

M. Lanzetta¹, J. Creatini¹, G. Santaera¹, S. Soldani¹, M. Annoni²

Analisi sperimentale del processo di marcatura su marmi italiani tramite getto d'acqua ad alta pressione con abrasivo

*An experimental analysis
of abrasive water jet
engraving on Italian marbles*



- Come migliorare l'incisione con idrogetto di lapidei a scopo decorativo o per tracciatura
Improving water jet engraving of stones for decoration or traceability
- Piano fattoriale (DOE) e analisi statistica degli effetti dei parametri di lavorazione
Factorial design (DOE) and statistical analysis of work parameters' effect
- Acquisizione micrometrica delle sezioni trasversali dei solchi tramite profilometro ottico
Micrometric acquisition of the transverse groove section by optical profilometry

SOMMARIO

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

INTRODUZIONE

L'utilizzo di un sistema di incisione può essere applicato per la tracciabilità di materiali lapidei [1]. In questo studio vengono esaminati gli effetti di taglio e di asportazione del materiale nel caso del processo water jet, al fine di indicare le condizioni ottimali (parametri di lavorazione) che permettano un utilizzo dei normali lettori ottici (per codici a barre) sui suddetti materiali [2]. Per far questo è stato utilizzato un approccio di tipo statistico *DOE* (Design of Experiments), per valutare come variano le caratteristiche geometriche dell'incisione ottenuta in base a diversi settaggi dei parametri di processo.

DESCRIZIONE DEI PARAMETRI DI PROCESSO

Nella lavorazione water jet [3] i parametri di processo sono:

- la pressione dell'acqua (nome convenzionale: *pressure*)
- il tipo di abrasivo (Garnet mesh # 80 nel presente lavoro)
- la portata di abrasivo (nome convenzionale: *abrasive*)
- il setup della testa, ovvero la combinazione diametro dell'ugello primario (orifizio) e diametro del focalizzatore utilizzata (nome convenzionale: *head setup*)
- la velocità di avanzamento della testa (nome convenzionale: *speed* o *feed rate*)
- la *stand off distance*, ovvero la distanza tra l'uscita del focalizzatore e il pezzo (mantenuta costante e pari a 3 mm nel presente lavoro)
- il tipo di materiale target (nome convenzionale: *material*) espresso in termini di lavorabilità. Dalla letteratura [4] [5]

ABSTRACT

This article concerns characterizing and optimizing the process of water jet engraving on stone materials through experimental analysis. The purpose is to find possible relationships between work parameters for an abrasive water-jet and the geometrical parameters created by grooves. Samples of White Carrara and Perlato of Coreno marbles were used in testing. An optical profilometer was used to measure the transversal profile of the groove, objectively characterized by a number of measurements described in the article, including two parameters of visual quality. Statistical analysis made it possible to indicate optimal settings to enter on the basis of desired results; for example, increases in width, depth or the degree of groove contrast.

INTRODUCTION

An engraving system can be used for the purpose of traceability of stone materials [1]. This study examines the effect of cutting away material by means of a water jet process, in order to indicate optimal conditions (work parameters) permitting normal barcode scanning on these materials [2].

To do so an approach of the DOE (Design of Experiments) statistical type was used in order to evaluate how the geometrical features of the engraving vary on the basis of different process parameter settings.

DESCRIPTION OF PROCESS PARAMETERS

Working with water jet [3] the process parameters are:

- *water jet pressure*
- *type of abrasive (Garnet mesh # 80 in this study)*
- *abrasive flow rate*
- *head setup, or the ratio between the diameter of the primary nozzle and that of the focuser used*
- *speed (or feed rate)*
- *standoff distance, or the distance between focuser outlet and the piece (kept constant at 3 mm in this study)*
- *the material, expressed in terms of workability. From literature [4], [5] we know that, density being equal for the two materials (2714 kg/m³ for the White Carrara, 2738 kg/m³ for the Perlato of Coreno), the Perlato is harder (Knoop micro-hardness HK 204 kg/mm², Mohs scale 4, than the White Carrara (Knoop micro-hardness HK 130 kg/mm², Mohs scale 3).*

All these variables were set at two levels (table 1) following a factorial design with two

sappiamo che, a parità di densità dei due materiali (2714 kg/m³ per il Bianco di Carrara, 2738 kg/m³ per il Perlato di Coreno), il Perlato risulta avere una maggiore durezza (microdurezza Knoop HK 204 kg/mm², durezza Mohs pari a 4) rispetto al Bianco (microdurezza Knoop HK 130 kg/mm², durezza Mohs pari a 3).

Tutte queste variabili sono state impostate a due livelli (tabella 1) secondo un piano sperimentale fattoriale con due ripetizioni per un totale di 64 provini.

Tali parametri sono stati messi in relazione con gli indici geometrici (variabili osservate) descritti per l'analisi dell'incisione, al fine di trovare dei valori ottimali per la maggior "leggibilità" possibile tramite un aumento del contrasto luce/ombra. Tale contrasto visivo sarà evidentemente maggiore con bordo del solco più netto, profondità maggiore e pareti più ripide. Questo è necessario affinché le incisioni risultino più visibili dall'uomo e dalle macchine, in quanto i lettori di codici a barre funzionano con la riflessione di una luce Laser, o a LED, e quindi devono poter ben discriminare le zone "chiare" dalle zone "scure" di una superficie.

DESCRIZIONE DEL METODO D'ACQUISIZIONE

I solchi di 24 provini lavorati in diverse condizioni (tabella 1) sono stati misurati eseguendo delle scansioni trasversali (20 per ogni campione) ed ottenendo dei profili (di lunghezza pari a 5 mm) paralleli ed equidistanti (spaziatura di 0,4 mm). Il tratto del solco rettilineo acquisito è mostrato in figura 1.

Per realizzare il sistema di acquisizione automatico è stata impiegata la tecnica descritta in [6]. Un apposito software permette di gestire sia la movimentazione delle guide motorizzate che sostengono la testa di misura, sia

repeat test runs, for a total of 64 samples.

These parameters were put into relation to the geometrical indices (observed variables) described for engraving analysis in order to find optimal values for the greatest "readability" possible through an increase in light/shadow contrast. This visual contrast will of course be more evident with a sharper groove edge, greater depth and steeper walls. And this is what is needed to make engravings more visible to the human eye and scanners, since barcode scanners work through reflection of a laser beam or a LED and therefore must be able to discriminate well between the "pale" and "dark" zones on a surface.

DESCRIPTION OF THE ACQUISITION METHOD

The grooves on 24 samples worked under different conditions (table 1) were measured by

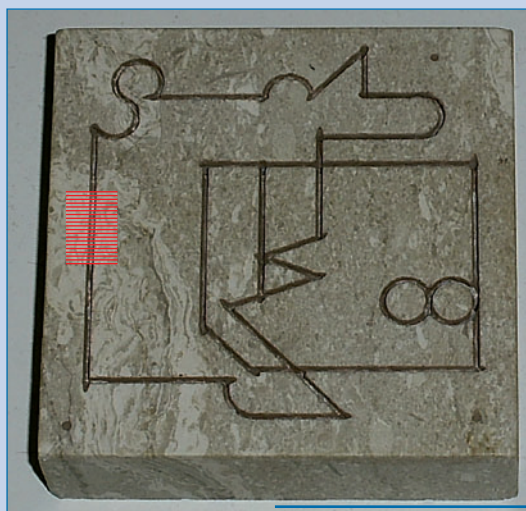


Fig. 1. Campione di Perlato di Coreno inciso da idrogetto con abrasivo. È evidenziata l'area e la direzione del profilo di acquisizione.

Top view of a sample of Perlato of Coreno engraved with an abrasive water jet. The area and direction of profile acquisition is enhanced.

Tab. 1 - FATTORI E LIVELLI DEL PIANO SPERIMENTALE ESEGUITO
FACTORS AND LEVELS OF THE EXPERIMENT PLAN

	Pressione acqua Pressure [MPa]	Velocità testa Speed [mm/min.]	Portata abrasiva Abrasive [g/min.]	Setup testa Head Setup [mm] (Ø foc. / Ø orif.) (Ø focuser / Ø nozzle)	Materiale Material
Livello basso Low Value	700	500	25	0,76 / 0,20	Bianco Carrara
Livello alto High Value	1200	1000	50	1,02 / 0,33	Perlato Coreno

l'acquisizione dei dati tramite PC. Il settaggio dell'unità di controllo è stato effettuato seguendo le specifiche utilizzate in [7], variando alcuni parametri a causa dei problemi incontrati durante le prove legati alla riflettività e accessibilità del raggio laser del sensore da parte del materiale e della geometria (tabella 2). Come sensore è stato utilizzato un profilometro ottico [8], basato su triangolazione di un laser visibile con spot *puntiforme* di 25 μm . Uno dei principali problemi riscontrati infatti è stato l'impossibilità di effettuare tali acquisizioni con un profilometro della stessa famiglia ma dallo spot *lineare*; essendo la larghezza dell'incisione più piccola delle dimensioni dello spot, la luce prodotta dal sensore non riesce a riflettere correttamente nel solco, riportando così delle misurazioni errate o impossibili.

means of crosswise scanning (20 times per sample) and getting profiles (5-mm in length) parallel and equidistant (0.4-mm spacing). The straight groove tracing acquired is shown in figure 1.

The technique described in [6] was used to create the automatic acquisition system. Special software made it possible to control both the movement of the motorized guides supporting the measuring head and data acquisition via PC. Control unit setting was done as per the specifications used in [7], varying some parameters due to the problems encountered in tests caused by the material's reflectivity and the geometry's accessibility to the sensor's laser beam (table 2). An optical profilometer [8] was used as sensor, based on triangulation of a visible laser with a 25 mm dot-shaped spot. In fact, one of the main problems encountered was the impossibility of making these acquisitions with a profilometer in the same family but having a linear spot; since the width of the engraving was smaller than spot size, the light the sensor produced was unable to correctly reflect in the groove, thus taking erroneous or impossible measurements.

All the measurements made were taken as an average for the 20 acquisitions done for each sample, corresponding to a given work condition in table 1.

The saved measurements were then filtered and analyzed (figure 2). Filtering was done using the following simple fixed-threshold criterion: by examining each profile point, an erroneous measurement is one that differs from the moving average around a point beyond an adjustable threshold. This was done in consideration of the fact that the profile must follow a continuous course within a given value field. If you consider that in a fairly short stretch the roughness (for example Ra) of the samples is certainly less than 10 to 20 μm [9], setting as threshold limit a value of 200 μm of difference between one point and the next it is possible to discern most of the erroneous values (spikes). These spikes are mainly due to the fact that the sensor's laser scatters on the reflecting surface of the marble. Errors are replaced with the value of the preceding point, thus eliminating noise and maintaining a constant number of values for each profile. The profiles examined are cross-sections of the groove (figure 2a). Figure 2b instead shows variation in bottom depth along groove direction.

Subsequently extrapolated were the geometrical parameters useful in characterizing the engraving (groove width and depth, slope, edge error due to uneven engraving) shown in figure 3 and defined as:

Tab. 2 - PARAMETRI UTILIZZATI PER L'ACQUISIZIONE DEI PROFILI
ACQUISITION PARAMETERS SETTINGS

Numero di profili per campione <i>Number of profiles per sample</i>	20
Spaziatura tra i profili [mm] <i>Spacing between profiles [mm]</i>	0,4
Lunghezza del profilo [mm] <i>Profile length [mm]</i>	5
Distanza sensore - campione [mm] <i>Distance sensor - sample [mm]</i>	20
Ampiezza di misura [mm] <i>Measuring range [mm]</i>	± 1
Laser spot \varnothing 25 μm (rosso), risoluzione nominale [μm] <i>Laser spot \varnothing 25 μm (red), nominal resolution [μm]</i>	0,25
Frequenza campionamento [campioni/s] <i>Sampling frequency [samples/s]</i>	512
Velocità di traslazione [mm/s] <i>Translation velocity [mm/s]</i>	0,4
Risoluzione spaziale lineare [campioni/mm] <i>Linear spatial resolution [samples/mm]</i>	1228
Numeri di campioni per profilo [di 5 mm] <i>Number of samples per profile [of 5 mm]</i>	6144
Emissione di luce* <i>Light emission*</i>	Auto
Metodo di misura* <i>Measurement method*</i>	Hi-Reso
Oggetto misurato* <i>Measuring target*</i>	Mirror

* parametri specifici del sensore ottico
specific sensor parameters

Tutte le misurazioni effettuate sono state prese come media tra le 20 acquisizioni fatte per ciascun provino, corrispondente ad una determinata condizione di lavorazione in tabella 1.

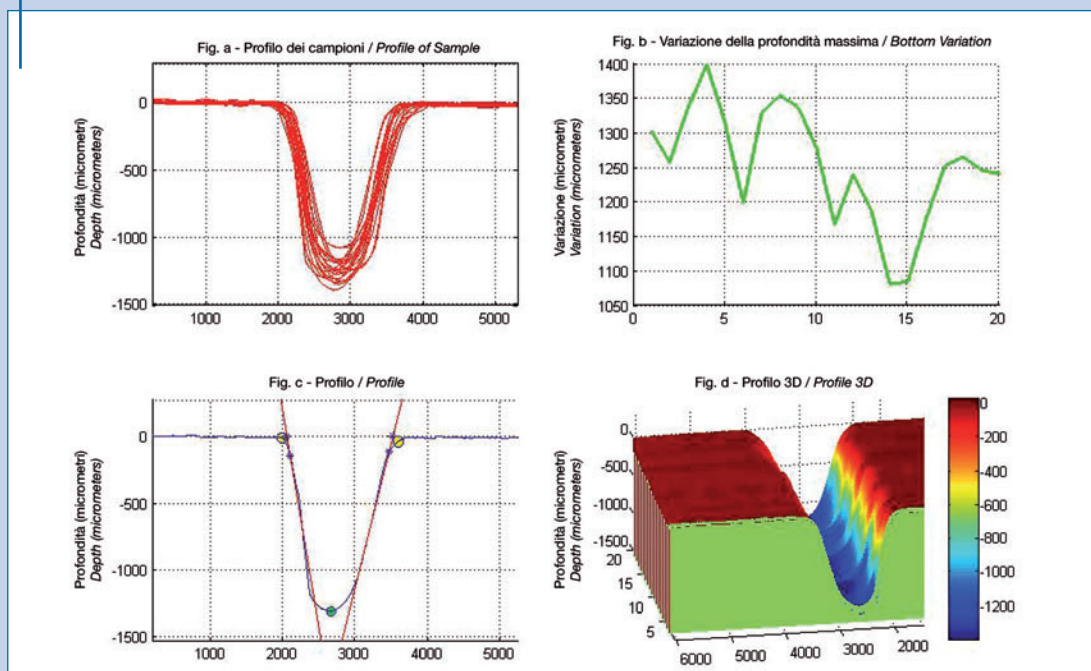
Le misurazioni salvate sono state successivamente filtrate ed analizzate (figura 2). Per le operazioni di filtraggio è stato utilizzato il seguente semplice criterio a soglia fissa: prendendo in esame ciascun punto del profilo, viene considerata errata una misura che si discosta dalla media dell'andamento, nell'intorno del punto, oltre una certa soglia regolabile. Questo è stato fatto considerando che il profilo deve avere un andamento continuo entro un certo campo di valori. Se si considera che in un tratto abbastanza piccolo le rugosità (es. Ra) dei campioni sono certamente inferiori a 10-20 μm [9], settando come soglia limite un valore di 200 μm di differenza tra un punto e il successivo, si riesce a discriminare la stragrande maggioranza dei valori errati (*spike*). I valori errati sono dovuti principalmente allo scattering del laser del sensore sulla superficie riflettente del marmo. L'errore viene quindi sostituito con il valore del punto precedente, così da eliminare il rumore e mantenendo un numero costante di valori per ogni profilo. I profili esaminati appartengono alle sezioni *trasversali* del solco

- The nominal **width** of the groove, calculated as the distance between two reference points (yellow points in figure 3) identifying the beginning and end of the groove. The reference points are found along a profile when the following condition is met: 100 consecutive points below a height of minus 100 μm . This condition pinpoints the descending stretch of the profile.
- Nominal **depth**, representing minimum groove height (green point in figure 3).
- The **slope** of the groove's walls is calculated as the angle of inclination of the line passing through two points taken at a fixed distance from the reference points on the two slopes of the groove. It is calculated as the average slope from both sides.
- The **edge error** of the groove is the difference between the surface of the ideal engraving (sharp-cornered profile) and the real one. The ideal profile is determined by the intersection of the slope lines with the line that interpolates the surface of the sample (zero height).

To calculate the area within the groove profile

Fig. 2. (a) insieme dei 20 profili presi per ogni campione; (b) variazione della profondità massima dei venti profili; (c) sezione trasversale di un singolo profilo; (d) visualizzazione 3D dei 20 profili acquisiti.

(a) all of the 20 profiles taken for each sample; (b) variation in maximum depth of the 20 profiles; (c) cross-section of an individual profile; (d) 3D viewing of the 20 profiles acquired.



(figura 2a). La figura 2b mostra invece l'andamento della quota del fondo *lungo* la direzione del solco.

Successivamente sono stati estrapolati i parametri geometrici utili alla caratterizzazione dell'incisione (larghezza e profondità del solco, pendenza, area persa ai bordi a causa dell'irregolarità dell'incisione) rappresentati in figura 3 e definiti come segue:

- La **larghezza** nominale del solco è stata calcolata come distanza tra i due *punti di riferimento* (punti gialli in figura 3) che identificano inizio e fine del solco. I punti di riferimento vengono individuati lungo un profilo quando viene soddisfatta la seguente condizione: 100 punti consecutivi al di sotto della quota di $-100\ \mu\text{m}$. Questa condizione individua il tratto discendente del profilo.
- La **profondità** nominale rappresenta la quota minima del solco (punto verde in figura 3).
- La **pendenza** delle pareti del solco è calcolata come l'angolo di inclinazione della retta passante da due punti presi ad una distanza fissa dai punti di riferimento sui due versanti del solco. Viene considerata la media delle pendenze di entrambi i lati.
- L'**area persa** ai bordi del solco è la differenza tra la superficie relativa all'incisione ideale (profilo a spigolo vivo) e quella reale. Il profilo ideale viene determinato dall'intersezione tra le rette di pendenza con la retta che interpola la superficie del campione (quota zero).

Per il calcolo dell'area contenuta all'interno del profilo del solco sono stati esaminati tre metodi di approssimazione, basati sulle seguenti geometrie:

- Il triangolo *circoscritto* al profilo (figura 4, sinistra), che ha come base la larghezza ideale del solco (tra i due punti di riferimento) e come altezza la distanza tra la base e

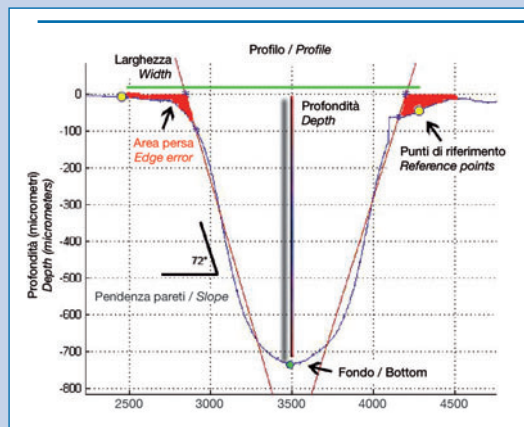


Fig. 3. Caratterizzazione di un profilo del solco acquisito tramite profilometro ottico con i parametri di tabella 2.

Characterization of a groove profile acquired by optical profilometer, with the parameters in table 2.

three approximation methods were examined, based on the following geometries:

- The triangle circumscribing the profile (figure 4, left), whose base is the ideal width of the groove (between two reference points) and whose height is the distance between the base and the intersection of the lines approximating the walls.
- The isosceles triangle inscribed within the profile (figure 4, right), whose height is the distance between the base and the bottom. It is considered isosceles because, save alignment errors in the testing and measuring stage, the process is axially symmetrical. These first two techniques were discarded because, as is evident in figure 4, they represent approximations of area respectively too large and too small.
- The isosceles trapezoid inscribed within the profile (figure 5), whose largest base is ideal

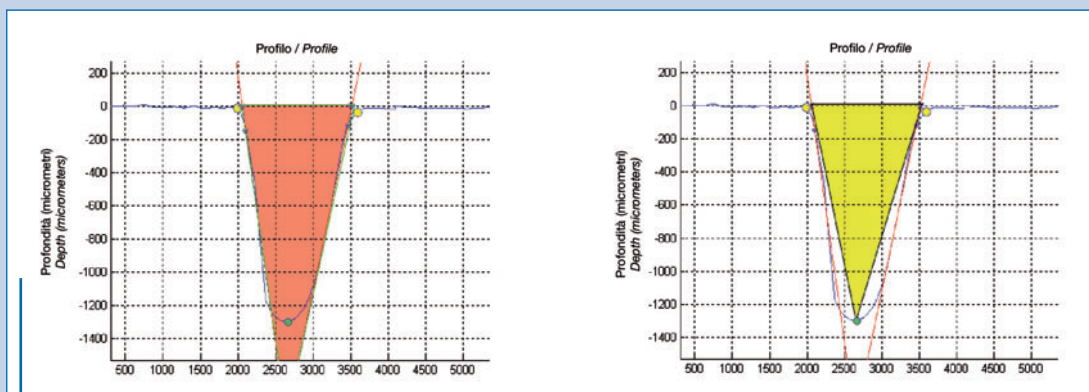


Fig. 4. Approssimazione per eccesso (triangolo circoscritto in rosa) e approssimazione per difetto (triangolo inscritto in giallo). *Over-approximation (triangle circumscribed in pink) and under-approximation (triangle inscribed in yellow).*

l'intersezione delle rette che approssimano le pareti.

- Il triangolo *isoscele inscritto* nel profilo (figura 4, destra), che ha come altezza la distanza tra la base e il fondo. Viene definito *isoscele* poiché, salvo errori di allineamento in fase di lavorazione e di misura, il processo è a simmetria assiale. Queste due prime tecniche sono state scartate in quanto, come risulta evidente dalla figura 4, rappresentano approssimazioni rispettivamente per eccesso e per difetto dell'area.
- Il *trapezio isoscele inscritto* nel profilo (figura 5), che ha come base maggiore la larghezza ideale, come altezza la distanza tra la base e il fondo e come base minore la distanza tra le intersezioni tra le due rette che approssimano le pareti del solco e la linea orizzontale passante per il fondo. Questa è la geometria che più si avvicina alla misura reale. A questa misura vengono aggiunte le aree perse ai bordi, dato che anch'esse tengono conto del materiale asportato durante la lavorazione e quindi potrebbero avere interesse in eventuali bilanci di massa.

Moltiplicando l'area del profilo (figura 5) e la velocità di avanzamento, è stato calcolato anche il volume di materiale asportato nell'unità di tempo, come indice di produttività del processo.

ELABORAZIONE DEI DATI ACQUISITI

I parametri acquisiti sono stati elaborati con un software di indagine statistica, al fine di ricavare quali fattori di processo, o combinazioni di essi, influiscono maggiormente su un ben preciso indicatore geometrico.

Per l'analisi vengono visualizzati:

- il *diagramma di Pareto*, 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. figura 8;
- il *grafico degli effetti principali*, in grado di tener conto, in modo qualitativo, dell'effetto delle variabili indipendenti su quelle dipendenti, es. figura 6;
- il *grafico delle interazioni*, che visualizza i livelli di una variabile dipendente in base ai valori medi assunti da due variabili indipendenti combinate, es. figura 7.

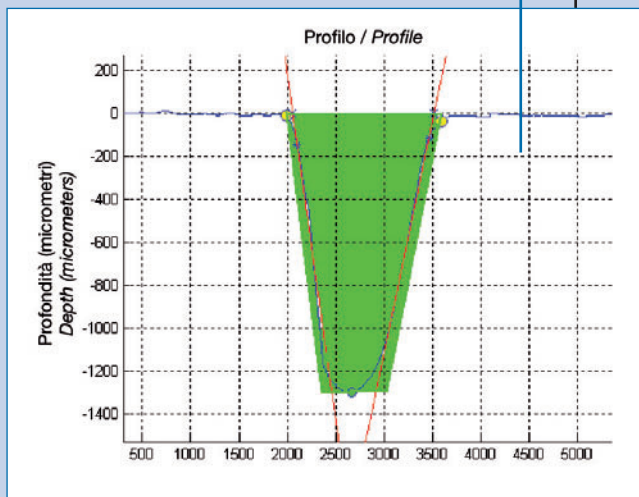
RISULTATI DELL'ANALISI

Dall'analisi sperimentale descritta è possibile delineare delle linee guida per impostare i parametri della macchina water jet al fine di ottenere le caratteristiche geometriche desiderate.

Tali informazioni sono sintetizzate nella

Fig. 5. Approssimazione della forma trapezoidale (in verde) del solco per la determinazione della sezione asportata.

Approximation of the trapezoid shape (in green) of the groove to determine the section removed.



width, whose height is the distance between base and bottom and whose smaller base is the distance between the two lines approximating the walls of the groove and the horizontal line passing through the bottom. This is the layout closest to actual measurement. To this measurement are added the edge errors, since these also take into account the material removed during work and could therefore be of interest in any mass balances.

Multiplying the area of the profile (figure 5) and feed rate, also calculated was the volume removal rate as an index of process productivity.

ACQUIRED-DATA PROCESSING

The acquired parameters were processed using statistical-analysis software in order to learn what factors, or combination of factors, had the most influence on a precise geometrical feature. Visualized for the analysis were:

- *the Pareto chart, consisting of a histogram of the percentage distribution of a phenomenon, in decreasing order. The graph can help establish which factors have most influence on a given phenomenon, for example see figure 8;*
- *the Main effects chart, able to qualitatively consider the effect of independent variables on the dependent ones, for example see figure 6;*
- *the Interaction plot, which visualizes the levels of a dependent variable on the basis of*

tabella 3, costruita come descritto di seguito. Ad ogni parametro di processo, presente su ogni riga, viene associato l'effetto che è in grado di produrre sull'indice geometrico specifico riportato in colonna. Il numero di punti (0, 1 o 2) sintetizza l'importanza dell'effetto come evidenziato dalle analisi statistiche, mentre la freccia specifica se l'effetto del parametro è positivo (concorde) o negativo (discordo) sull'indice geometrico. Relativamente all'uso delle informazioni contenute nella tabella 3 da un punto di vista applicativo, per la scelta dei parametri di lavorazione su cui agire, conviene partire da quello che dà il contributo maggiore (2 punti), per poi effettuare una regolazione più fine grazie agli altri parametri presenti (1 punto).

DISCUSSIONE

L'incisione water jet potrebbe essere assimilata all'effetto di uno scalpello. La pressione determina l'intensità dei colpi, la focalizzazione (setup della testa) la dimensione della punta, la velocità di avanzamento la frequenza dei colpi e la quantità di abrasivo l'affilatura.

Dalle misure effettuate risulta che la quantità di abrasivo presente nel flusso influenza maggiormente una azione di superficie, provocando una diminuzione della pendenza delle pareti del solco prodotto (figura 6) e un aumento dell'area persa ai bordi: questo produce un effetto di "arrotondamento" che si traduce in un peggioramento estetico (riduzione del contrasto visivo).

La scelta della portata di abrasivo risulta quindi molto importante per la determinazione del taglio

average values assumed by two combined independent variables, for example see figure 7.

ANALYSIS OF RESULTS

From the experimental analysis described it is possible to delineate guidelines for setting the water jet's parameters in order to get the geometric characteristics desired.

This information is summarized in table 3, constructed as per the following description. Every process parameter present in the descending column is associated with the effect it is able to produce on the specific geometrical index listed across. The number of points (0, 1 or 2) synthesise the importance of the effect according to the statistical analysis, while the arrow specifies whether the parameter effect is positive (concordant) or negative (discordant) with the geometrical index.

Regarding use of the information given in table 3 from the applicative standpoint, for choosing the work parameters on which to act, it is best to start from what makes the largest contribution (2 points) and then fine tune the other parameters present (1 point).

DISCUSSION

Water jet engraving can be likened to the effect of a chisel. Pressure determines the force of the strokes, focusing (head setup) the size of the point, speed or feed rate the frequency of the strokes and the abrasive flow rate the sharpness of the tool.

Tab. 3 - SCHEMA RIASSUNTIVO DEGLI EFFETTI DEI PARAMETRI DI INCISIONE WATER JET (RIGHE) SULLE CARATTERISTICHE DEL SOLCO (COLONNE)
SCHEMATIC SUMMARY OF THE EFFECTS OF WATER JET ENGRAVING PARAMETERS (DOWN) ON GROOVE CHARACTERISTICS (ACROSS)

	Larghezza Width	Profondità Depth	Pendenza Slope	Area persa Edge error	Unità di volume Volume removal rate
Pressione dell'acqua Water pressure		•• ↗	•• ↗	•• ↗	
Portata abrasivo Abrasive flow rate		• ↘	•• ↘	• ↗	•• ↘
Velocità di avanzamento Speed		• ↘			•• ↘
Setup della testa Head setup	•• ↗				• ↗
Durezza del materiale Material hardness		•• ↘	• ↘		• ↘

Fig. 6. Effetti sulla pendenza: per ogni parametro considerato, il grafico mostra come varia la pendenza.

Effetto positivo (concorde): la pendenza aumenta al crescere del parametro.

Effetto negativo (discorde): la pendenza diminuisce al crescere del parametro. Le unità di misura per le ascisse dei grafici si possono evincere da tabella 1.

Effects on slope: for every parameter considered the graph shows how slope varies.

Positive (concordant) effect: slope increases as the parameter increases.

Negative (discordant) effect: slope decreases as the parameter increases. Measurement units for the graphs' abscissas can be gotten from table 1.

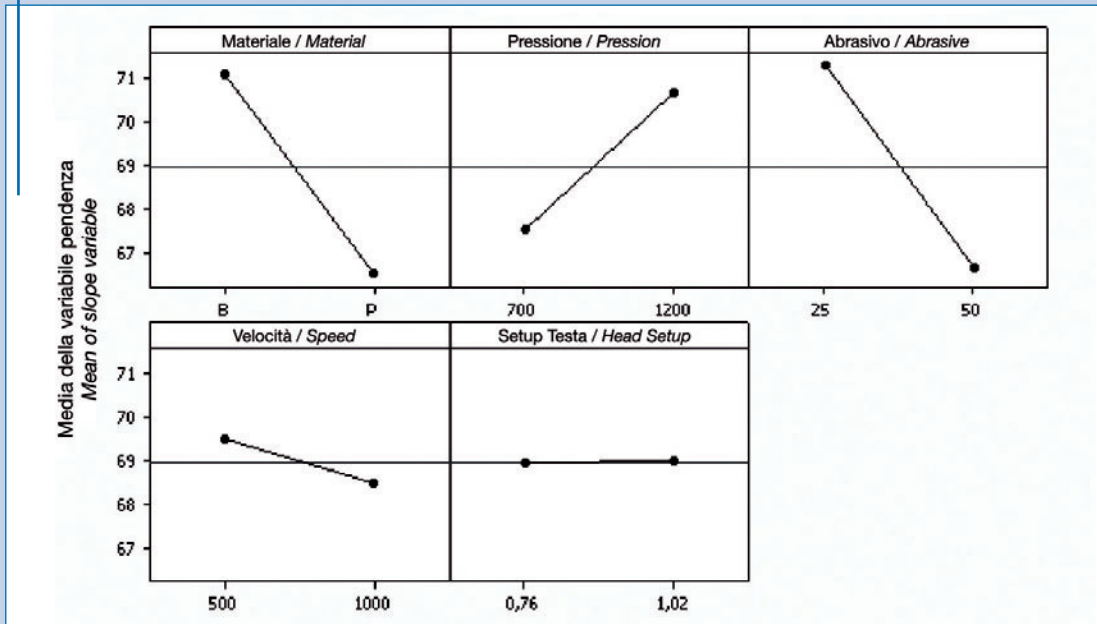
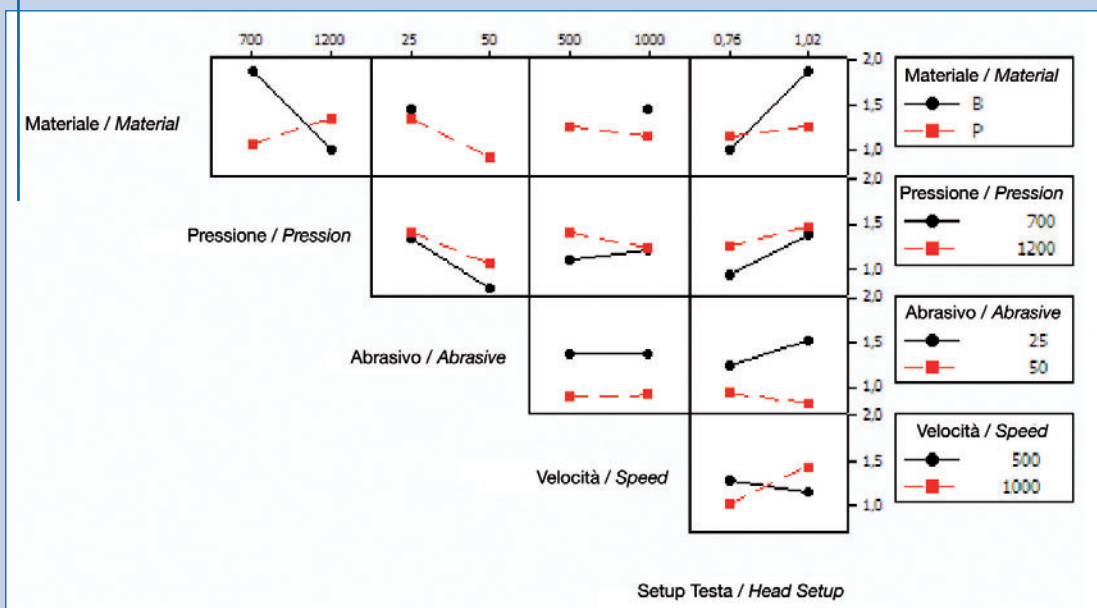


Fig. 7. Grafico dell'effetto delle interazioni tra i fattori sulla variabile osservata "volume asportato".

Graph of the effect of interactions between factors on the observed variable of volume removed.



dei lapidei. Come citato in [3], se la portata è troppo bassa prevale l'azione erosiva dell'acqua e quindi si ha un effetto più superficiale (aumenta la larghezza); se è troppo alta, l'abrasivo sottrae energia al getto, riducendo le prestazioni del processo (non si riesce ad andare troppo in profondità). Una possibile motivazione è che con meno abrasivo agisce una modalità di asportazione fragile, basata sull'effetto dell'acqua che non taglia ma fa espandere cricche nel materiale, asportando molto materiale. Un'altra spiegazione è che aumentando la portata di abrasivo non si ottiene più un incremento delle prestazioni oltre un certo limite, perché le particelle di abrasivo si urtano tra loro, rompendosi, e l'efficienza dello scambio di quantità di moto acqua-abrasivo si riduce. Esiste quindi un punto di ottimo, inferiore al massimo valore di portata di abrasivo testato, tale da consentire la massima profondità di taglio.

La velocità di avanzamento ha un effetto diretto sulla produttività (millimetri di solco prodotto ogni minuto). Inoltre essa determina il volume asportato nell'unità di tempo. Se aumento la velocità di avanzamento percorro una distanza maggiore nell'unità di tempo, ma il solco sarà meno profondo poiché diminuisce l'energia specifica del getto.

Interessante notare in figura 7 il grafico velocità/setup, che rappresenta l'interazione del setup della testa con la velocità di avanzamento sulla variabile osservata "volume di materiale asportato": a bassa velocità si ha una maggiore asportazione focalizzando di più (setup basso), mentre ad alta velocità conviene "defocalizzare" (setup alto) per aumentare l'asportazione.

La pressione è come prevedibile uno dei parametri più determinanti. Influisce maggiormente sulla profondità e sulla pendenza del solco (figura 6); questo è da ritenersi significativo per l'aumento di contrasto (luce/ombra) del materiale e quindi per operazioni di marcatura per tracciabilità su lapideo.

Il setup della testa water jet regola l'area su cui agisce il getto: è quindi rilevante per la larghezza *in primis* (figura 8) e per la quantità di materiale asportato. Inoltre una focalizzazione del getto determina una maggiore profondità e pendenza, ma deve essere supportata da un'adeguata pressione. La focalizzazione determina solamente l'area investita dal getto ma non l'energia immessa: esso deve essere sostenuto da un'adeguata pressione.

Dalle nostre osservazioni risulterebbe conveniente agire sulla velocità (riducendola) per ottimizzare la produttività. Avendo constatato che con i valori utilizzati nel piano sperimentale all'aumentare della velocità di avanzamento il

The measurements taken show that the abrasive flow rate in the water jet has greater influence on surface action, lessening slope on the walls of the groove created (figure 6) and increasing the edge error; this creates a "rounding" effect that translates into an aesthetic worsening (reduction of visual contrast).

So choosing the abrasive flow rate is very important in cutting the stone. As cited in [3], if the abrasive flow rate is too low, the erosive action of the water prevails and the effect is more on the surface (width increases); if it is too high, the abrasive takes energy away from the jet, reducing process performance (it can't go deep enough). One possible reason is that with less abrasive a fragile method of removal is enacted, based on the effect of the water which does not cut but simply expands cracks in the material, removing quite a lot of it. Another explanation is that increasing abrasive capacity increases performance but only to a certain extent because the abrasive particles impact one another and break so that the effectiveness of the combined movement-water-abrasive action is reduced. Therefore, an optimal point exists, lower than the highest value of abrasive capacity tested, permitting maximum cut depth.

Speed or feed rate has a direct effect on productivity (millimeters of groove made each minute). In addition, it determines the volume removal rate. If we increase feed rate we travel further in a unit of time but the groove will be shallower because the specific energy of the jet decreases.

Interesting to note in figure 7 is the speed/setup graph, which shows the head setup's interaction with speed on the observed variable of volume removal rate: when speed is low, by focusing more there is greater removal (low setup), while at high speed it is best to "defocus" (high setup) to increase removal.

As could be expected, water pressure is one of the most determinant variables. It has greater influence on the groove's depth and slope (figure 6); this is considered significant in terms of increased contrast (light/shadow) on the material and therefore in marking work for product traceability.

The water jet's head setup regulates the area on which the jet works and so is important, first and foremost, for width (figure 8) and for the amount of material removed. In addition, focusing the jet leads to greater depth and slope but has to be backed by adequate pressure. Focusing determines only the area being hit by the jet, not the power being exerted: this must come from adequate pressure.

According to our observations it would be best to fine tune speed (lowering it) to optimize

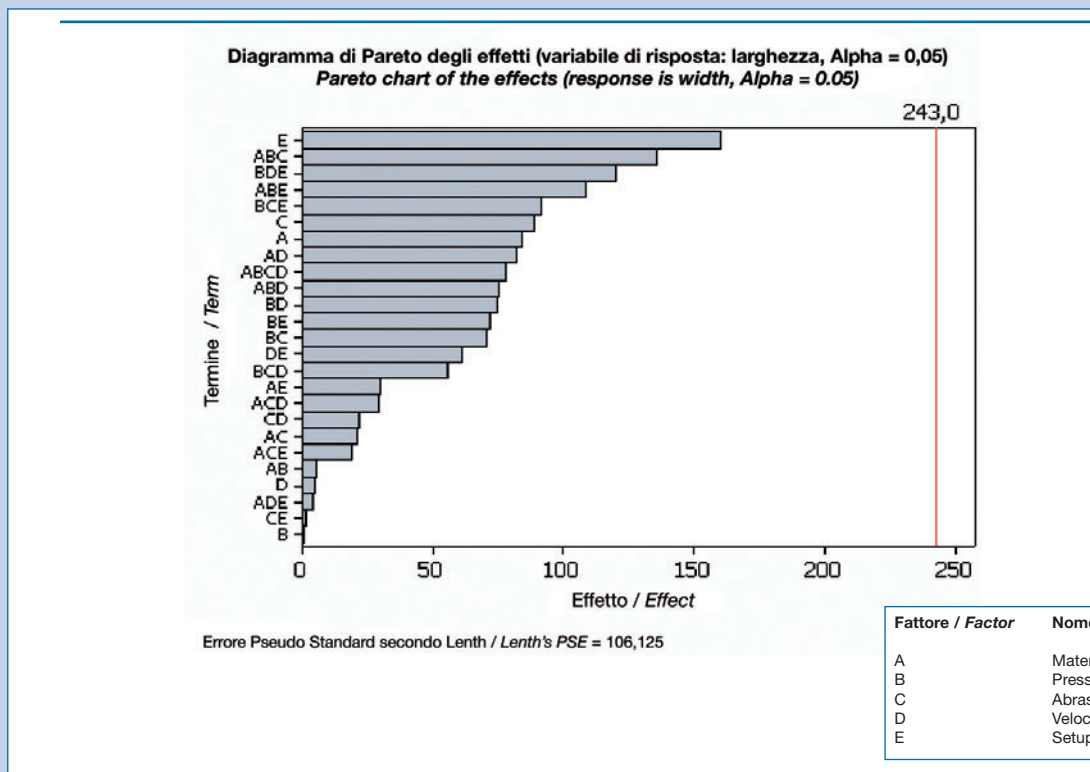


Fig. 8. Analisi statistica dei profili dei solchi. Effetto predominante del parametro E = setup della testa water jet sulla larghezza del solco ottenuto.

Statistical analyses of groove profiles. Predominant effect of parameter E = water jet head setup on groove width.

volume unitario asportato diminuisce, il massimo si troverà a velocità inferiori. Ridurre la velocità di avanzamento ha anche l'effetto di migliorare la qualità visiva del solco, cioè aumentare la profondità senza aumentare in modo significativo l'area persa ai bordi.

In altre parole tra aumentare la pressione e diminuire la velocità conviene, una volta scelto il valore di pressione che ci permette di ottenere la profondità voluta, diminuire la velocità, dato che l'aumento di pressione produce anche un aumento dell'area persa e quindi una peggiore qualità del prodotto. Possiamo affermare cioè che per avere un buon contrasto (solco più profondo e più ripido) si debba agire sul parametro velocità.

CONCLUSIONI

In estrema sintesi, si può affermare che al fine di ottenere un aumento del contrasto visivo sui materiali esaminati, conviene agire prevalentemente sulla pressione del getto e ridurre la velocità di avanzamento e la portata di abrasivo. Per avere una maggiore produttività in termini di materiale asportato nell'unità di tempo, si deve defocalizzare il getto e diminuire velocità e portata

productivity. Having noted that, with the values used in the experimental plan, an increase in speed leads to less volume removal rate, optimal performance is found at lower speeds. Reducing speed also has the effect of improving the visual quality of the groove, that is, it increases depth without significantly increasing the edge error. In other words, between increasing pressure and decreasing speed, once the amount of pressure enabling us to get desired depth has been chosen, it is best to reduce speed, since an increase in pressure also means an increase in edge error, and therefore lower product quality. And so we can state that, to get good contrast (a deeper and steeper groove) you have to work on the speed parameter.

CONCLUSIONS

Very briefly we can say that in order to get more visual contrast on the materials examined it is best to work mainly on the jet-pressure parameter and reduce both speed and abrasive flow rate.

To be more productive in terms of material removed in a given unit of time, the water jet should be defocused and speed and abrasive

di abrasivo. La larghezza è invece determinata (ridotta) prevalentemente dalla focalizzazione (set-up) del getto d'acqua.

- **Aumento contrasto:** **pressione, velocità, abrasivo.**
- **Aumento produttività:** **pressione, setup, velocità, abrasivo.**
- **Aumento larghezza:** **setup.**

Legenda: **umentare, diminuire.**

flow rate reduced. Width is instead determined (reduced) mostly by focusing the water jet (head setup).

- **Greater contrast:** **pressure, speed, abrasive.**
- **Greater productivity:** **pressure, setup, speed, abrasive.**
- **Bigger width:** **setup.**

Legend: **increase, decrease.**

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato sviluppato come progetto del corso di Automazione dei Processi Produttivi degli studenti Jacopo Creatini, Gaspare Santaera e Sauro Soldani del corso di Laurea Specialistica in Ingegneria dell'Automazione a.a. 2008-09.

Gli autori ringraziano il prof. Giovanni Tantussi del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione.

Acknowledgements

This study was developed by students Jacopo Creatini, Gaspare Santaera and Sauro Soldani as a project for their Production Processes Automation course taken towards a degree in Automation Engineering during the academic year 2008/09.

The authors thank Prof. Giovanni Tantussi of the Department of Mechanical, Nuclear and Production Engineering.

Note

M. Lanzetta¹, J. Creatini¹, G. Santaera¹, S. Soldani¹, M. Annoni²:

1. Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione – Università di Pisa;
2. Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Milano.

Notes

M. Lanzetta¹, J. Creatini¹, G. Santaera¹, S. Soldani¹, M. Annoni²:

1. Department of Mechanical, Nuclear and Production Engineering – University of Pisa, Italy;
2. Mechanical Department – Politecnico di Milano, Italy.

Bibliografia / Bibliography

- [1] M. Lanzetta, F. Fanti, G. Tantussi, "Automazione e controllo visivo della marcatura di prodotti (Parte Seconda) / Automating and visually inspecting product marking", in "Marmomacchine Classic", n. 201, maggio-giugno / May-June 2008, Editrice Promorama, Milano, pp. 72-80.
- [2] S. Turchetta, L. Carrino, W. Pollini, "Laser cutting in ornamental stone working", in "Marmomacchine International", n. 39, ottobre-dicembre / October-December 2008, Editrice Promorama, Milano, pp. 70-74.
- [3] A. W. Momber, R. Kovacevic, "Principles of Abrasive Water Jet Machining", Springer-Verlag London, 1998.
- [4] ASTM C170 - 06 Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone.
- [5] UNI EN 14205:2004 Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della durezza Knoop / Test Methods for Natural Stones - Determining Knoop micro-hardness.
- [6] M. Lanzetta, G. Tantussi, V. Zambardi, "Rilievo micrometrico di superfici con metodi ottici / Micrometric surface surveying with optical methods (in Italian)", in "Automazione e Strumentazione Elettronica Industriale / Industrial Automation and Electronics", anno / year LVI, n. 5, maggio / May 2008, pp. 178-184.
- [7] A. Bernardelli, G. Lenzi, "Caratterizzazione di superfici lapidee mediante lavorazione water jet / Characterizing stone surfaces by working with a water jet (in Italian)", Relazione di tirocinio per il conseguimento della laurea in Ingegneria Meccanica / Engineering degree thesis, 2008.
- [8] G. Tantussi, M. Lanzetta, "Analyses of stone surfaces by optical methods", A.I.Te.M 2007, Proceedings of the 8th Conference of the Italian Association of Mechanical Technology, Montecatini (PT), Italy, September 10th-12th, 2007, Ed. Del Taglia A., Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università degli Studi di Firenze, Pub.: Centro Editoriale Toscano, Firenze, Italy, ISBN: 88-7957-264-4, pp. 97 (29).
- [9] 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, maggio / May 29-31, 2008, pp. 193-198.