



M. Lanzetta, J. Creatini, G. Santaera, S. Soldani<sup>1</sup>



- Come migliorare l'incisione laser di lapidei a scopo decorativo o per tracciatura  
*Improving laser engraving of stones for decoration or traceability*
- Controllo del contrasto visivo dei solchi e della produttività  
*Controlling the visual contrast of grooves and productivity*
- Piano fattoriale (DOE) e analisi statistica degli effetti dei parametri di lavorazione  
*Factorial design (DOE) and statistical analysis of work parameters' effect*

## Analisi sperimentale del processo di marcatura laser su marmo

### *An experimental analysis of laser engraving on marble*

#### **SOMMARIO**

Questo articolo affronta la caratterizzazione e ottimizzazione del processo di incisione di materiali lapidei tramite fascio laser attraverso un'analisi sperimentale. La finalità è trovare possibili relazioni tra parametri impostati per la lavorazione e parametri geometrici ricavati dai solchi. Per questo studio sono stati analizzati dei campioni di marmo Bianco di Carrara. Per mezzo di un profilometro ottico è stato possibile misurare il profilo trasversale del solco, caratterizzato in maniera oggettiva con alcune misure descritte nell'articolo, inclusi due parametri di qualità visiva. Attraverso un'analisi statistica è possibile indicare le impostazioni ottimali da settare in base al risultato desiderato: es. aumento della larghezza, profondità o livello di contrasto del solco.

#### **ABSTRACT**

*This article deals with characterizing and optimizing the process of engraving stone materials with a laser beam through experimental testing. The purpose of testing was to find possible relations between the parameters set for work and the geometric parameters gotten from the grooves. For this study we tested samples of White Carrara marble. By means of an optical profilometer it was possible to measure the cross section of the groove, objectively characterized by a number of measurements described in the article including two parameters of visual quality. Through statistical analysis it was possible to indicate optimal settings to use on the basis of the results desired; for example, increasing the width, depth or contrast level of the groove.*

## INTRODUZIONE

L'utilizzo di un sistema di incisione può essere applicato per la identificazione e rintracciabilità di prodotti in materiale lapideo durante le varie fasi di lavorazione [1]. A tal fine, è necessario definire delle tecniche di misura accurate per l'ottimizzazione dei parametri di lavorazione laser, in modo da creare le condizioni per una lettura dei codici automatizzata, sia nel caso di codici a barre [2] che tramite riconoscimento dei caratteri (OCR) [3]. Il comportamento di un materiale lapideo irradiato da un laser è stato studiato con approccio energetico in [3] e [4]. In questo lavoro è stato impiegato un approccio di tipo statistico *DOE* (Design of Experiments) per valutare gli effetti sulle caratteristiche geometriche delle incisioni realizzate in funzione dei diversi parametri di processo. Sono state esaminate in particolare 22 incisioni di 20 mm (tabella 1) di larghezza tra 0,4 e 1,1 mm e altezza tra 0,1 e 0,8 mm su dischi di marmo Bianco di Carrara come descritto in [5].

## INTRODUCTION

An engraving system can be used for identification and traceability of stone products during various work stages [1].

For this purpose it is necessary to define accurate measurement techniques that can optimize a laser's work parameters in order to create the conditions for automated code scanning, in the case of both barcodes [2] and through character recognition (OCR) [3].

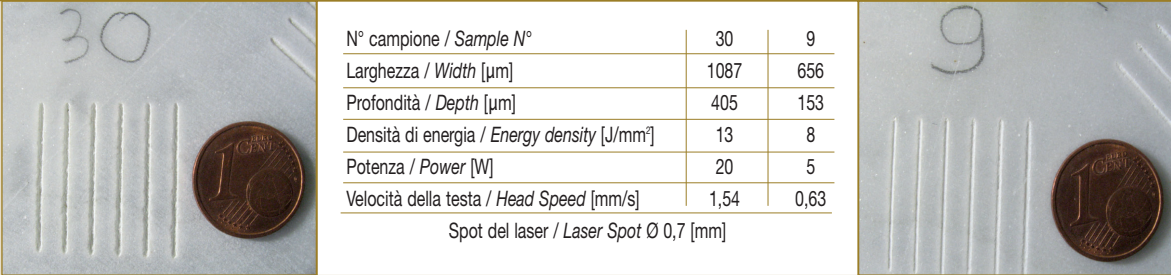
The behavior of a stone material being hit by a laser beam was studied from an energy-based approach in [3] and [4].

In this study we used statistical *DOE* (Design of Experiments) approach to evaluate effects on the geometric characteristics of the engravings made using different process parameters. In detail, 22 grooves 20 mm long (table 1), with width between 0.4 and 1.1 mm and height between 0.1 and 0.8 mm were cut on disks of White Carrara marble as described in [5].

Tab. 1 - DUE CAMPIONI DI MARMO DI CARRARA INCISI CON LASER A CO<sub>2</sub> CON I PARAMETRI DI PROCESSO INDICATI  
TWO SAMPLES OF WHITE CARRARA MARBLE CUT WITH A CO<sub>2</sub> LASER WITH THE INDICATED PROCESS PARAMETERS

N° campione / Sample N°	30	9
Larghezza / Width [μm]	1087	656
Profondità / Depth [μm]	405	153
Densità di energia / Energy density [J/mm <sup>2</sup> ]	13	8
Potenza / Power [W]	20	5
Velocità della testa / Head Speed [mm/s]	1,54	0,63

Spot del laser / Laser Spot Ø 0,7 [mm]



## ACQUISIZIONE DEI DATI

La fase di misura delle incisioni è stata determinante per il raggiungimento degli obiettivi di questo lavoro, in quanto era necessario ottenere misure accurate e ripetibili dei solchi. A causa della profondità dei solchi non è possibile ricorrere ai tradizionali metodi a contatto [6], per cui è stato sviluppato un apposito sistema basato su profilometro ottico dotato di movimentazione autonoma descritto in [7].

L'applicazione di tale sistema è stata trattata in [8]. Il metodo di analisi utilizzato per questo lavoro è stato impiegato anche per valutare l'effetto di incisioni tramite Abrasive Waterjet come descritto in [9].

## PARAMETRI DI PROCESSO

Per la lavorazione in esame è stato usato un laser CO<sub>2</sub> da 50 W. I parametri di processo impostati sono: la potenza e la densità di

## DATA ACQUISITION

The groove-measurement stage was determinant in achieving the aims of this study because it was necessary to get accurate and replicable groove measurements. Due to the depths of the grooves it was impossible to use traditional contact methods [6], so a special system was developed based on an optical profilometer having independent movement as described in [7].

Using a system of this kind was described in [8]. The test method used for this study was also utilized to assess the effect of abrasive water-jet engraving as described in [9].

## PROCESS PARAMETERS

The work being examined was done with a 50 W CO<sub>2</sub> laser. The process parameters that were set were: power and density of energy. This latter

energia. Quest'ultimo parametro, ampiamente utilizzato in letteratura, è definito da:

$$D.E. [J/mm^2] = \frac{P[W]}{v [mm/s] \cdot \phi [mm]}$$

In molti processi termici, incluse le lavorazioni laser, questo parametro rappresenta la sintesi dei parametri con le relative unità di misura (tra parentesi quadre) in esso contenuti. In certi intervalli delle grandezze coinvolte (potenza, velocità e diametro dello spot del laser) gli effetti sono gli stessi a parità di densità di energia, indipendentemente dalle combinazioni dei valori assunti dai tre parametri. Come si osserverà invece, in questo studio i valori di potenza prima e di velocità poi hanno un effetto dominante a parità di densità di energia.

In tabella 2 sono elencati i valori di potenza e densità di energia utilizzati per questa analisi. Non vengono visualizzati i valori della velocità (compresi tra 0,25 e 7,5 mm/s) in quanto ottenuti come combinazione dei suddetti. Lo spot del laser è stato fissato al minimo valore ottenibile in laboratorio pari a 0,7 mm.

Per ciascuno dei sei valori della potenza elencati nella prima riga della tabella 2 sono stati variati i valori di velocità in modo da ottenere i valori della densità di energia nella seconda riga della tabella 2 per un totale di 36 condizioni di prova. Per ciascuna di esse sono stati realizzati 6 solchi di lunghezza pari a 20 mm e spazati di 4 mm, come mostrato in tabella 1.

Tali parametri vanno messi in correlazione con delle caratteristiche geometriche scelte per l'analisi dell'incisione, al fine di trovare quei valori che forniscono i massimi livelli di "leggibilità", grazie ad un aumento del contrasto luce/ombra.

Le caratteristiche geometriche ricavate da ciascuna incisione sono: larghezza, profondità e irregolarità del bordo del solco e pendenza delle pareti. Esse vengono misurate trasversalmente rispetto al solco ottenuto, cioè in un piano perpendicolare alla direzione di spostamento del laser.

La pendenza delle pareti del solco e il rapporto tra larghezza e profondità sono parametri tra loro

parameter, widely utilized in the literature, is defined as:

$$D.E. [J/mm^2] = \frac{P[W]}{v [mm/s] \cdot \phi [mm]}$$

*In many thermal processes, including laser, this parameter is a synthesis of the parameters with their measurement units [in brackets]. In some of the ranges involved (power, speed and laser-beam diameter) the effects are the same when energy density is equal, whatever the combinations of values assumed by the three parameters. As we will observe, however, in this study the values first for power and then for speed have a dominating effect when energy density is equal.*

*Table 2 lists the power and energy density values used for this analysis. Not shown are speed values (between 0.25 and 7.5 mm/s) because they were obtained as a combination of the above. The laser beam spot was set at the minimum value obtainable in our laboratory, or 0.7 mm.*

*For each of the six power values listed in the top row of table 2 the speed values were varied in order to get the energy density values given in the second row of table 2, for a total of 36 test conditions. For each of them 6 grooves were cut, 20 mm long and 4 mm apart, as shown in table 1.*

*These parameters are to be correlated with the geometric characteristics chosen for engraving analysis, in order to find the values providing maximum "legibility" levels thanks to an increase in light/shadow contrast.*

*The geometric characteristics gotten from each engraving were: width, depth, groove-edge irregularity and wall slopes. They were measured crosswise on each groove made, in other words on a plane perpendicular to the direction of laser movement.*

*The slope of groove walls and the ratio between width and depth are correlated parameters because if, for example, width being equal a groove is deeper, the walls will be steeper and vice-versa. These parameters make it possible to objectively express the level of contrast*

**Tab. 2 - PARAMETRI DI PROCESSO IMPOSTATI NEL PIANO SPERIMENTALE: POTENZA DEL FASCIO LASER, DENSITÀ DI ENERGIA  
PROCESS PARAMETERS SET FOR THE TESTING PLAN: LASER-BEAM POWER, ENERGY DENSITY**

Potenza / Power [W]	3	4	5	10	15	20
Densità di Energia / Energy Density [J/mm <sup>2</sup> ]	2	5	8	10	13	15

correlati, poiché se, ad esempio, a parità di larghezza un solco è più profondo, le pareti saranno più ripide e viceversa. Questi parametri permettono di esprimere in maniera oggettiva il livello di contrasto (luce/ombra) di un'incisione, poiché appare molto più scura e quindi presenta un maggiore contrasto visivo un'incisione con le pareti più ripide ovvero più profonda a parità di larghezza.

La regolarità del bordo è ancora una misura oggettiva della qualità di lavorazione. Con riferimento ad una sezione perpendicolare alla direzione del moto del laser, la regolarità del bordo viene definita "area persa" nel seguito e nelle figure.

È stato inoltre valutato un indice di produttività: il volume di materiale asportato nell'unità di tempo.

La caratterizzazione dei parametri citati è stata descritta in dettaglio in [9].

### ELABORAZIONE STATISTICA DEI DATI ACQUISITI

I parametri geometrici descritti sono stati misurati, cioè acquisiti tramite la strumentazione e filtrati con un apposito software. Sono quindi stati elaborati con un pacchetto di analisi statistica, al fine di ricavare quali fattori di processo, o combinazioni di essi, influiscono maggiormente su un ben preciso indicatore geometrico e il tipo di effetto.

Per l'analisi vengono visualizzati:

- Il diagramma di Pareto (*Pareto chart*), che consiste in un istogramma della distribuzione percentuale di un fenomeno, ordinato in senso decrescente. Il grafico può aiutare a stabilire quali sono i fattori che hanno maggiore influenza su un dato fenomeno (es. figure 3, 7, 5 e 6).
- Il diagramma delle interazioni (*Interaction plot*), che visualizza la variazione del parametro analizzato in funzione di una variabile indipendente: questo viene visualizzato su più curve di livello al variare di una seconda variabile indipendente (es. figure 1, 2 e 4).

### EFFETTO DEI PARAMETRI DEL LASER SULLA GEOMETRIA DEL SOLCO

Dall'analisi delle caratteristiche geometriche delle incisioni laser realizzate è possibile trarre alcune considerazioni sul processo utili per fornire indicazioni operative ai produttori.

Dalla figura 1, che rappresenta la **profondità** del solco in funzione della densità di energia, si può notare che esiste una soglia di attivazione del processo: a potenze basse (4-5 watt) l'aumento della densità di energia (ottenuta attraverso una

*(light/shadow) of the engraving because it looks much darker, and therefore an engraving with steeper walls (a deeper one) has greater visual contrast than a shallower one of equal width. Groove-edge evenness is another objective measurement of work quality. Referring to a section perpendicular to the direction of laser movement, groove-edge evenness is defined as an "edge error" in the following and in the figures.*

*Also evaluated was a productivity index: the amount of material removed in a time unit.*

*The characterization of these cited parameters was described in detail in [9].*

### STATISTICAL SURVEY OF THE DATA ACQUIRED

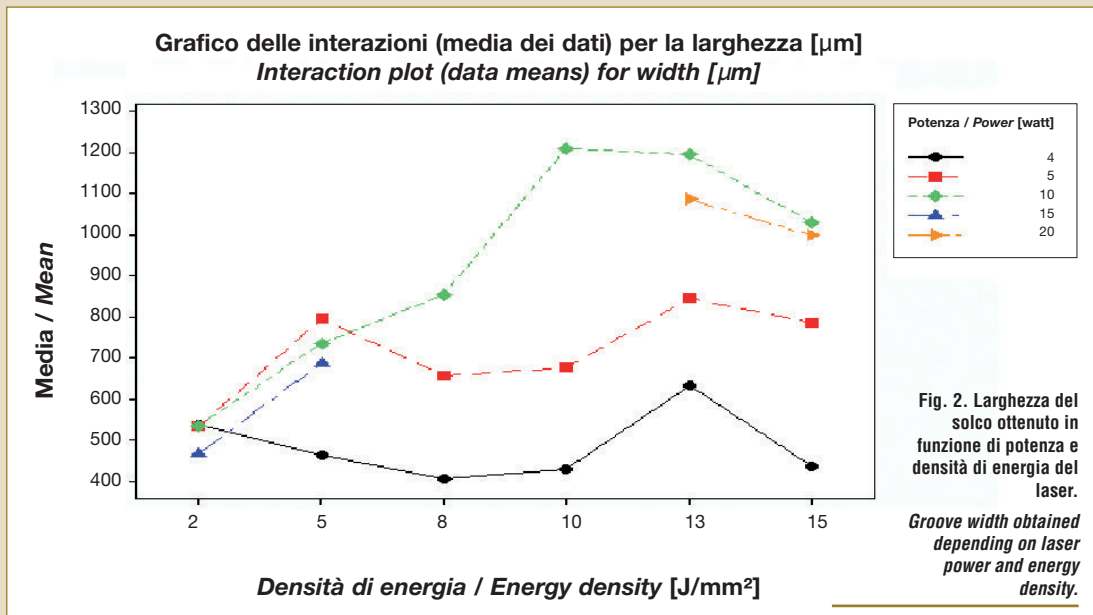
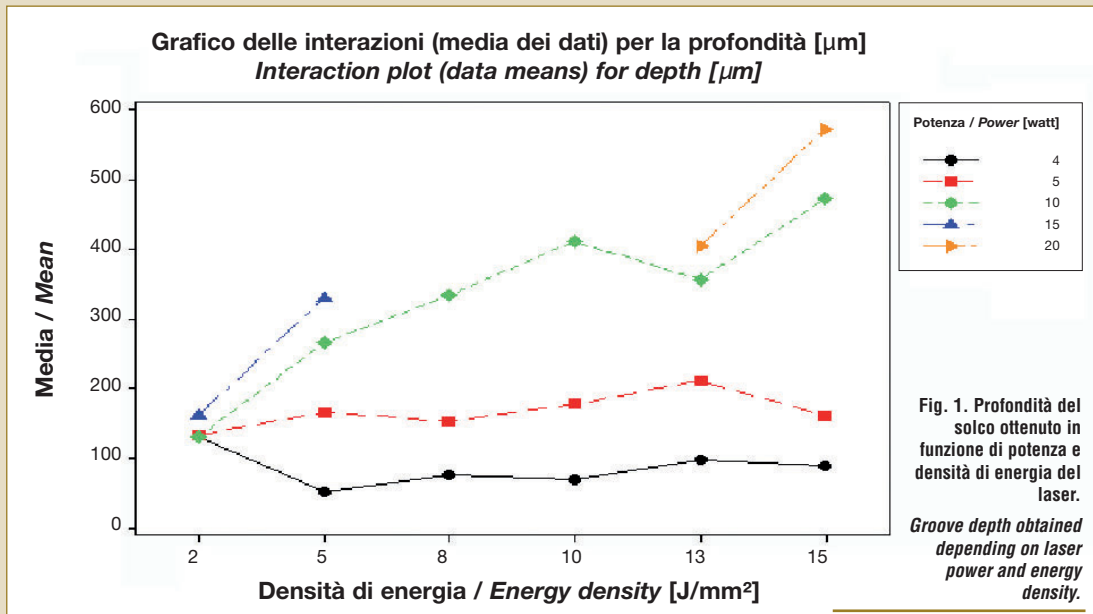
*The geometric parameters described were measured, that is, acquired by computer and filtered through special software. The data was then processed using a statistical analysis package to find out which process factors, or combinations of them, have greatest influence on a specific geometric indicator and the type of effect.*

*Visualized for the analysis were:*

- *The Pareto chart, which consists of a histogram (bar chart) of the percentile distribution of a phenomenon, in decreasing order. The graph can help establish which factors have most influence on a given phenomenon (see figures 3, 5, 6 and 7).*
- *The Interaction plot, which visualizes the variation in the parameter analyzed on the basis of an independent variable: this is visualized on several level-curves as a second independent variable varies (see figures 1, 2 and 4).*

### LASER PARAMETERS EFFECTS ON GROOVE GEOMETRY

*Analyzing the geometric characteristics of the grooves the laser made it was possible to draw some conclusions about the process useful in providing makers with operating instructions. In figure 1, which represents groove **depth** depending on energy density, we can note that there is a process-starting threshold: at low power (4 to 5 watt) an increase in energy density (gotten by lessening speed) has no significant effects on depth, as shown by progress that can be likened to straight lines at a constant height. It seems that the process begins at higher power (10 to 15 to 20 watts). At these rates of power, hypothesizing as a first approximation progress that is still linear, the angular coefficient seems to progressively increase as laser power increases. This means that groove depth increases with increased*



diminuzione della velocità) non produce effetti significativi sulla profondità, come indicato dagli andamenti approssimabili da rette a quota costante. Appare che il processo si inneschi a potenze più elevate (10-15-20 watt). A tali potenze, ipotizzando in prima approssimazione un andamento ancora lineare, sembra

energy density (that is, as speed lessens) and this increase is augmented as power augments. In figure 2 we can see progress similar to depth for **width**. However, wherever one notes a peak in depth, at high energy density levels, one notes a decrease in width on the constant-power curves. These higher energy-density values were

aumentare progressivamente il coefficiente angolare all'aumentare della potenza del laser. Questo vuol dire che la profondità dei solchi aumenta con l'aumentare della densità di energia (cioè al diminuire della velocità) e tale aumento è sempre più marcato per valori maggiori di potenza.

Dalla figura 2 si osserva un andamento analogo alla profondità per la **larghezza**. Tuttavia, laddove si nota un'impennata della profondità, ad elevati valori di densità di energia, si nota invece una diminuzione della larghezza sulle curve a potenza costante. Tali valori di densità di energia più elevati sono stati ottenuti diminuendo la velocità del laser (dato che il diametro dello spot è costante). Una possibile spiegazione di tale fenomeno è che il solco sembra preferire una propagazione nella direzione della radiazione laser (verticale) piuttosto che laterale, per semplice conduzione. Osservando il diagramma di Pareto in figura 3, si nota che il **volume di materiale asportato** nell'unità di tempo è principalmente determinato dalla profondità e poi dalla larghezza ecc. Questo effetto discende direttamente dal tipo di geometria del solco con pareti ripide. Pertanto la produttività del processo aumenta all'aumentare della profondità, per la quale valgono le indicazioni riportate sopra. Il grafico di figura 4 conferma l'andamento del volume di materiale asportato in funzione della velocità del laser. Tale grafico è infatti simile a quello della figura 1 relativo alla profondità che, si è detto, influenza in maniera predominante il volume di materiale

*gotten by lowering laser speed (since spot diameter remains constant). One possible explanation for this phenomenon is that the groove seems to preferably propagate in the direction of laser radiation (vertical) rather than to the sides, via simple conduction.*

*Observing the Pareto chart in figure 3 we can see that the **volume of material removed** per time unit depends mainly on depth, and then on width and so on. This effect depends directly on the groove-geometry type with steep walls.*

*Therefore, process productivity increases with an increase in depth, and so the above indications hold true. The graph in figure 4 confirms progress in the amount of material removed as dependent on laser speed. In fact, this graph is similar to the one in figure 1 for depth, which proved to have a predominant influence on the amount of material removed.*

*Furthermore, at a constant diameter and power for the laser beam, laser speed is directly proportional to energy density.*

*Power influenced depth (and therefore wall slope), productivity and the irregularity of groove edges. Where the width/depth ratio is concerned, we noted that when power increases this ratio diminishes, with depth becoming greater than width. This leads to evident effects in generating visual contrast (table 3).*

*Speed had an influence on width and depth. Furthermore, we were able to find an optimal value below which it is not necessary to go to get greater depth and width (figure 2).*

*We hypothesized that this phenomenon is*

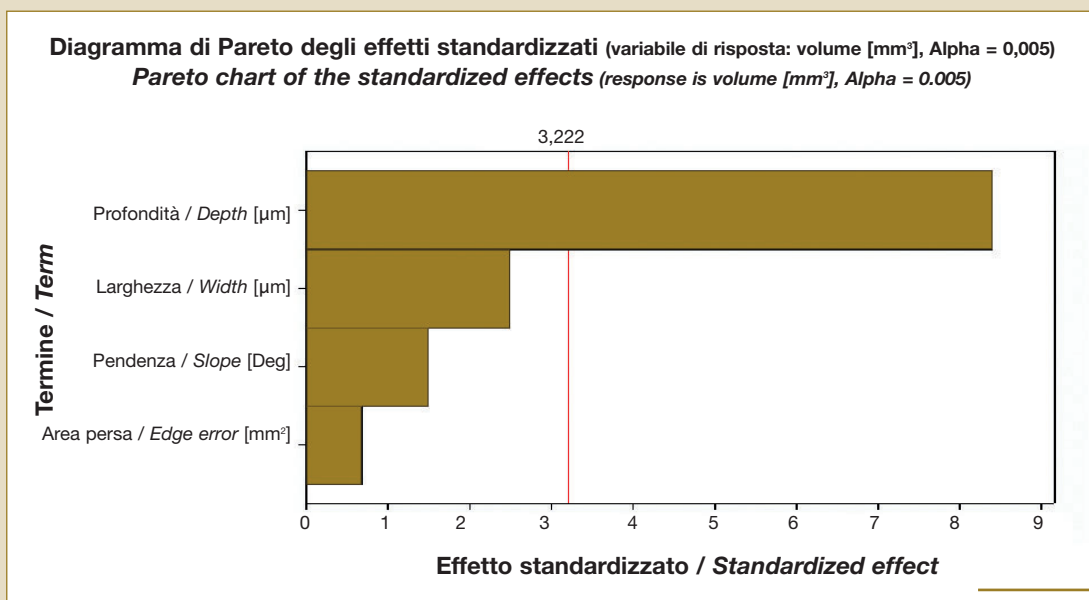
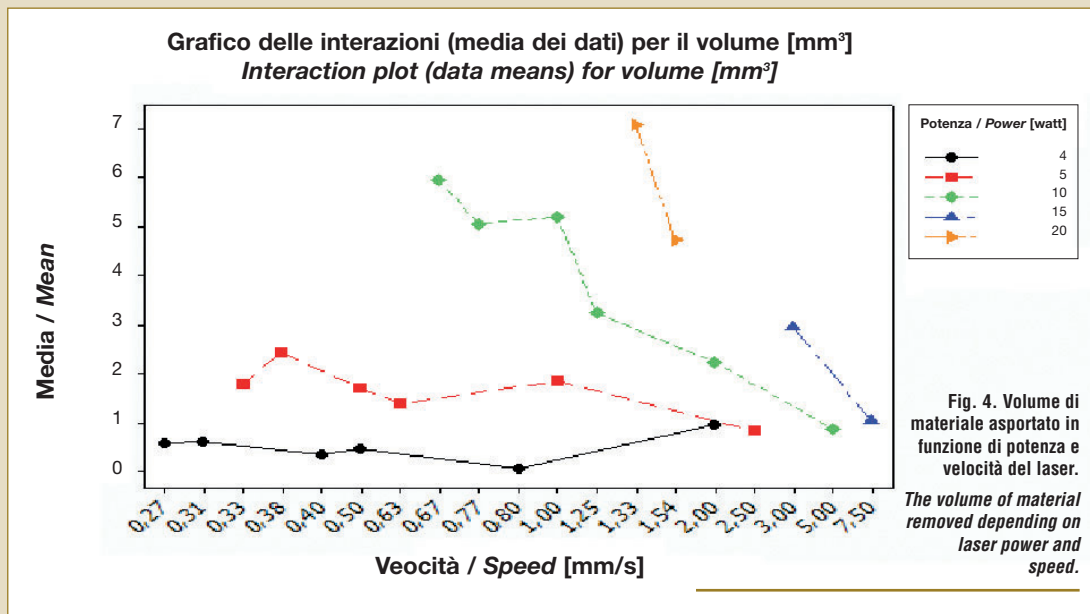


Fig. 3. Influenza dei parametri geometrici del solco sul volume di materiale asportato.

*The influence of the groove's geometric parameters on the volume of material removed.*



asportato. Inoltre a potenza e diametro dello spot del laser costante, la velocità del laser è direttamente proporzionale alla densità di energia.

La potenza ha influenza sulla profondità (e quindi la pendenza delle pareti), sulla produttività e sull'irregolarità del bordo del solco. Per quanto riguarda il rapporto larghezza/profondità si nota che all'aumentare della potenza il rapporto diminuisce, quindi aumenta più la profondità rispetto alla larghezza. Questo comporta evidenti effetti nella generazione di un contrasto visivo (tabella 3).

La velocità risulta influente per la larghezza e per la profondità. Inoltre abbiamo constatato un valore ottimale al di sotto del quale non è necessario spingersi al fine di ottenere profondità e larghezza maggiori (figura 2).

*attributable to the formation of vapor when the material melts; this vapor acts as a filter, reducing laser performance, and occurs primarily at low speeds. An effect of this kind can also be seen on metals (Nail Effect) subjected to a rise in emitted energy.*

**Tab. 3 - SCHEMA RIASSUNTIVO DEGLI EFFETTI DEI PARAMETRI DI VELOCITÀ E POTENZA DEL LASER SULLE CARATTERISTICHE DEI SOLCHI OTTENUTI; UNA FRECCIA VERSO L'ALTO (BASSO) INDICA UNA CORRELAZIONE DIRETTA (INVERSA) SUMMARIZED SCHEME OF THE EFFECTS OF THE LASER'S SPEED AND POWER PARAMETERS ON GROOVE CHARACTERISTICS; AN UP (DOWN) ARROW INDICATES A DIRECT (INVERSE) CORRELATION**

	Larghezza Width	Profondità Depth	Rapporto Larghezza/Profondità* Width/Depth ratio*	Irregolarità dei bordi Edge irregularity	Volume di materiale asportato Volume of material removed
Potenza / Power	↑ 20%	↑ 30%	↓ 60%	↑ 50%	↑ 30%
Velocità / Speed	↓ 60%	↓ 50%	↑ 20%	↓ 20%	↓ 50%
Combinazione velocità-potenza Speed-power combination	20%	20%	20%	30%	20%

(\*) Una diminuzione di questo parametro comporta l'aumento del contrasto visivo.  
*A decrease in this parameter leads to increased visual contrast.*



Abbiamo ipotizzato che questo fenomeno sia attribuibile al formarsi di un vapore dovuto alla fusione del materiale: tale vapore funziona da filtro riducendo le prestazioni del laser e si manifesta soprattutto a basse velocità. Un effetto del genere si verifica anche sui metalli (*Nail Effect* / Effetto Chiodo) sottoposti all'innalzamento dell'energia immessa. La densità di energia non è altro che un parametro correlato ai precedenti. Determina la quantità di energia immessa sul marmo durante il processo. Dal grafico in figura 1 si può vedere che il parametro predominante per l'innesco del processo è la potenza: infatti a potenze basse, pur variando la densità di energia (e quindi la velocità), non si modificano le prestazioni del processo.

### PESO DEI PARAMETRI DEL LASER

Oltre a determinare l'effetto di ciascuno dei parametri del laser sulle caratteristiche geometriche, dall'analisi statistica effettuata è possibile anche determinare su quale parametro convenga agire al fine di ottenere un effetto più marcato. L'ordinamento degli effetti deriva dal diagramma di Pareto.

Tali informazioni sono sintetizzate nella tabella 3. Ad ogni parametro di processo, presente su ogni riga, viene associato il contributo che è in grado di dare all'indice geometrico specifico per ogni colonna, così come elaborato dall'analisi statistica.

La tabella 3 ha quindi lo scopo di sintetizzare in uno spazio limitato gli effetti standardizzati dei principali parametri del processo (velocità e potenza del laser o loro combinazione) su ciascuna delle caratteristiche geometriche misurate dai solchi.

In particolare, ciascun valore della tabella rappresenta il peso relativo di ciascun termine sulla somma dei tre sulla stessa colonna. I valori riportati sono arrotondati alla decina percentuale.

Ad esempio, nel diagramma di Pareto di figura 7 gli effetti standardizzati sulla larghezza sono rispettivamente: 3,4 (velocità), 1 (potenza) e 1,1 (combinazione di velocità e potenza). La velocità ha quindi un'influenza di  $3,4/(3,4 + 1 + 1,1)$ , cioè di circa il 60%.

Le frecce stanno ad indicare se la variazione del parametro geometrico è concorde (freccia in alto) con quella del parametro di processo (ad esempio se aumenta la velocità diminuisce la profondità realizzabile). In blu sono evidenziati i valori dei parametri dominanti.

### CONCLUSIONI

Dall'analisi sperimentale e statistica descritta è possibile delineare delle linee guida per i

*Energy density is only a parameter correlated to the preceding. It determines the amount of energy hitting the marble during the process. From the graph in figure 1 we can see that the predominant parameter triggering the process is power: in fact, at low power, while energy density (and hence speed) varies, process performance does not change.*

### THE IMPORTANCE OF LASER PARAMETERS

*In addition to finding the effect each laser parameter had on geometric characteristics, the statistical analysis also made it possible to determine which parameter should be worked on in order to get a more marked effect. The ordering of the effects derives from the Pareto chart and the information is summarized in table 3.*

*Each process parameter in the column is matched to the contribution it is able to make to the specific geometric index given in the top row, as worked out from the statistical analysis. The purpose of table 3 is therefore to briefly summarize the standardized effects of the main process parameters (speed and laser power or their combination) on each of the grooves' measured geometric characteristics.*

*In particular, each value in the table represents the relative importance of each term on the sum of the three in the same column. The values given are rounded off to the closest tenth percentile.*

*For example, in the Pareto chart in figure 7, the standardized effects on width are respectively 3.4 (speed), 1 (power) and 1.1 (combination of speed and power). Speed therefore has an influence of  $3.4/(3.4+1+1.1)$  or about 60%.*

*The arrows show whether or not the variation in the geometric parameter agrees (upward arrow) with the process parameter (for example, if speed increases obtainable depth decreases). In blue are the values of the dominant parameters*

### CONCLUSIONS

*From the experimental and statistical analyses described it is possible to delineate guidelines for producers enabling them to set laser parameters (power and speed) suitable to obtaining the desired groove characteristics and to know which parameters to work on to get more marked effects.*

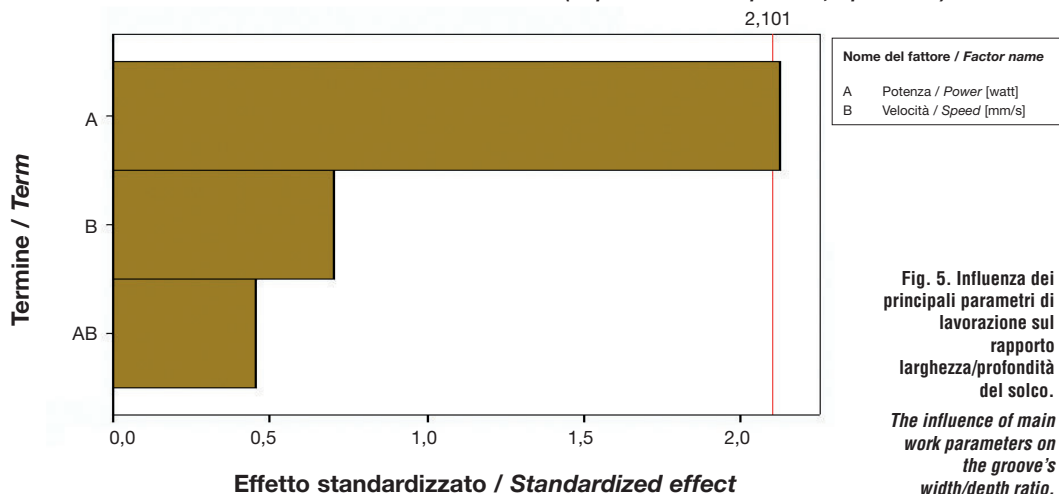
*Where increasing contrast to make the groove more visible is concerned (greater depth than width, steeper walls) the parameter to work on most is power (figure 5), increasing it.*

*For productivity purposes (the volume of material removed in a time unit) the priority parameter is laser speed (figure 6), which should be decreased.*

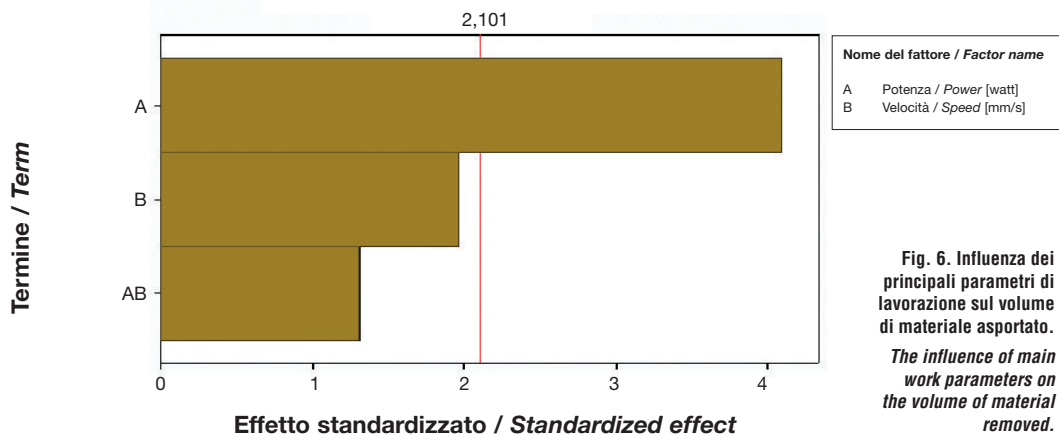
produttori per impostare i parametri del laser (potenza e velocità) al fine di ottenere le caratteristiche geometriche dei solchi desiderate e capire su quali parametri convenga agire in modo da avere effetti più marcati. Per quanto riguarda l'aumento del contrasto ai fini della visibilità del solco (maggiore profondità rispetto alla larghezza, maggiore pendenza delle pareti), si deve agire soprattutto sulla potenza (figura 5), aumentandola.

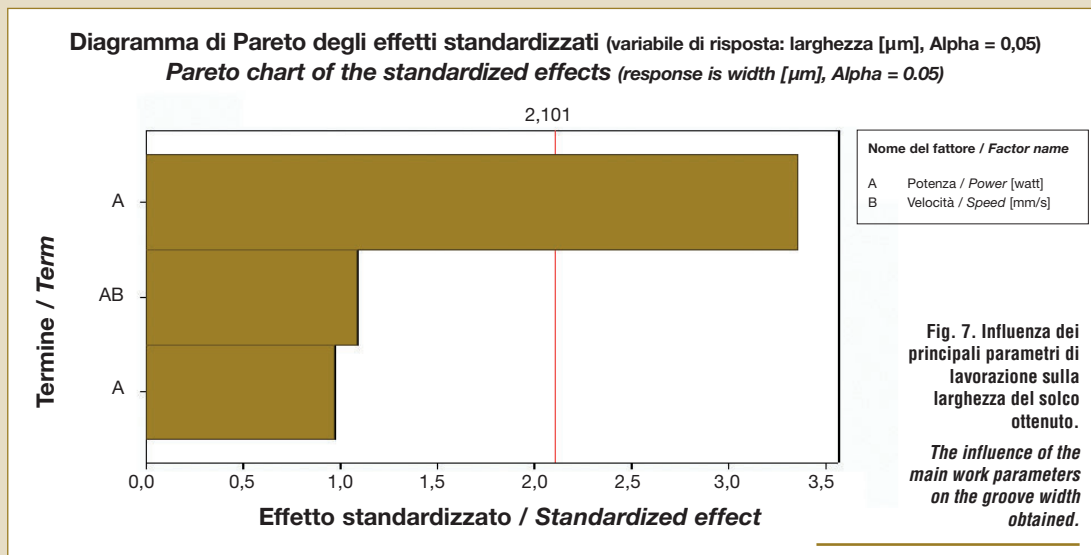
*Laser speed also directly influences the length of the groove created in a given time unit. However, in the range of parameters considered, it is necessary to reduce speed – that is, increase the local amount of energy – in order to globally augment the material removed. This seeming contradiction derives from the fact that although the process is slowed down, the effectiveness of removal increases to a greater extent and so the volume of material removed increases.*

**Diagramma di Pareto degli effetti standardizzati** (variabile di risposta: rapporto larghezza/profondità, Alpha = 0,05)  
**Pareto chart of the standardized effects** (response is width/depth ratio, Alpha = 0.05)



**Diagramma di Pareto degli effetti standardizzati** (variabile di risposta: volume [mm<sup>3</sup>], Alpha = 0,05)  
**Pareto chart of the standardized effects** (response is volume [mm<sup>3</sup>], Alpha = 0.05)





Ai fini della produttività (volume di materiale asportato nel tempo) si deve agire prioritariamente sulla velocità del laser (figura 6), riducendola.

La velocità del laser influisce direttamente anche sulla lunghezza del solco realizzato nell'unità di tempo. Tuttavia nella gamma dei parametri presi in esame è necessario ridurre la velocità, cioè aumentare l'apporto locale di energia, al fine di aumentare globalmente il materiale asportato. Questa apparente contraddizione deriva dal fatto che nonostante si rallenti il processo, l'efficacia di asportazione aumenta in misura maggiore e quindi il volume di materiale asportato aumenta.

La velocità è anche il parametro dominante sia sulla larghezza (figura 7) che sulla profondità del solco. Entrambi aumentano diminuendola (tabella 3).

Legenda: **aumentare** **diminuire**

### Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato sviluppato come progetto del corso di Automazione dei Processi Produttivi dagli studenti Jacopo Creatini, Gaspare Santaera e Sauro Soldani del corso di Laurea Specialistica in Ingegneria dell'Automazione a.a. 2008-09. Gli autori ringraziano l'ing. Federico Sebastiani e il sig. Flavio Antonelli per le lavorazioni sui campioni di marmo. Un ringraziamento particolare va al prof. Giovanni Tantussi e all'ing. Luca Romoli del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, al prof. Alessandro Franco del Dipartimento di Energetica dell'Università di Pisa e all'ing. Sandro Turchetta del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Cassino per le utili discussioni e i suggerimenti.

Speed is also the parameter governing groove width (figure 7) and depth. Both increase when speed lessens (table 3).

	potenza power	velocità speed
<b>Aumento contrasto visivo:</b> <i>Greater visual contrast:</i>	*****	**
<b>Aumento produttività:</b> <i>Greater productivity:</i>	***	*****
<b>Aumento larghezza o profondità:</b> <i>Greater width or depth:</i>	**	*****

Legend: **increase** **decrease**

### Acknowledgements

This study was developed by students Jacopo Creatini, Gaspare Santaera and Sauro Soldani as a project for their course in Production Processes Automation taken towards a degree in Automation Engineering during the academic year 2008-2009. The authors thank Engineer Federico Sebastiani and Mr. Flavio Antonelli for their work on the marble samples. Special thanks go to Prof. Giovanni Tantussi and Engineer Luca Romoli of the Mechanical, Nuclear and Production Engineering Department, to Prof. Alessandro Franco of the Energetics Department of Pisa University and to Engineer Sandro Turchetta of the Industrial Engineering Department of Cassino University for their useful comments and suggestions.

### Nota

<sup>1</sup> M. Lanzetta, J. Creatini, G. Santaera, S. Soldani:  
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della  
Produzione – Università di Pisa.

### Note

<sup>1</sup> M. Lanzetta, J. Creatini, G. Santaera, S. Soldani:  
Department of Mechanical, Nuclear and Production  
Engineering – University of Pisa, Italy.

### Bibliografia / Bibliography

- [1] M. Lanzetta, F. Fanti, G. Tantussi, "Automazione e controllo visivo della marcatura di prodotti (Parte Prima) / Automating and visually inspecting product marking (Part One)", in "Marmomacchine Classic", n. 200, marzo-aprile / March-April 2008, Editrice Promorama, Milano, pp. 30-40.
- [2] S. Turchetta, L. Carrino, W. Pollini, "Laser cutting in ornamental stone working", in "Marmomacchine International", n. 39, ottobre-dicembre / October-December 2002, Editrice Promorama, Milano, pp. 70-74.
- [3] M. Lanzetta, F. Fanti, G. Tantussi, "Automazione e controllo visivo della marcatura di prodotti (Parte Seconda) / Automating and visually inspecting product marking (Part Two)", in "Marmomacchine Classic", n. 201, maggio-giugno / May-June 2008, Editrice Promorama, Milano, pp. 72-80.
- [4] S. Turchetta, L. Carrino, "An energy based model for laser cutting natural stone", in "International Journal of Machine Tools and Manufacture", 45 (7-8), 2005, pp. 761-767.
- [5] V. Trombetti, "Tracciabilità e marcatura laser su materiale lapideo", Relazione di Tirocinio per il conseguimento della Laurea in Ingegneria Gestionale, Università di Pisa, 2006.
- [6] M. Lanzetta, G. Tantussi, "Analyses of stone surfaces by optical methods", 8<sup>th</sup> A.I.Te.M Conference 2007, Montecatini (PT), vol. unico, 2007, pp. 100-128.
- [7] M. Lanzetta, G. Tantussi, V. Zambardi, "Rilievo micrometrico di superfici con metodi ottici", in "Automazione e Strumentazione Elettronica Industriale", anno LVI, n. 5, 2008, pp. 178-184.
- [8] M. Lanzetta, F. Fanti, G. Tantussi, M. Annoni, S. Turchetta, "Characterization and measurement of stone engravings", Second International Congress Dimension Stones (ICDS) XXI Century Challenges, Carrara, May 29-31, 2008, pp. 193-198.
- [9] M. Lanzetta, J. Creatini, G. Santaera, S. Soldani, M. Annoni, "Analisi sperimentale del processo di marcatura su marmi italiani tramite getto d'acqua ad alta pressione con abrasivo / An experimental analysis of abrasive waterjet engraving of Italian marbles", in "Marmomacchine Classic", n. 207, maggio-giugno / May-June 2009, Editrice Promorama, Milano, pp. 12-32.

1/2 pagina  
166,38 x 122,20 mm