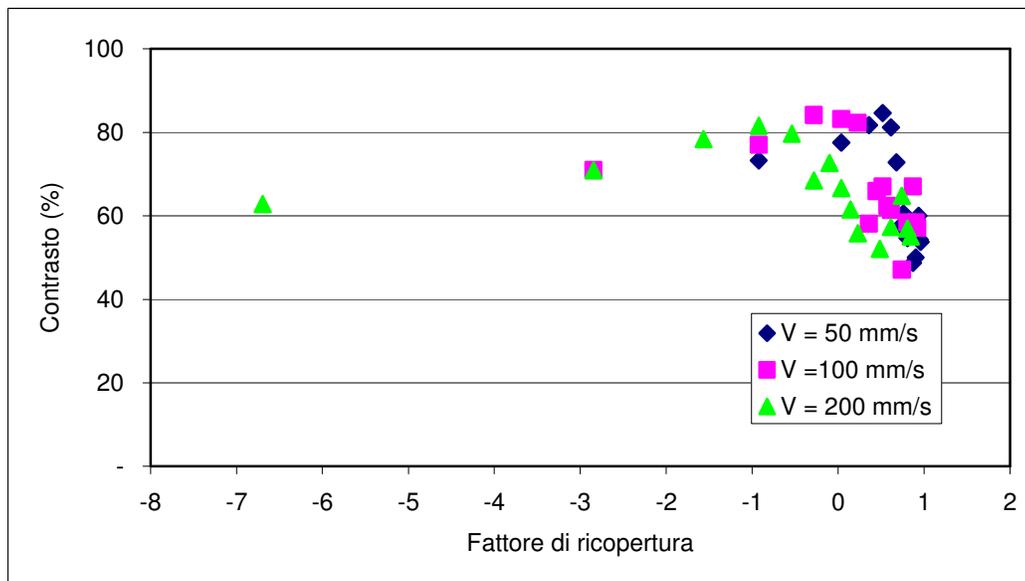


Figura A.71 – Andamento del contrasto al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

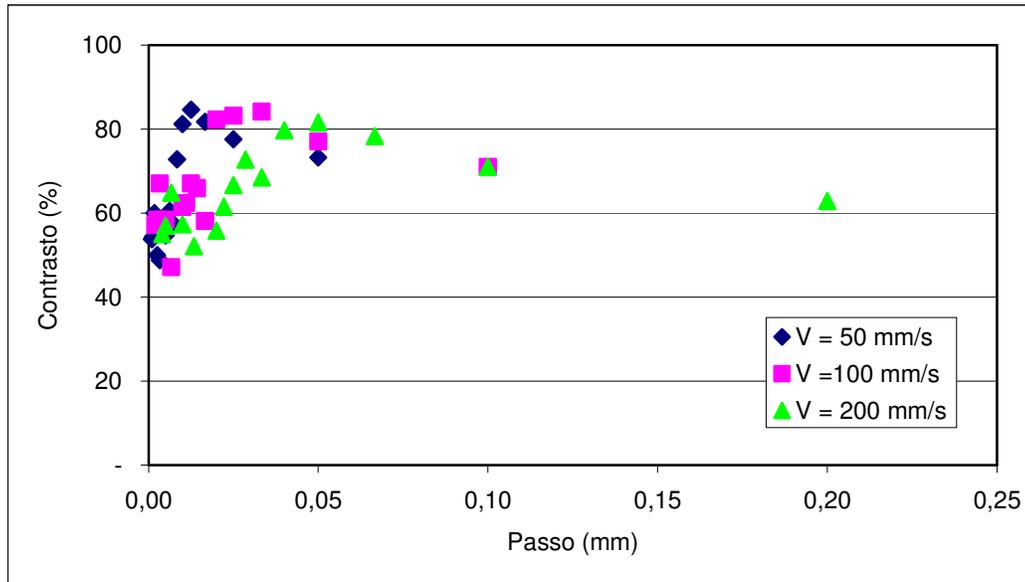


Figura A.72 – Andamento del contrasto al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

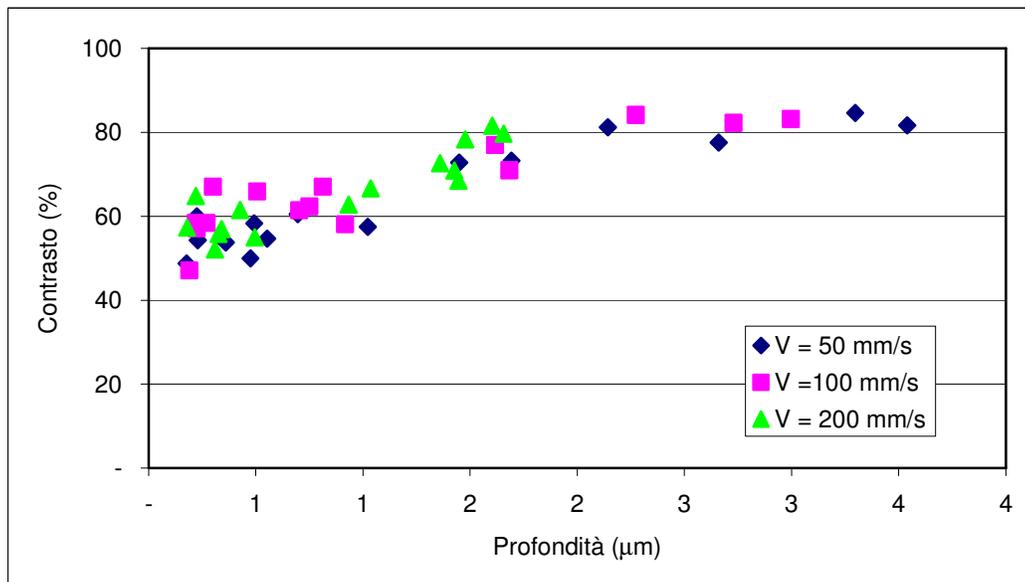


Figura A.73 – Andamento del contrasto al variare della profondità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

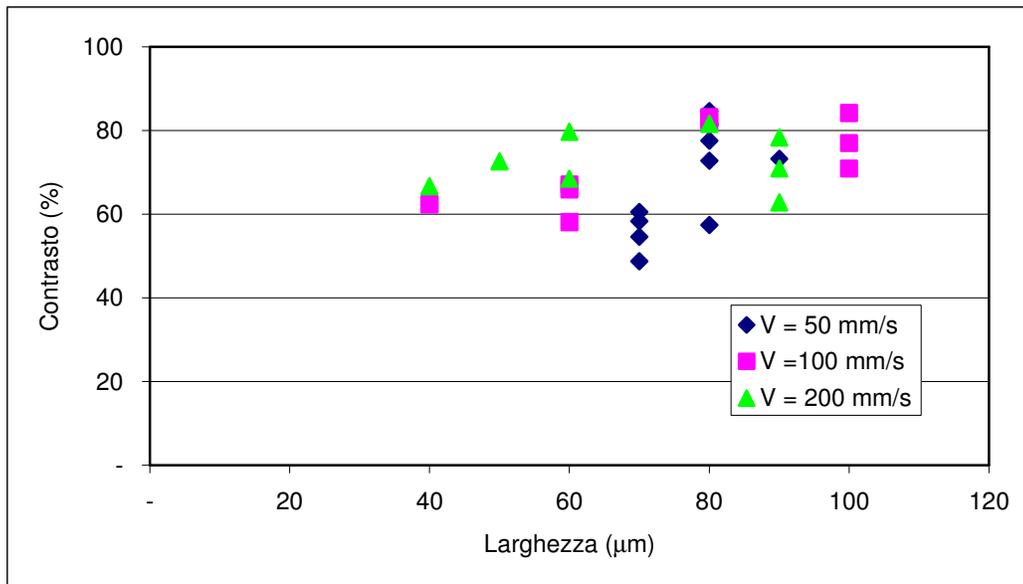


Figura A.74 – Andamento del contrasto al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

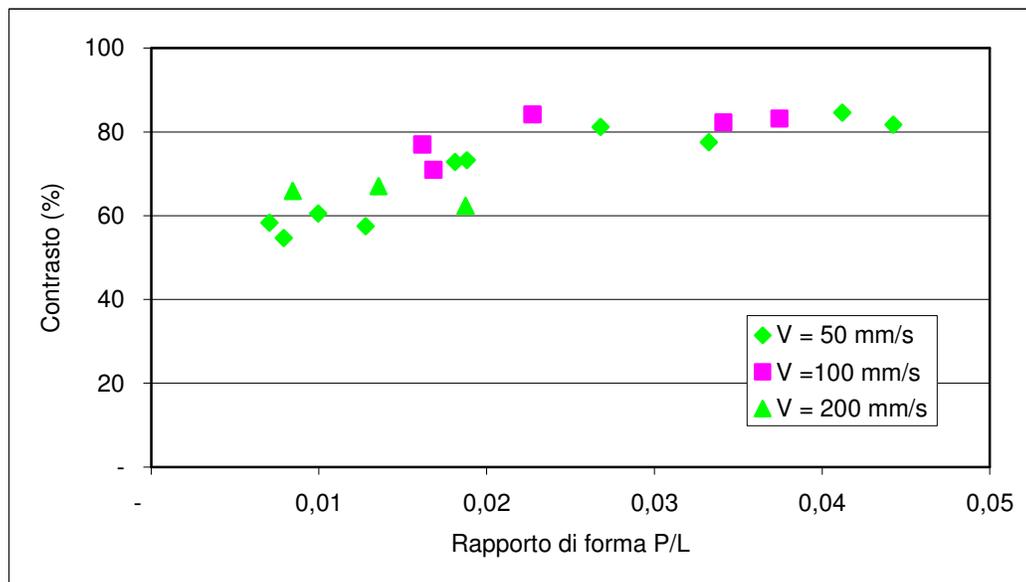


Figura A.75 – Andamento del contrasto al variare del rapporto di forma per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

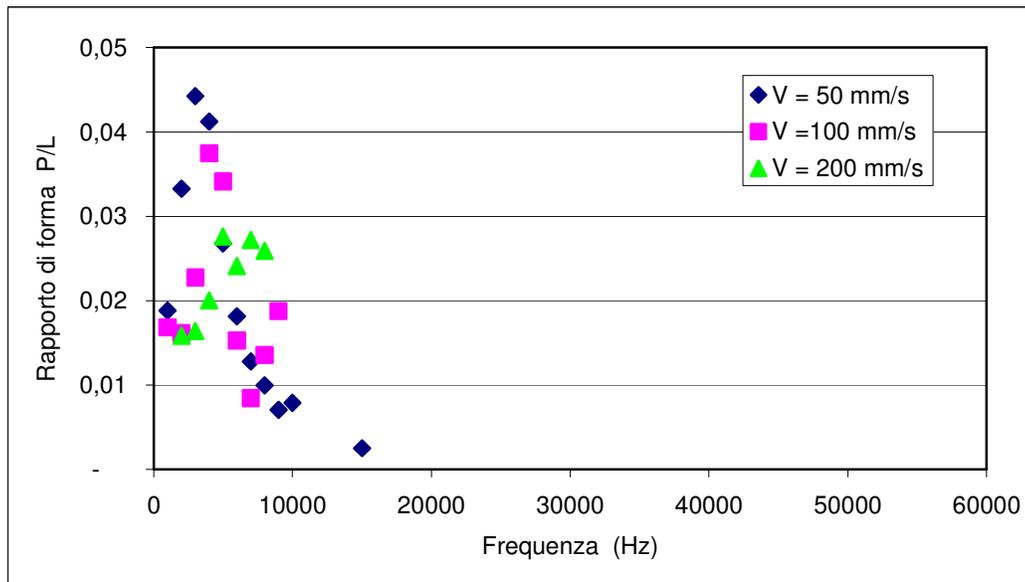


Figura A.76 – Andamento del rapporto di forma al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

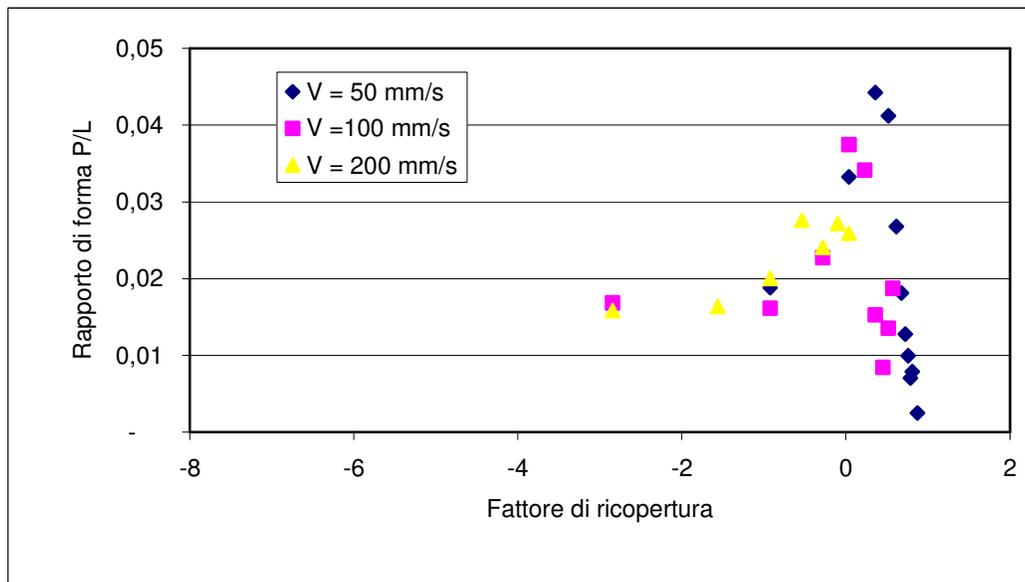


Figura A.77 – Andamento del rapporto di forma al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

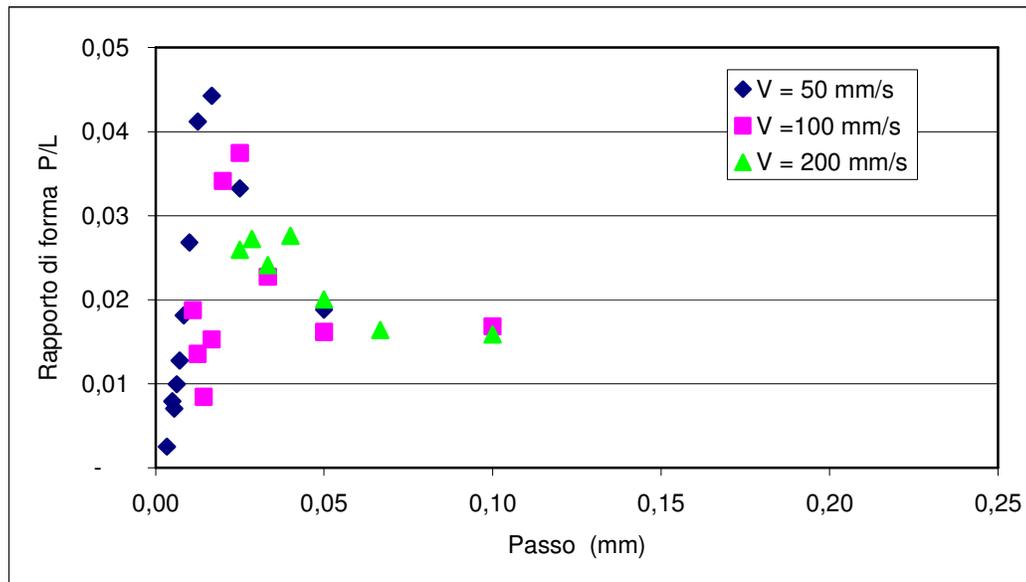


Figura A.78 – Andamento del rapporto di forma al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

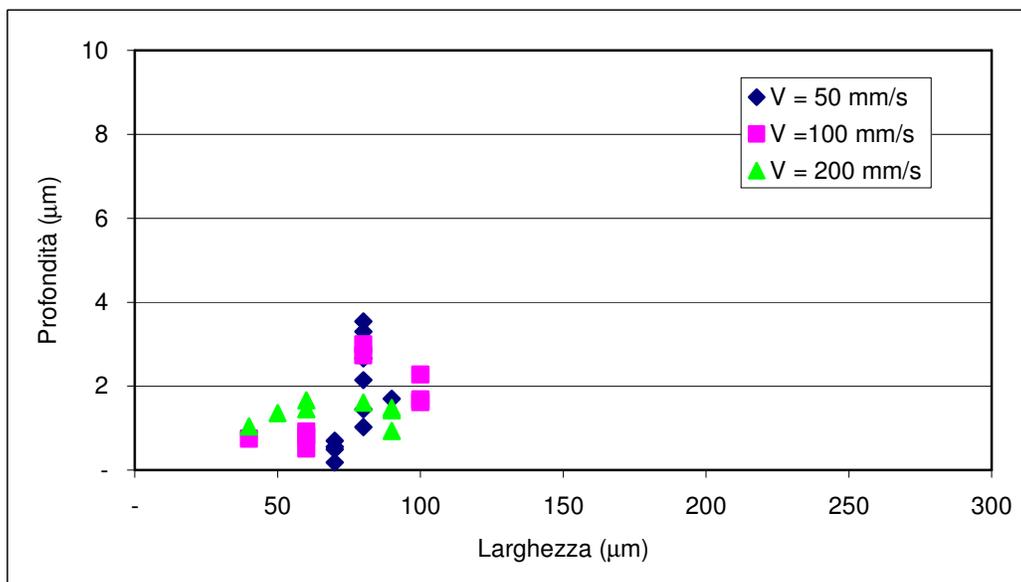


Figura A.79 – Andamento della profondità al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 15A, su acciaio AISI 430.

## A.5 AISI 430 – 25A

In questo paragrafo verranno illustrati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 430, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 25A.

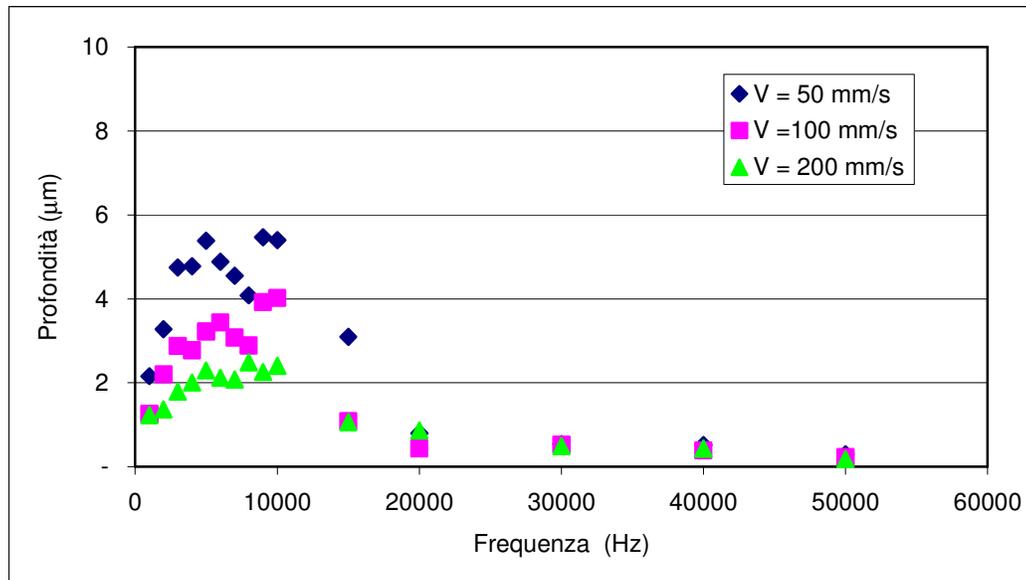


Figura A.80 – Andamento della profondità del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

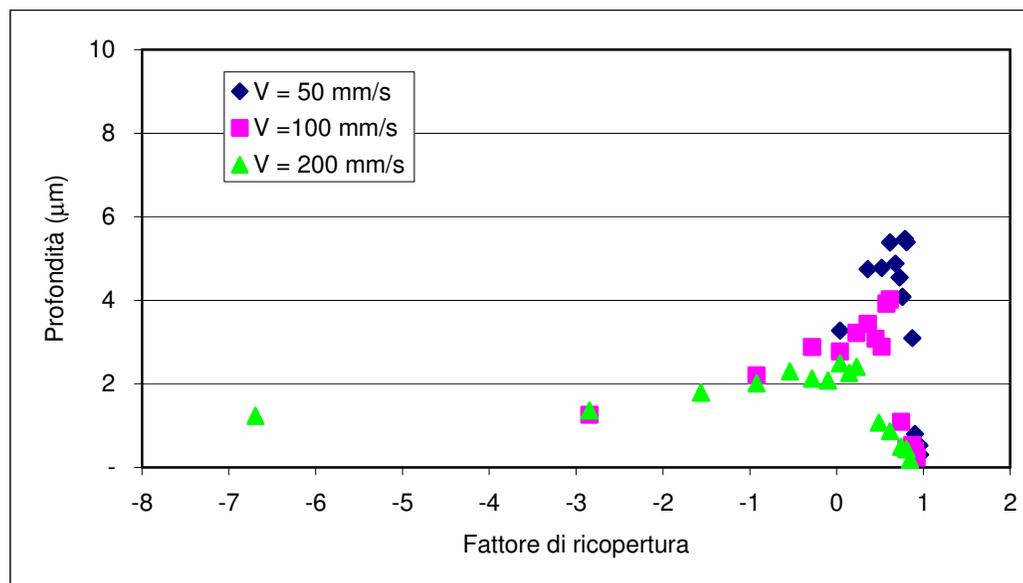


Figura A.81 – Andamento della profondità del solco al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

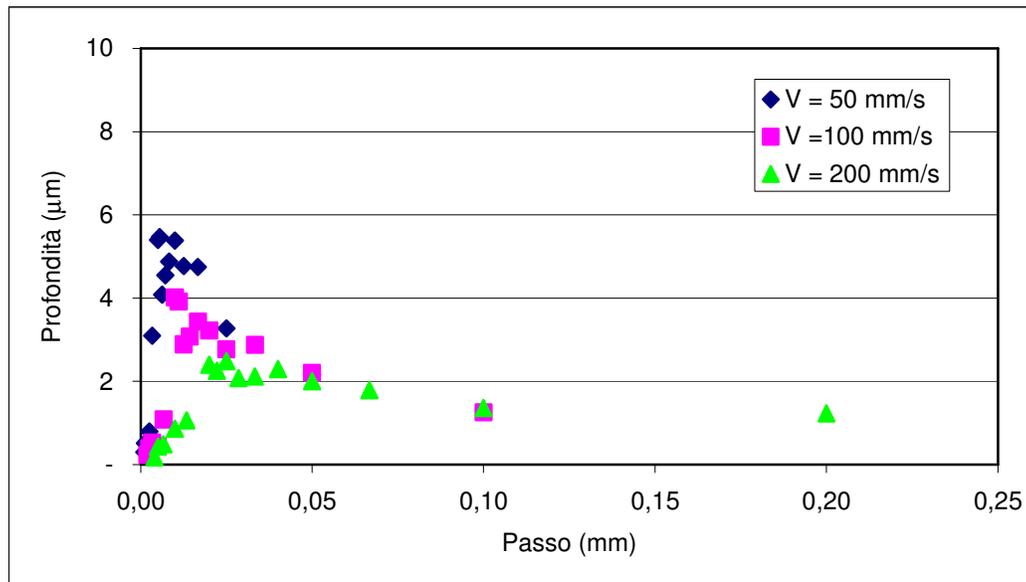


Figura A.82 – Andamento della profondità del solco al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

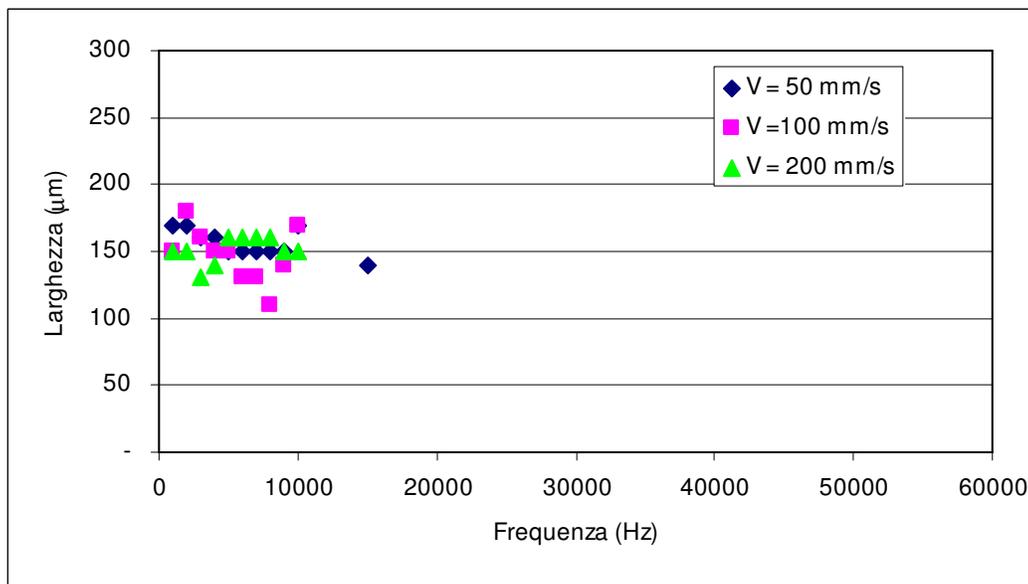


Figura A.83 – Andamento della larghezza del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

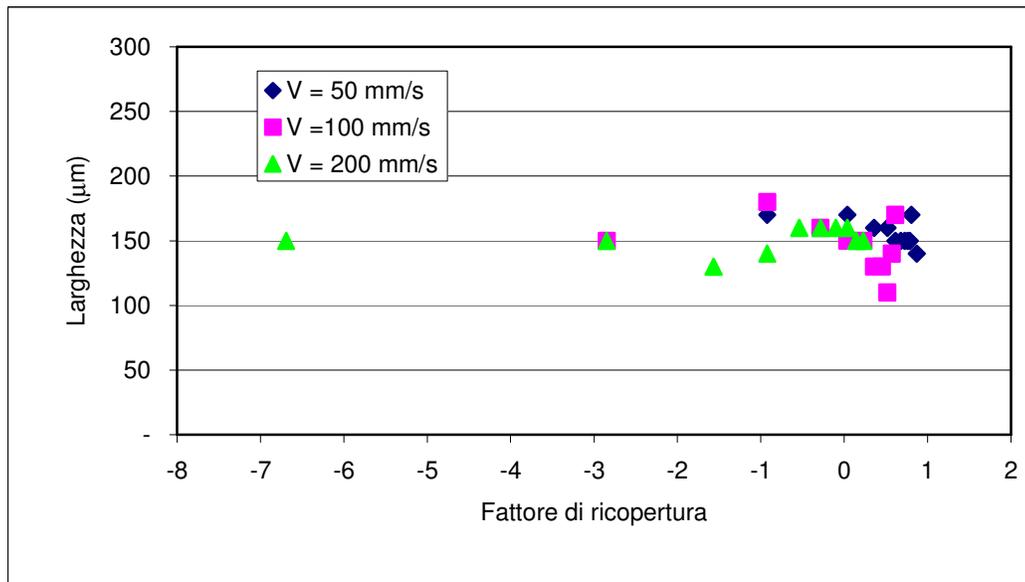


Figura A.84 – Andamento della larghezza del solco al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

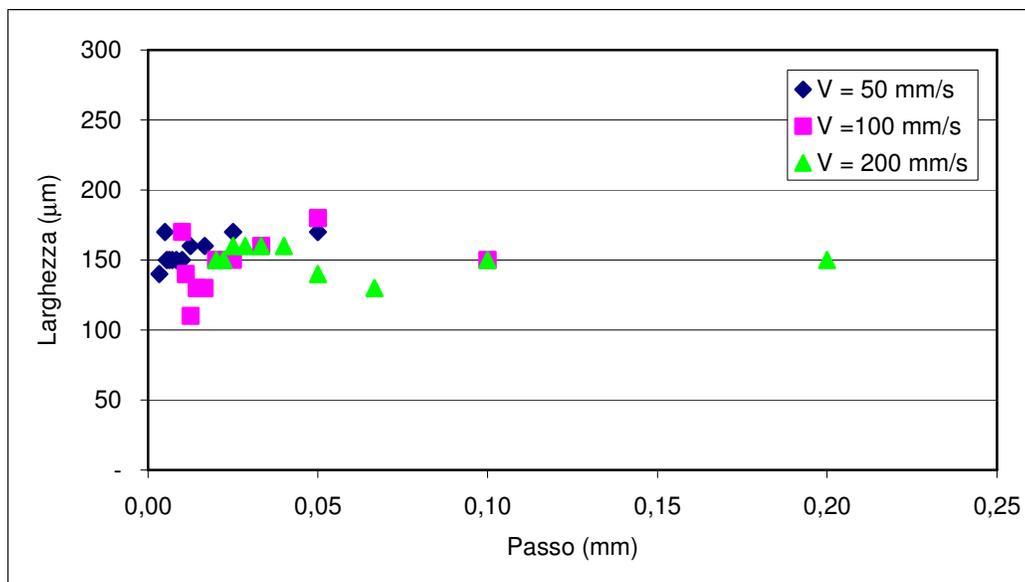


Figura A.85 – Andamento della larghezza del solco al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

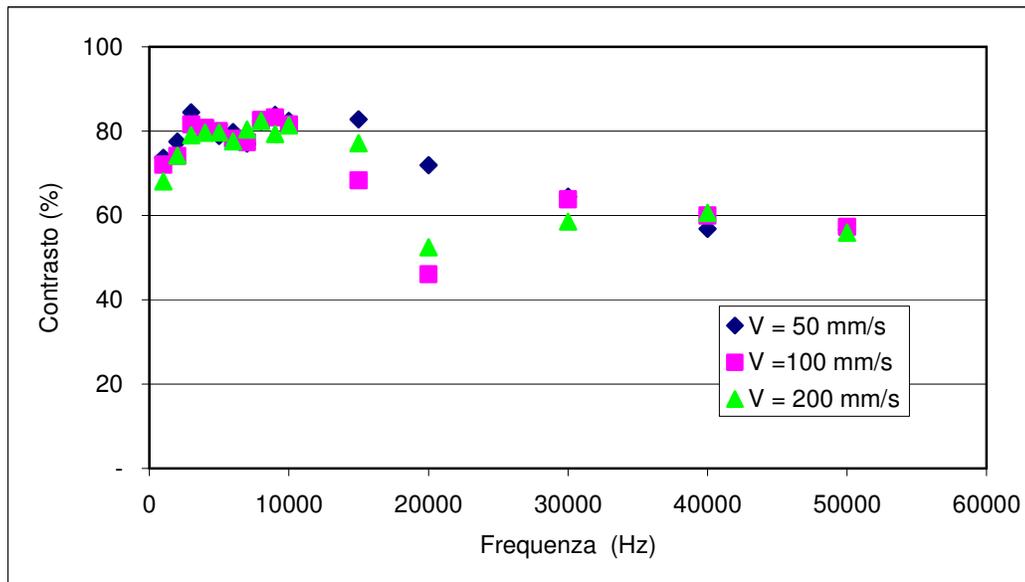


Figura A.86 – Andamento del contrasto al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

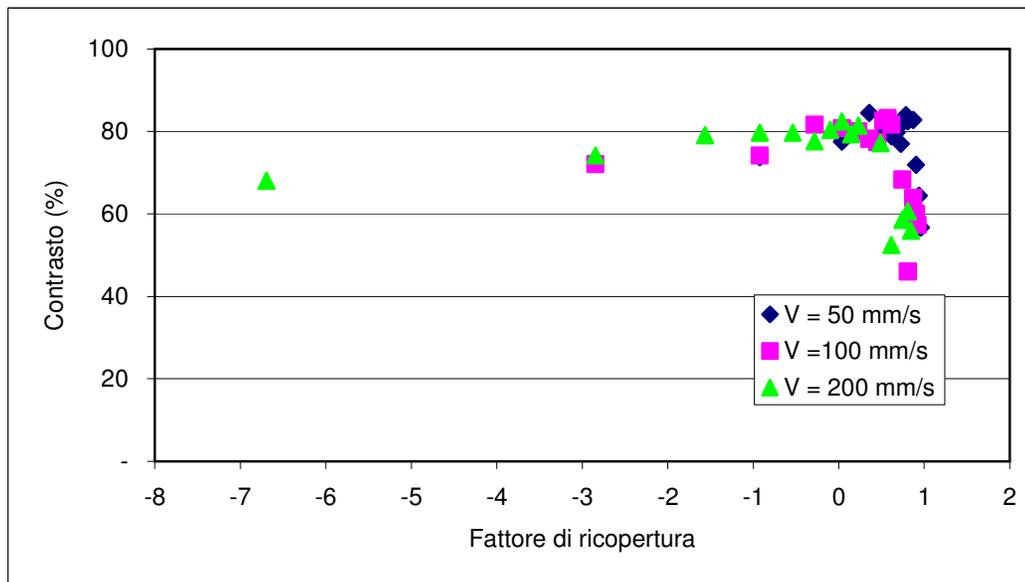


Figura A.87 – Andamento del contrasto al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

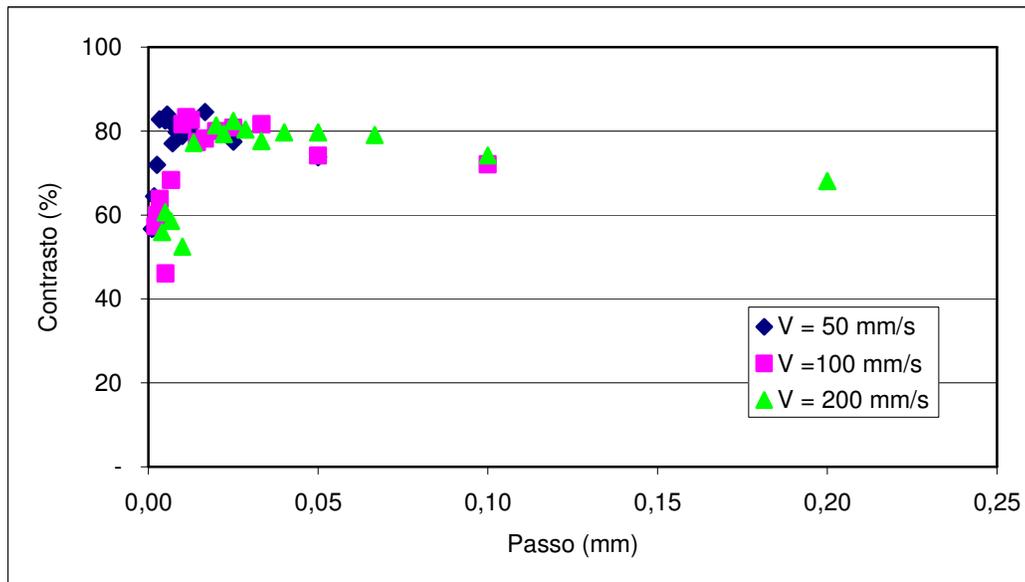


Figura A.88 – Andamento del contrasto al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

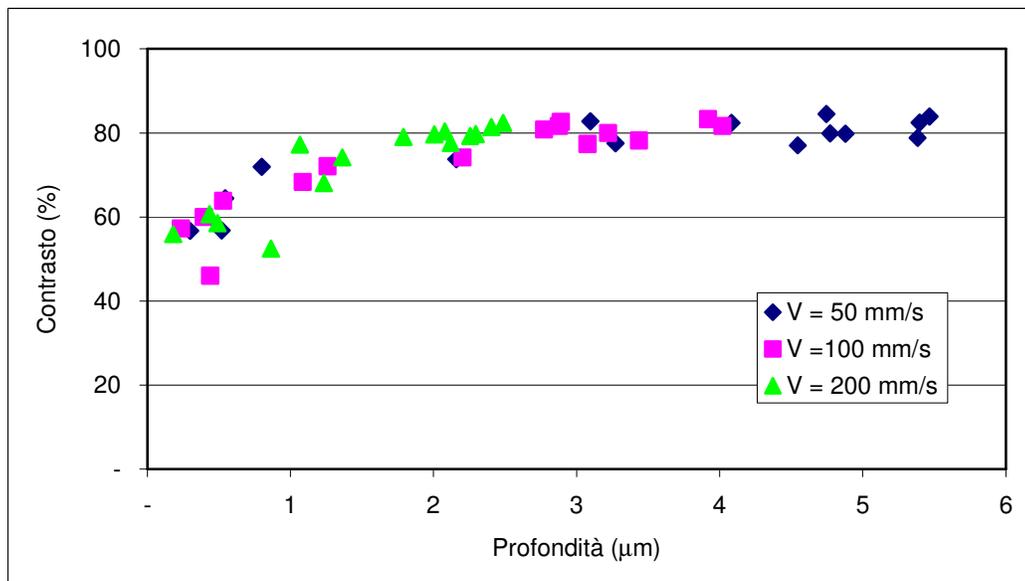


Figura A.89 – Andamento del contrasto al variare della profondità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

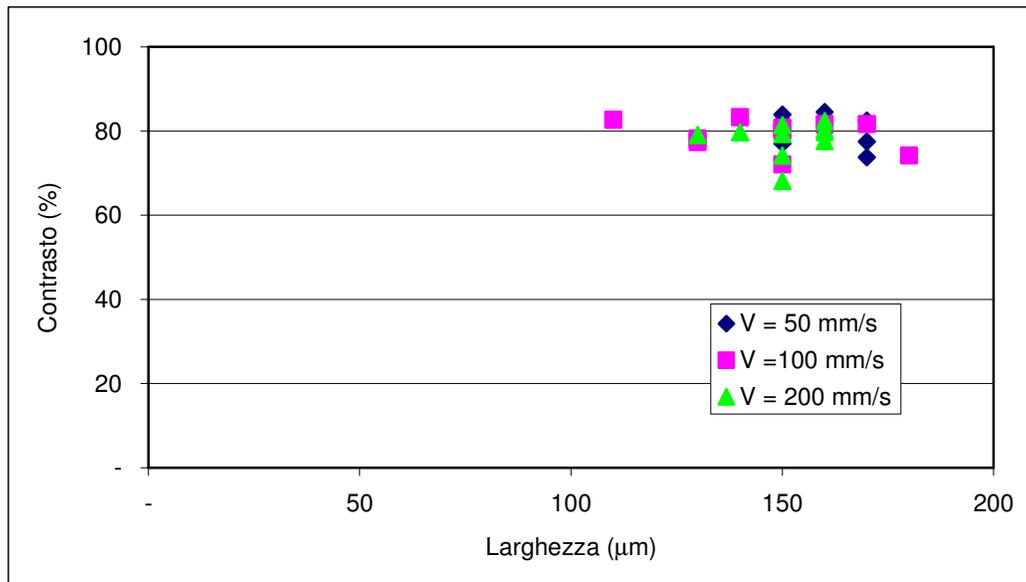


Figura A.90 – Andamento del contrasto al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

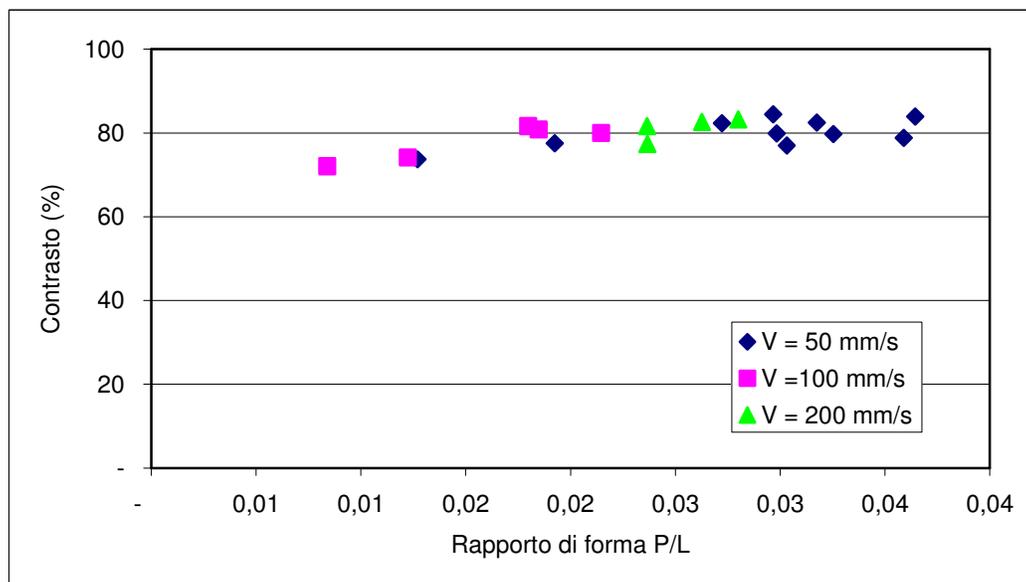


Figura A.91 – Andamento del contrasto al variare del rapporto di forma per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

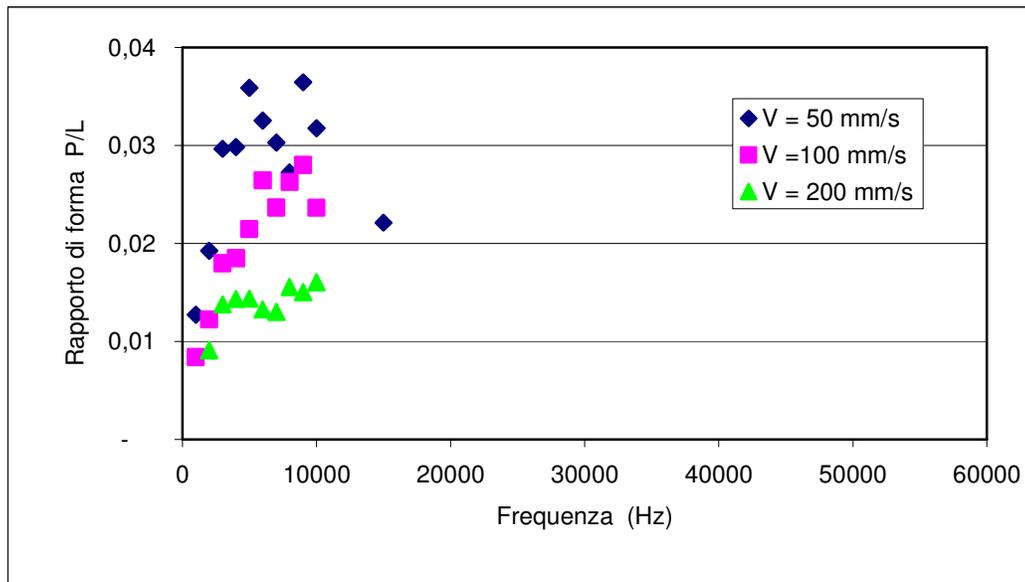


Figura A.92 – Andamento del rapporto di forma al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.

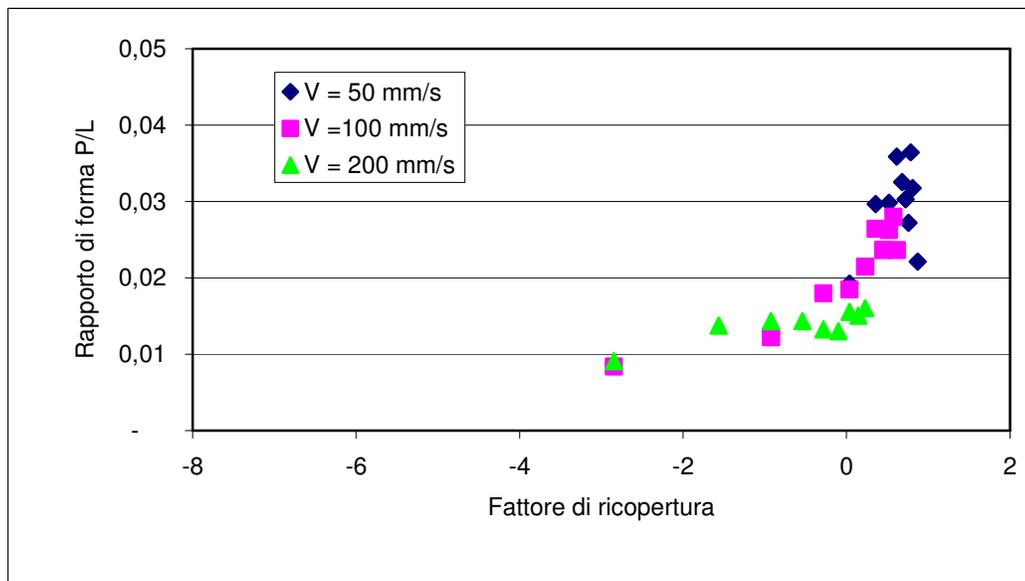


Figura A.93 – Andamento del rapporto di forma al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 25A, su acciaio AISI 430.



## A.6 AISI 430 – 35A

In questo paragrafo verranno illustrati i risultati conseguiti sull'acciaio AISI 430, avendo utilizzato una corrente di alimentazione dei diodi di 35A.

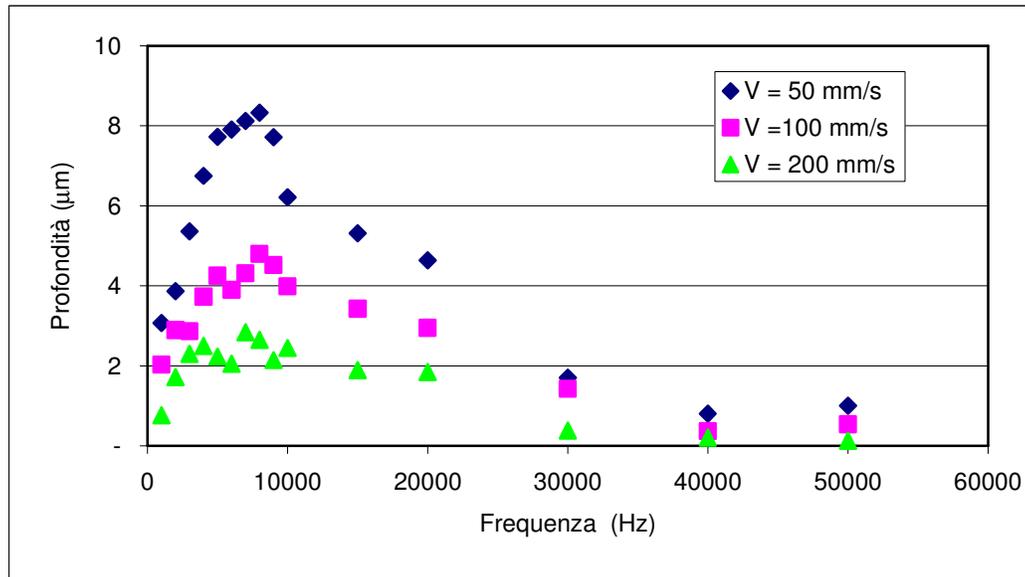


Figura A.96 – Andamento della profondità del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

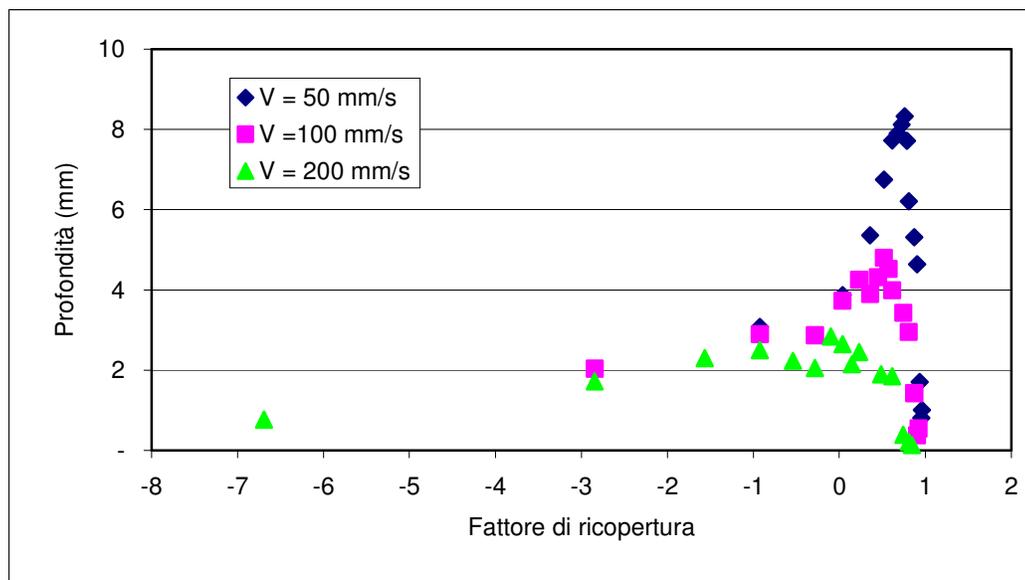


Figura A.97 – Andamento della profondità del solco al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

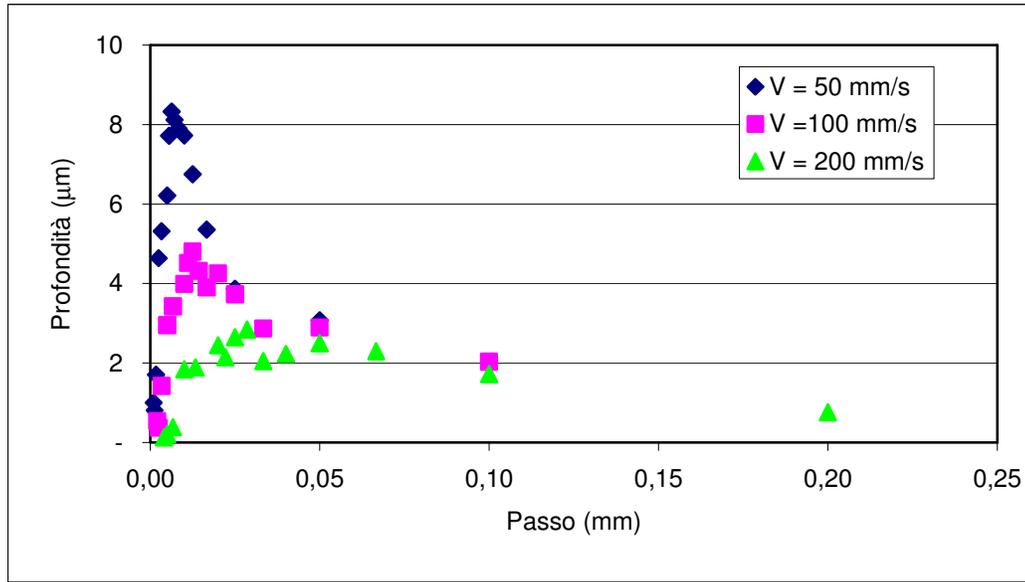


Figura A. 98 – Andamento della profondità del solco al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

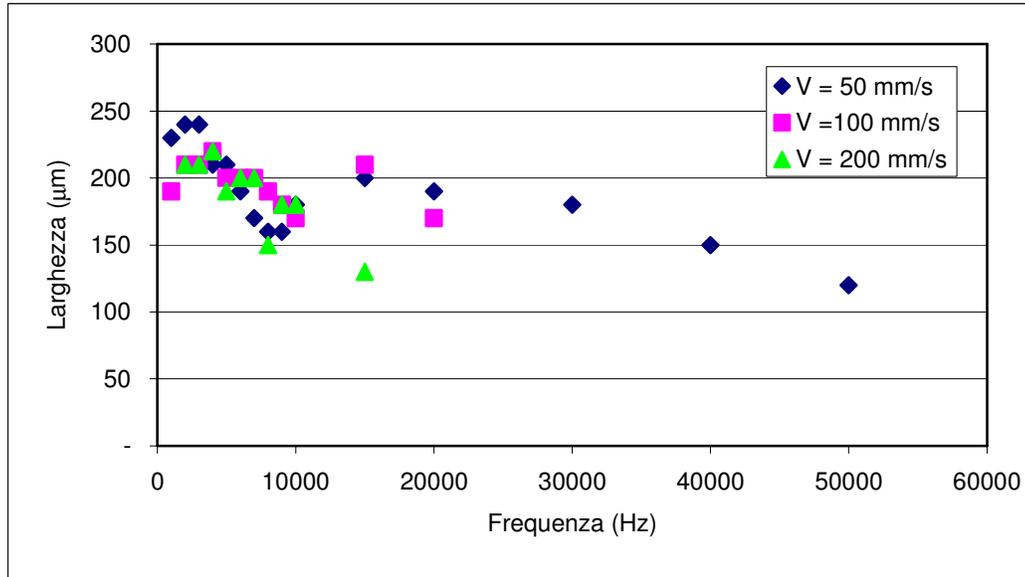


Figura A.99 – Andamento della larghezza del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

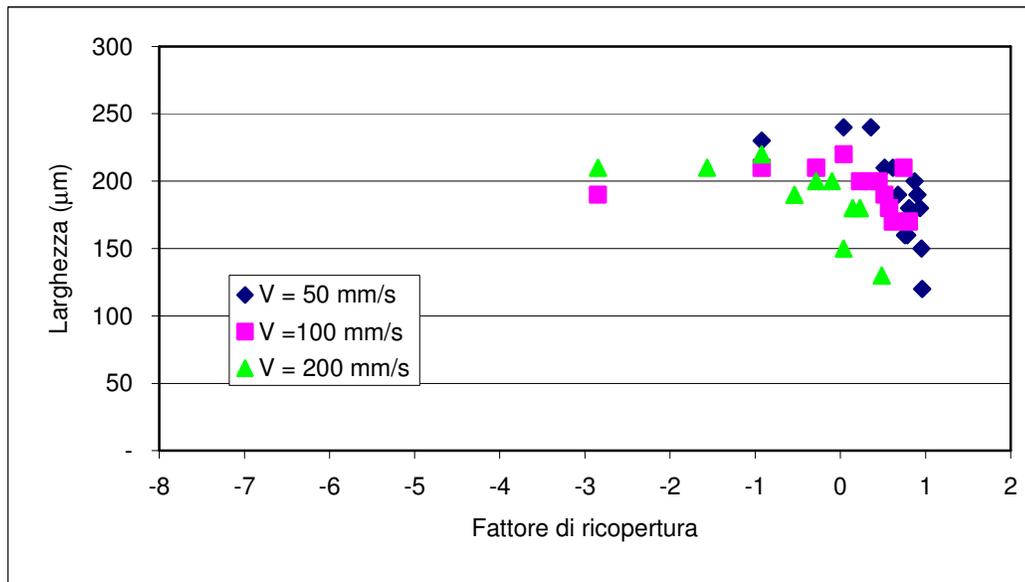


Figura A.100 – Andamento della larghezza del solco al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

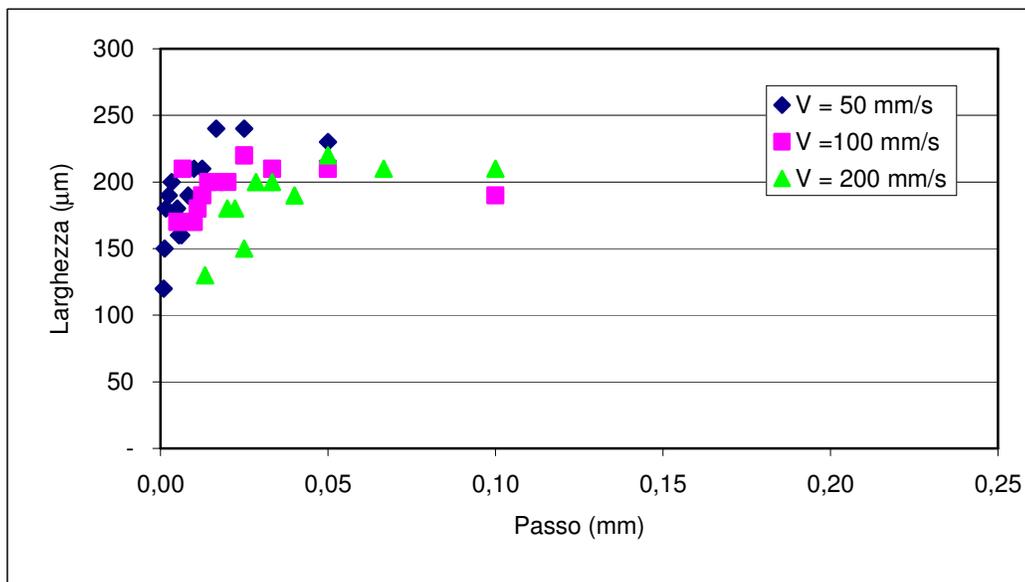


Figura A.101 – Andamento della larghezza del solco al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

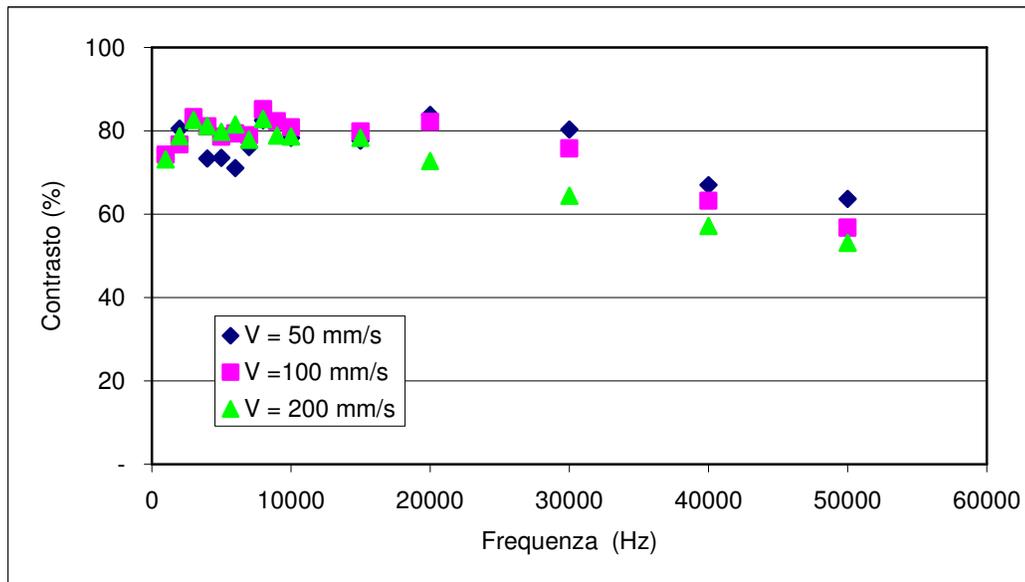


Figura A.102 – Andamento del contrasto del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

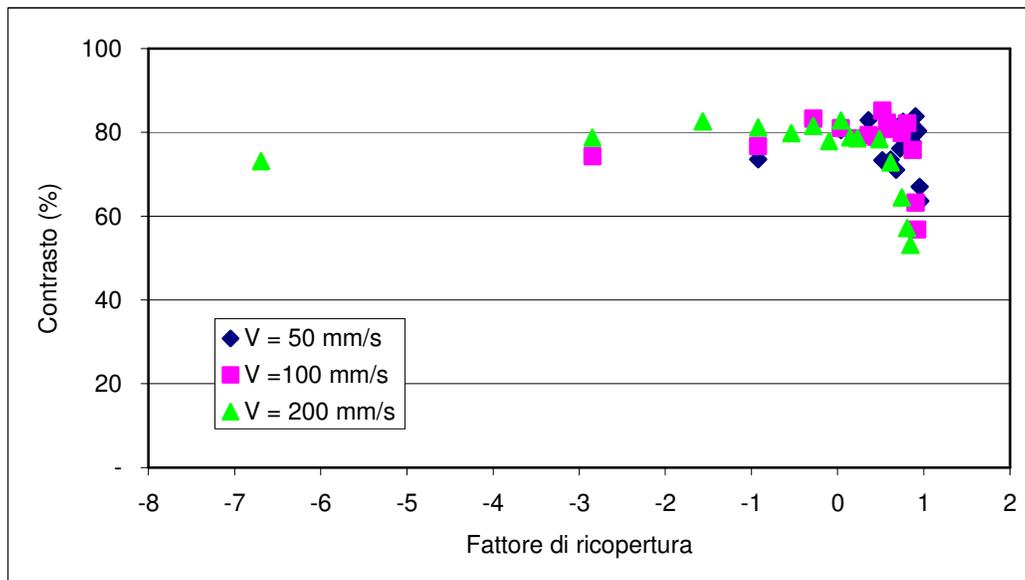


Figura A.103 – Andamento del contrasto del solco al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

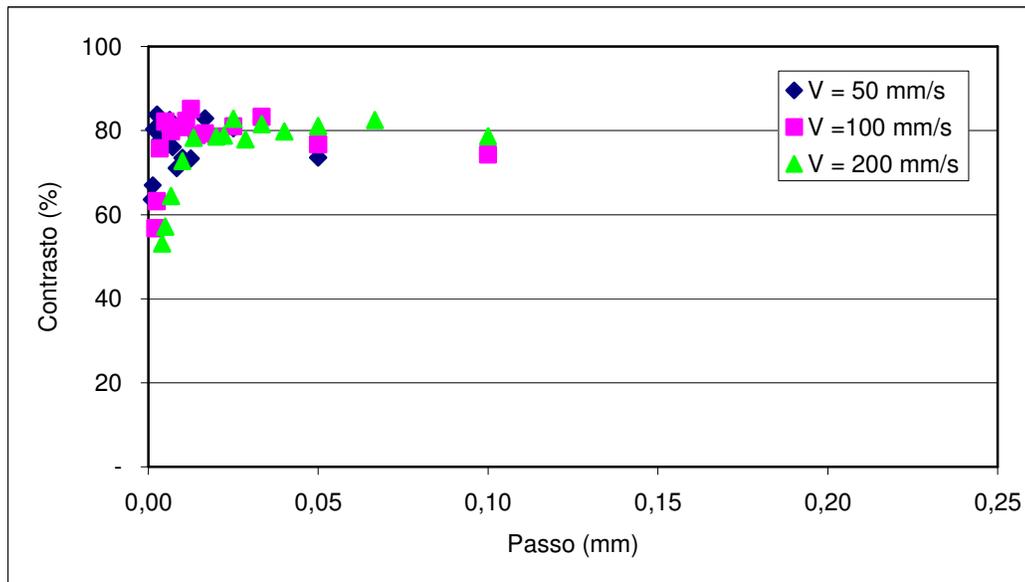


Figura A.104 – Andamento del contrasto del solco al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

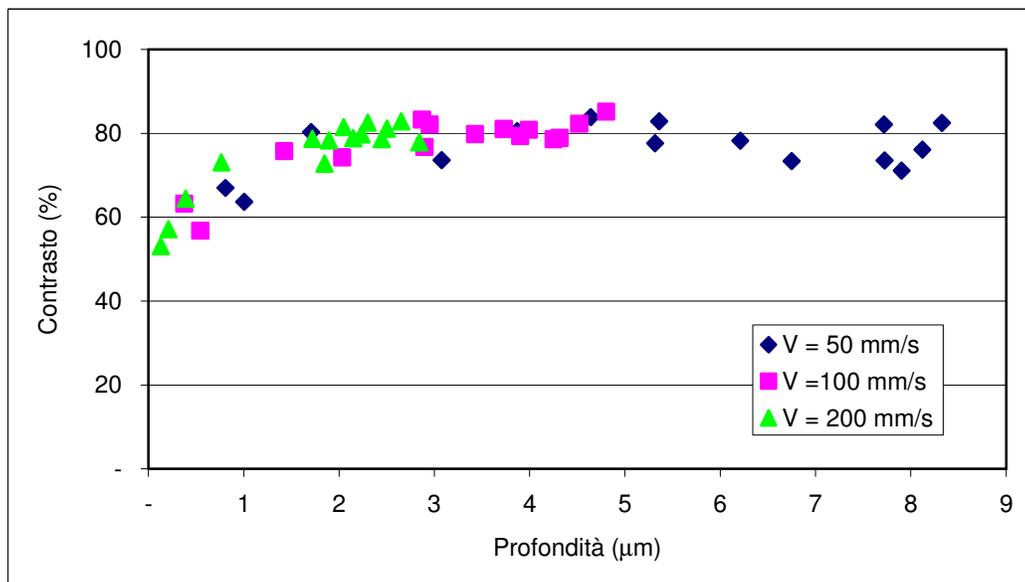


Figura A.105 – Andamento del contrasto del solco al variare della profondità per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

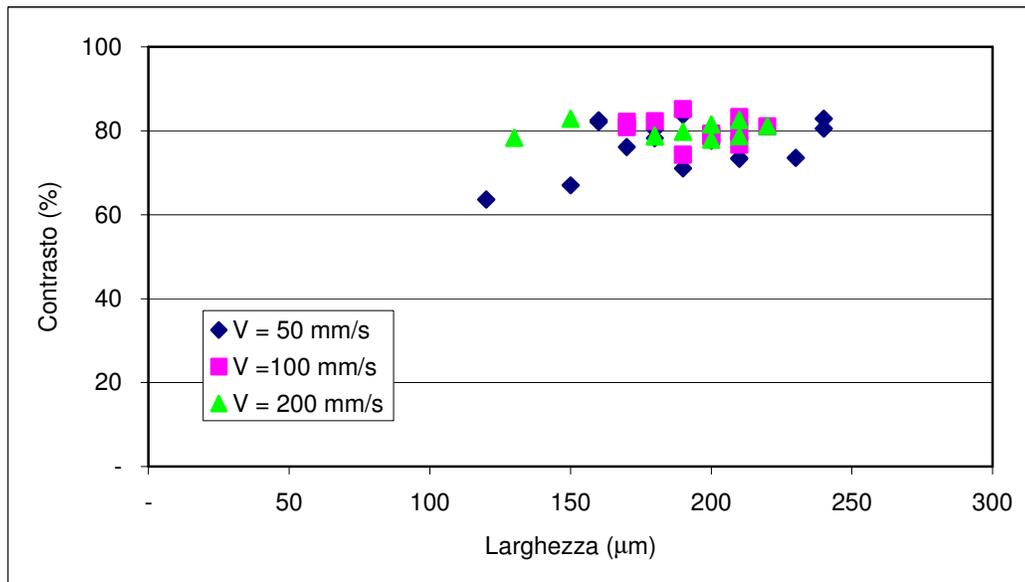


Figura A.106 – Andamento del contrasto del solco al variare della larghezza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

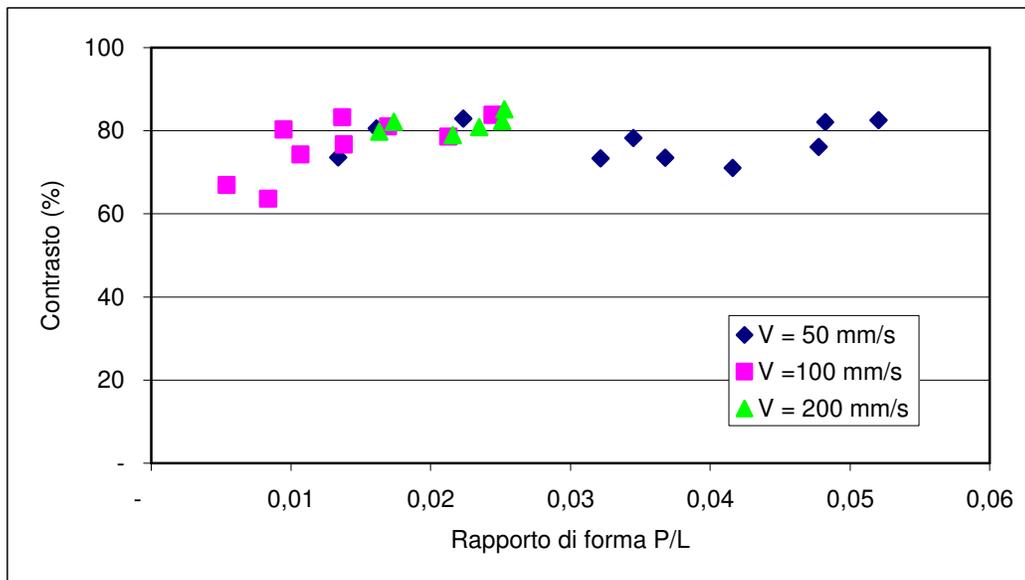


Figura A.107 – Andamento del contrasto del solco al variare del rapporto di forma per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

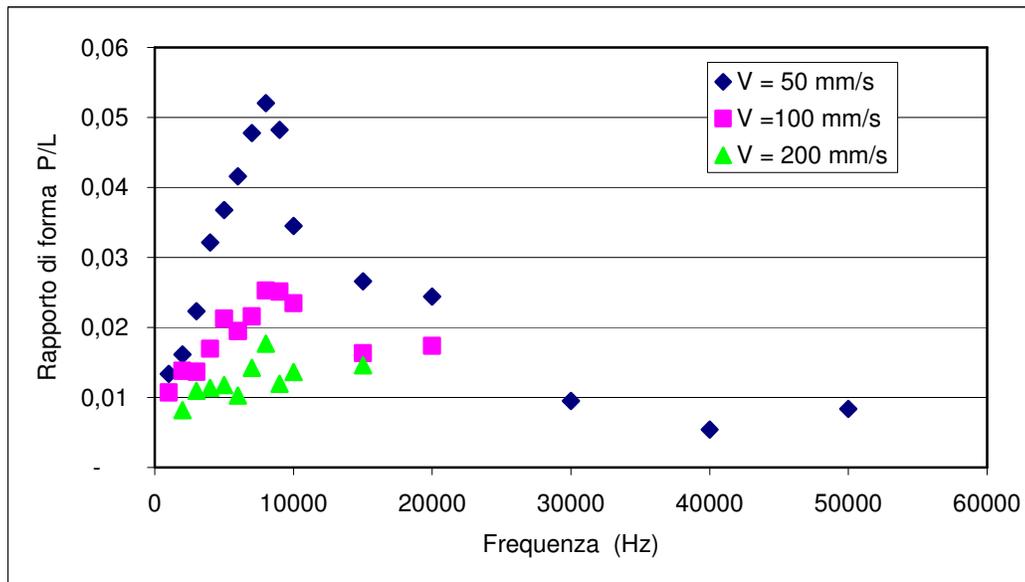


Figura A.108 – Andamento del rapporto di forma del solco al variare della frequenza per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

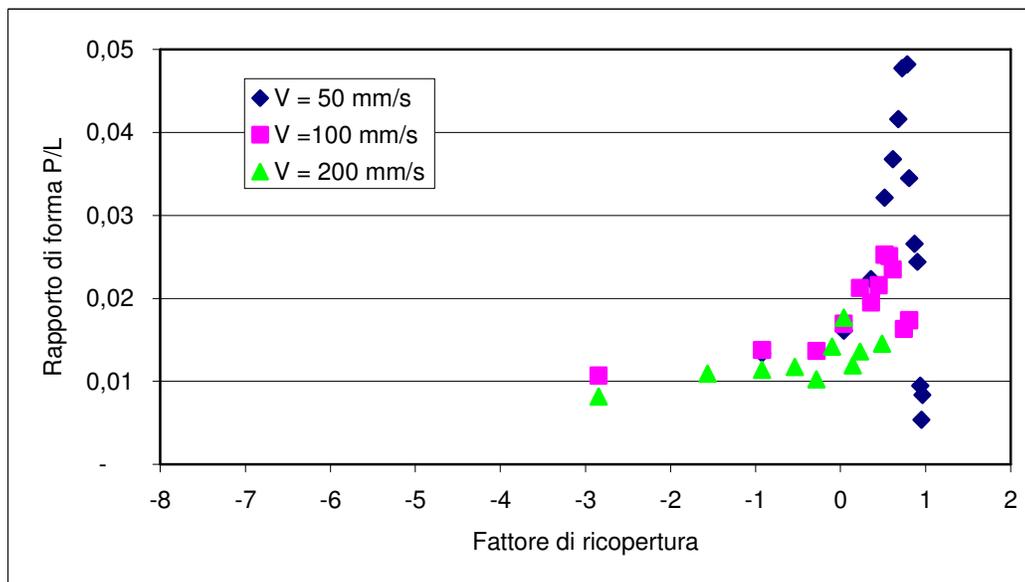


Figura A.109 – Andamento del rapporto di forma del solco al variare del fattore di ricopertura percentuale per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

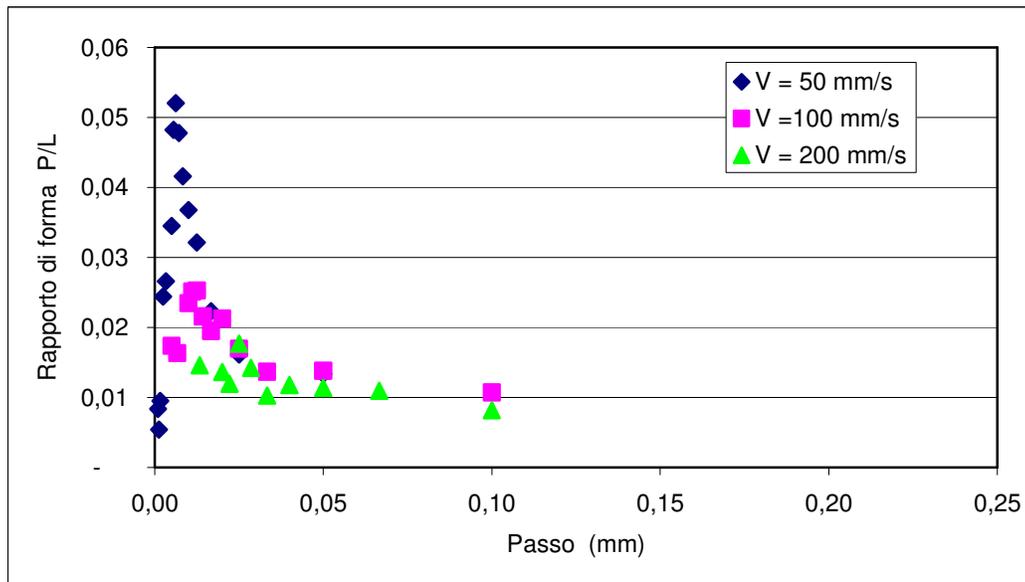
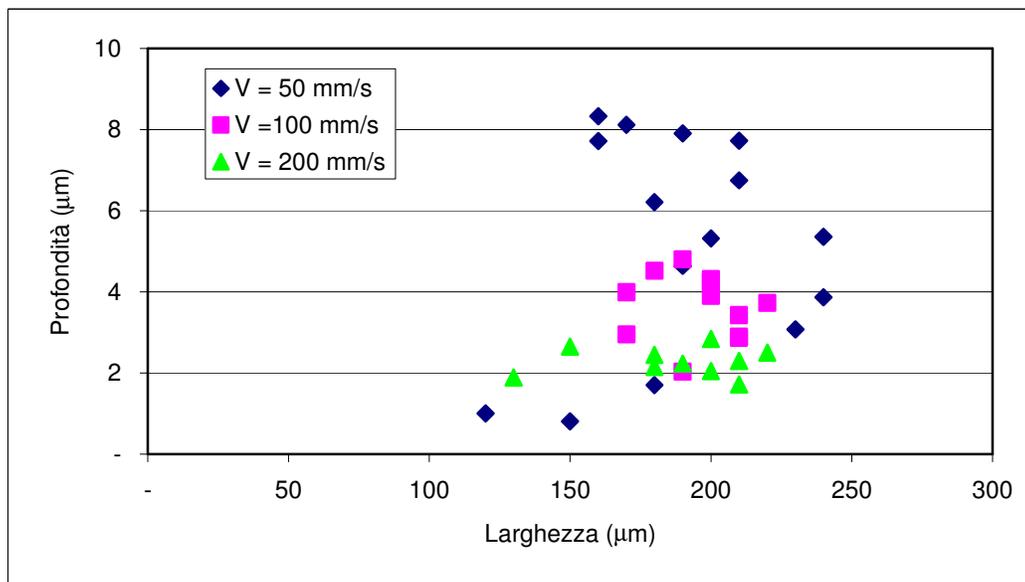


Figura A.110 – Andamento del rapporto di forma del solco al variare del passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.



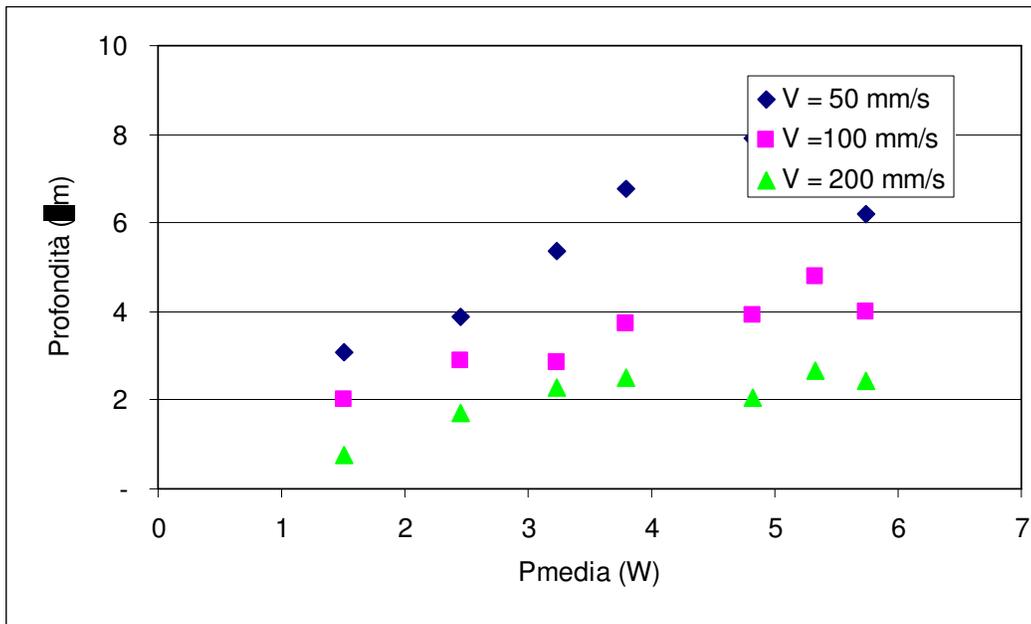


Figura A.112 – Andamento della profondità al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

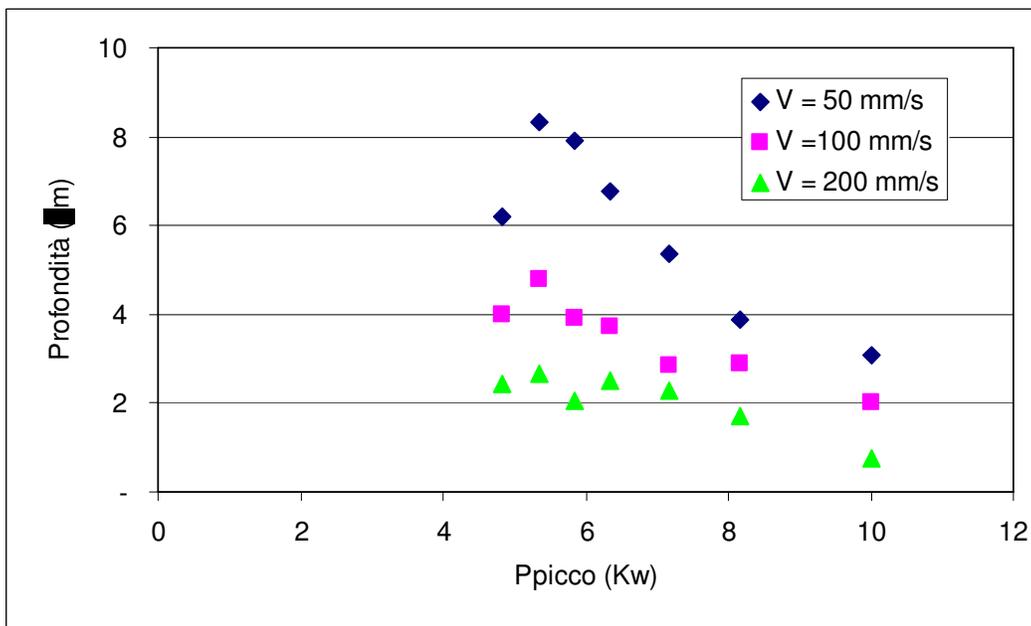


Figura A.113 – Andamento della profondità al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

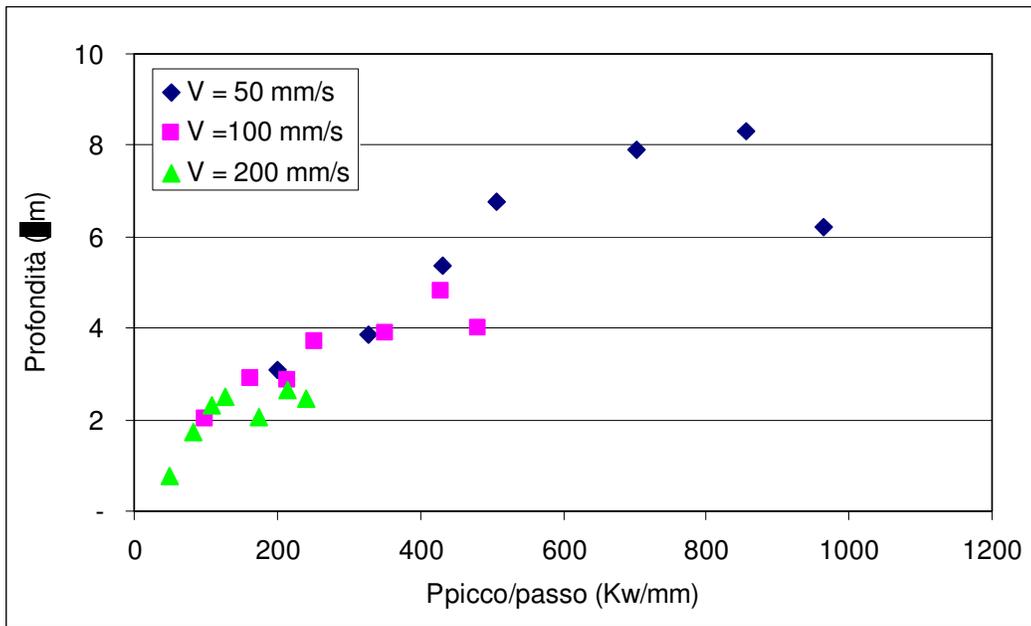


Figura A.114 – Andamento della profondità al variare della potenza di picco/passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

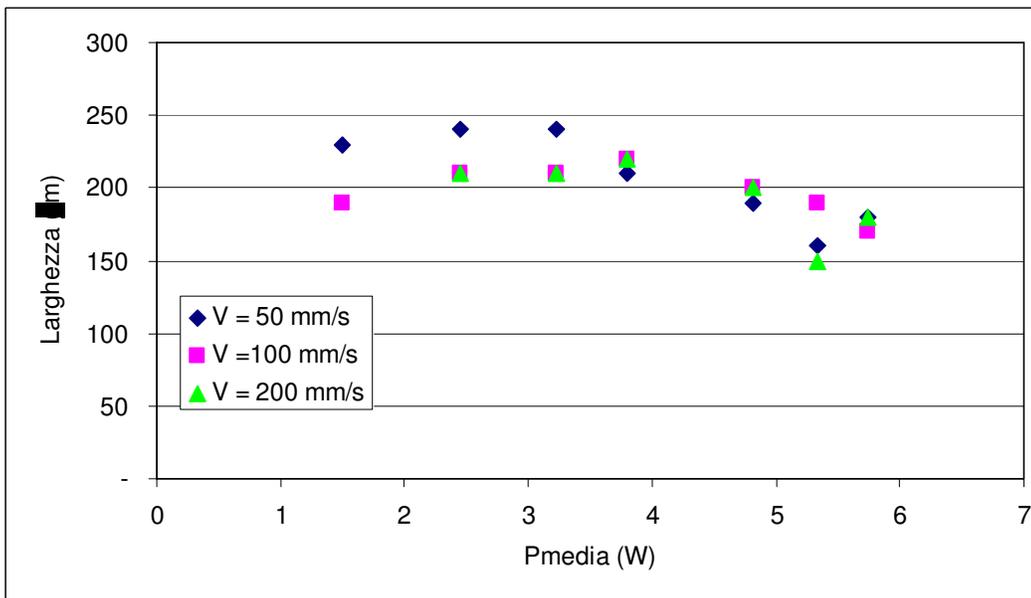


Figura A.115 – Andamento della larghezza al variare della potenza media per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

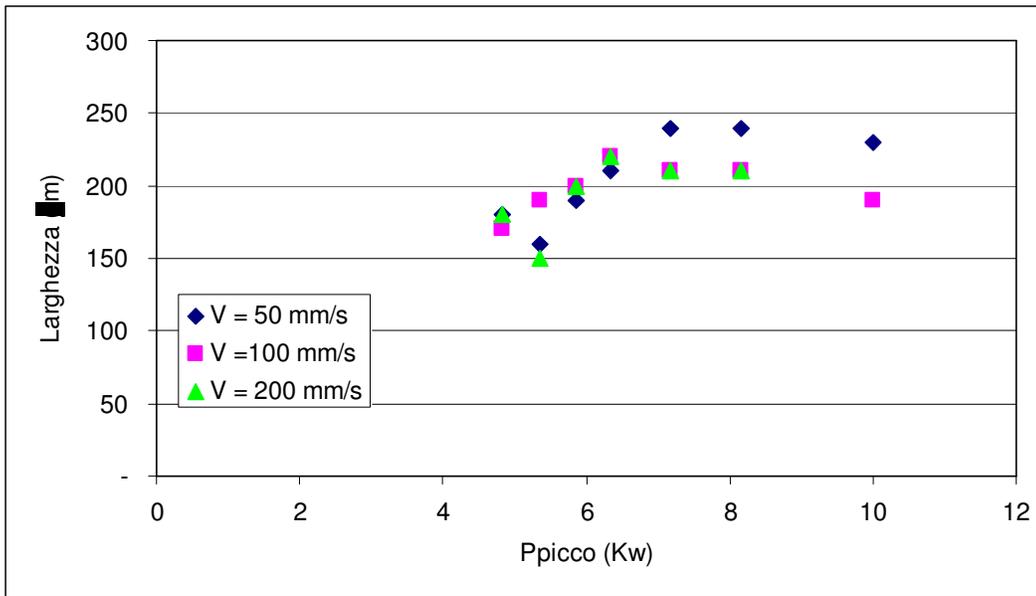


Figura A.116 – Andamento della larghezza al variare della potenza di picco per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

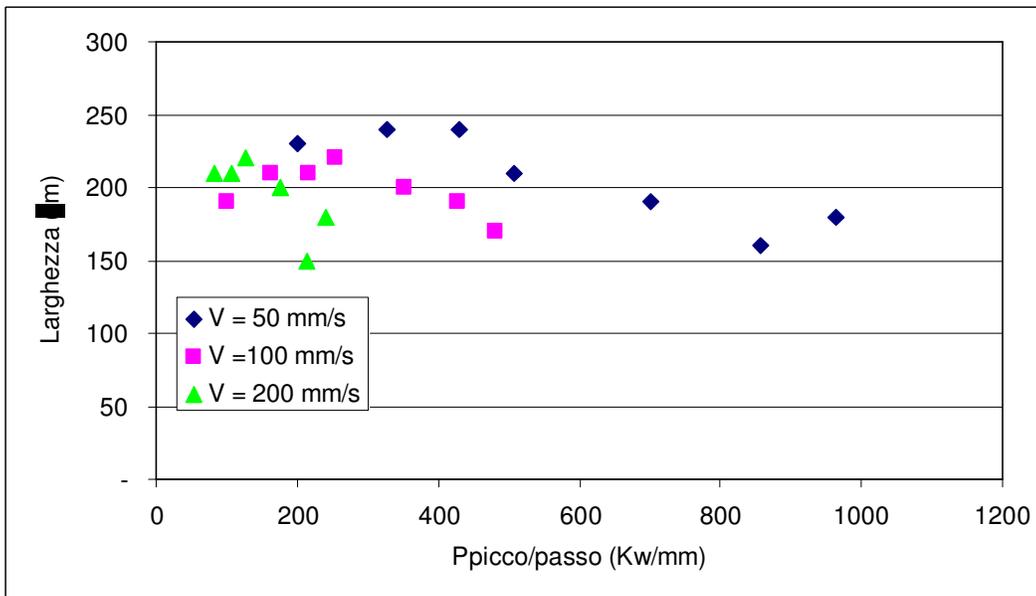


Figura A.117 – Andamento della larghezza al variare della potenza di picco/passo per tre valori di velocità, con amperaggio pari a 35A, su acciaio AISI 430.

## **Bibliografia**

1. John F. Ready  
**Applicazioni industriali dei laser**  
ed. Tecniche nuove, Milano 1982
2. M. Santochi, F. Giusti  
**Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione**  
ed. Ambrosiana, Milano
3. M. Castellani-Longo, A. Sona  
**Laser di potenza – applicazioni meccaniche**  
CNR, Roma 1991
- 4 Edoardo Capello  
**Le lavorazioni industriali mediante laser di potenza**  
ed. libreria Clup, Milano 2003
- 5 **UNI EN ISO 11146 (1999)**  
Laser e sistemi laser - Metodi di prova per i parametri dei fasci laser - Larghezza del fascio, angolo di divergenza e fattore di propagazione del fascio
6. I. Crivelli Visconti e altri  
**Tecnologie di produzione meccanica, vol. 3**  
ed. Cremonese, Firenze 1994
- 7 **UNI EN ISO 11145 (2004)**  
Optica e strumenti ottici – Laser e sistemi laser – Vocabolario e simboli
8. John C. Ion  
**Laser processing of engineering materials**  
ed. Elsevier, 2005

9. J.C. Kneip, A. Han, S. Mattei, D. Grevey  
**Numerical simulation of thermal branding of polymers with infrared laser**  
Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International congress on applications of lasers and electro-optics 2004
10. P. E. Denney, B. W. Shinn<sup>1</sup>, P. M. Fallara, T. C. Huang, J. Eastman, G. E. Johnston<sup>2</sup>, and B. S. Johnson  
**Laser processing of concrete structures**  
Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International congress on applications of lasers and electro-optics 2004
11. Antti Salminen, Tony Vesterinen  
**Laser processing of PCB**  
Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International congress on applications of lasers and electro-optics 2004
12. M. Naeem  
**Micromachining with high beam quality and high pulse frequency Nd:YAG laser**  
Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International congress on applications of lasers and electro-optics 2004
13. T.W. Ng, S.C. Yeo  
**Aesthetic laser marking assessment using luminance ratios**  
Optics and lasers in Engineering, n.35, Elsevier 2001
14. Th. Dumont, T. Lippert, A. Wokaun, P. Leyvraz  
**Laser writing of 2D data matrices in glass**  
Thin Solid Films, n.453-454, Elsevier 2004
15. J. Qi, K. L. Wang, Y. M. Zhu  
**A study on the laser marking process of stainless steel**  
Journal of Material Processing Technology, n.139  
Elsevier 2003

- 16 A.A. Peligrad, E. Zhou, D. Morton, L. Li  
**A melt depth prediction model for quality control of laser surface glazing of inhomogeneous materials**  
Optics & Laser Technology, n.33, Elsevier 2001
- 17 Simon Strgar, Janez Mozina  
**An optodynamic determination of the depth of laser-drilled holes by the simultaneous detection of ultrasonic waves in the air and in the workpiece**
- 18 Parker, D.L.  
**Laser Production Applications in Microelectronics**  
Industrial Annual Handbook, Penwell Pub, Tulsa, OK, 1986
- 19 Crissolouris, G., P. Sheng, e W.C. Choi  
**Three-Dimensional Laser Machining of Composites Materials**  
PED-35 Machinning Composites, Amer. Soc. Of Mech. Eng. 1988
- 20 Duley, W.W.  
**Laser Processing and Analysis of Materials**  
Plenum Press, New York 1983
- 21 Copley, S., M. Bass, B. Jau and R. Wallance  
**Laser Machining Ceramics**  
Proceeding of the first International Laser Processing Conference (1981)
- 22 George Chryssolouris  
**Laser machining-Theory and Practice**  
Frederick F. Ling Series Editor, 1991