

Anno 13 n° 51

# DIAMANTE

◆ APPLICAZIONI & TECNOLOGIA ◆

Publicazione trimestrale - Dicembre 2007 - Spedizione in A.P. 45% - Art. 2 - comma 20/b Legge 662/96 - Filiale di Milano

**MIMITALIA**  
Metal Injection Moulding

**diamond pauber**  
DIAMOND TOOLS

# USURA DI PERLINE DIAMANTATE SINTERIZZATE NEL TAGLIO DEL MARMO: CARATTERIZZAZIONE E METODI DI MISURA

CLEMENTE M. , TANTUSSI G., LANZETTA M.

UNIVERSITÀ DI PISA, DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA,  
NUCLEARE E DELLA PRODUZIONE , PISA

## 1. Abstract

L'articolo tratta un metodo sperimentale per sottoporre perline diamantate a prove di durata. Il metodo prevede l'uso di una macchina di prova per perlina singola con impostazione di parametri di lavorazione (forza di contatto e velocità di taglio) equivalenti alle condizioni reali del taglio con filo diamantato. Vengono descritte diverse tecniche appositamente sviluppate per l'analisi dello stato dei diamanti e la quantificazione dell'usura in funzione del materiale asportato con perline sinterizzate nel taglio di un Bianco di Carrara e di un Perlato di Coreno.

## 2. Introduzione

I fili diamantati sono largamente impiegati nel taglio di materiale lapideo in cava, sia nel taglio al monte che per operazioni di riquadratura e più recentemente anche in telai mono e multifilo. Sono costituiti da un cavo di acciaio sul quale vengono inserite circa 30 - 40 perline diamantate per ogni metro, che costituiscono la parte tagliente del filo insieme ad altri componenti come molle, distanziali e bloccaggi.

Le perline diamantate sinterizzate presentano la caratteristica di esporre sempre nuovi diamanti al taglio e di rilasciarli per effetto dell'usura della matrice metallica che li contiene. Hanno una durata (e un costo) superiore rispetto a quelle elettrodepositate e, pertanto, richiedono prove di usura molto lunghe e l'uso di metodi più raffinati al fine di apprezzare l'evoluzione dell'usura stessa. Le perline diamantate sinterizzate impiegate hanno caratteristiche similari ad un tipo innovativo di perline a basso impatto ambientale [1], per quanto riguarda geometria, tipologia di diamanti e mesh, che differiscono solo per la composizione della matrice metallica e che saranno oggetto di un ulteriore studio e di una valutazione comparativa con le attuali perline.

Il test della perlina comprende due fasi principali:

- Prove di taglio con perline diamantate sinterizzate;
- Analisi sperimentale dell'usura delle perline diamantate sinterizzate.

## 3. Prove di taglio con perline diamantate sinterizzate

Altri ricercatori hanno svolto prove di taglio sistematiche con perline diamantate [2] [3] [4] [5], ma le misure in forma aggregata rendono difficili analisi comparative. Le prove di taglio vengono effettuate con

# Marble cutting wear of sintered diamond beads: characterisation and measuring methods

CLEMENTE M. , TANTUSSI G., LANZETTA M.

UNIVERSITY OF PISA, DEPARTMENT OF MECHANICAL, NUCLEAR  
AND PRODUCTION ENGINEERING, PISA, ITALY

## 1. Abstract

The paper deals with an experimental method for diamond bead life time testing. The method is based on a testing machine for each single bead by machining parameter setting (contact force and cutting speed) equivalent to diamond wire cutting real conditions. The different techniques are described purposely developed for diamond condition analysis and wear evaluation as a function of the removed material by sintered beads during white Carrara marble and Perlato di Coreno cutting.

## 2. Introduction

Diamond wires are widely used for stone material cutting in quarry, both in cutting in quarry and for squaring and more recently also in single and multi wire machine.

They are made by a steel cable on which about 30 - 40 diamond beads are stringed per each meter that constitute the cutting component of the wire together with the other component as springs, spacers and fasteners.

Diamond sintered beads have the characteristic to show always new diamond for cutting and to release them due to the wear effect of the metal matrix that holds them.

They have a life time (and a cost) higher than the electro-deposited beads and therefore they require very long wear tests and the use of more refined measuring methods in order to evaluate wear evolution.

Diamond sintered beads have characteristics similar to an innovative type of low environmental impact beads regarding geometry, diamond typology and mesh [1], that differ only for composition of metal matrix and that will be subject of a further study and a comparative evaluation with the present beads.

Bead test includes two principal phases:

- Cutting tests with diamond sintered beads
- Experimental analysis of diamond sintered bead wear.

## 3. Cutting tests with diamond sintered beads

Other scientists made systematic cutting tests with diamond sintered beads [2] [3] [4] [5], but measurements in an aggregate form make difficult comparative analysis. Cutting tests are made on a testing machine specifically made in previous studies [6], that allows to simulate the behaviour of a single diamond bead during diffe-



una macchina di prova specificatamente realizzata in studi precedenti [6], che permette di simulare il comportamento di una singola perlina diamantata durante il taglio di diversi materiali, compresi lapidei [7] e metalli [8]. I risultati ottenuti in studi precedenti sulle perline elettrodepositate dimostrano che la macchina di prova riproduce con buona approssimazione le condizioni di taglio reali. Per la prima volta, in questo studio, la macchina è stata utilizzata per eseguire prove con perline diamantate sinterizzate. Per confronto con dati industriali è stato possibile calcolare il parametro forza di contatto, tra la perlina ed il campione di marmo (14,8 N), da impostare sulla macchina di prova e validare i valori della velocità di

asportazione ottenuti (0,16 m<sup>2</sup>/ora) e del volume di marmo asportato, anche nel caso di perline diamantate sinterizzate [9]. Per eseguire le prove di taglio, la perlina viene calettata e fissata con adesivo su un albero di acciaio Ø 6 mm (Fig.1), opportunamente rastremato, e portata in rotazione da un elettromandrino fino alla velocità di 65.000 giri/minuto, corrispondenti ad una velocità di taglio di 34 m/s. È, inoltre, necessario preparare dei dischi di marmo ricavando appositi solchi mediante un disco diamantato (Fig.2).

Il disco di marmo ruota in opposizione alla velocità di 8 giri/minuto (Fig.3). Durante le prove, la perlina viene refrigerata con acqua (Fig.4) e premuta contro la superficie del disco con una forza costante (≈15 N per

il marmo Bianco di Carrara e ≈25 N per il Perlato di Coreno) grazie ad un sistema di retroazione per stabilizzare la forza di contatto.

Ciascuna prova consiste nell'asportazione di materiale a partire da un disco con diametro iniziale di 300 mm fino ad un diametro finale di 160 mm.

Le analisi sono state effettuate su due perline diamantate sinterizzate, eseguendo 41 prove di taglio sia su marmo Bianco di Carrara che su Perlato di Coreno.

Lo stato di usura di ciascuna perlina è stato analizzato dopo le prime 5 prove di taglio per permettere ai diamanti di emergere dalla matrice e, successivamente, a cicli di 9 prove ciascuno corrispondenti alla lavorazione di 3 campioni di marmo. Durante ogni prova vengono monitorati gli andamenti in funzione del

rotated by an electro-spindle up to 65.000 rpm, corresponding to a cutting speed 34 m/s.

Moreover it is necessary to prepare marble disks obtaining suitable grooves by a diamond disk (Fig.2).

The marble disk rotates in opposition to the speed 8 rpm (Fig.3).

During tests, bead is cooled by water (Fig.4) and pressed against disk surface with a constant force

(≈ 15 N for white Carrara marble and ≈ 25 N Perlato di Coreno marble) thanks to a feedback system to stabilize contact force. Each test consists in material removal starting from a disk with 300 mm starting diameter up to 160 mm final diameter.

The analysis were performed on two diamond sintered beads executing 41 cutting tests on both white Carrara marble and Perlato di Coreno marble.

Wear condition of each bead was analysed after the first five cutting tests to allow diamonds coming out from matrix and after 9 cycles of tests each corresponding to 3 marble sample cutting.

During each test the behaviours have been monitored as a function of time with 50 Hz acquisition frequency of: □ relative contact force between diamond bead and



Fig.1 Perlina montata sull'albero  
Bead fitted on the shaft



Fig.2 Cippo di marmo (destra) prima dell'esecuzione di solchi con disco diamantato (sinistra)  
Marble piece (right) before grooves execution by a diamond disk (left)

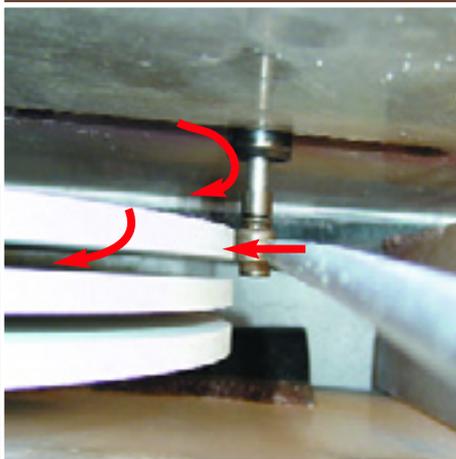


Fig.3 Cippo di marmo dopo la realizzazione dei solchi, con perlina diamantata allineata e pronta al primo taglio / Marble piece after groove execution with diamond bead aligned and ready for the first cut



Fig.4 Perlina diamantata durante il taglio del secondo disco investita dal refrigerante  
Diamond bead during the cutting of the second disk impinged by coolant

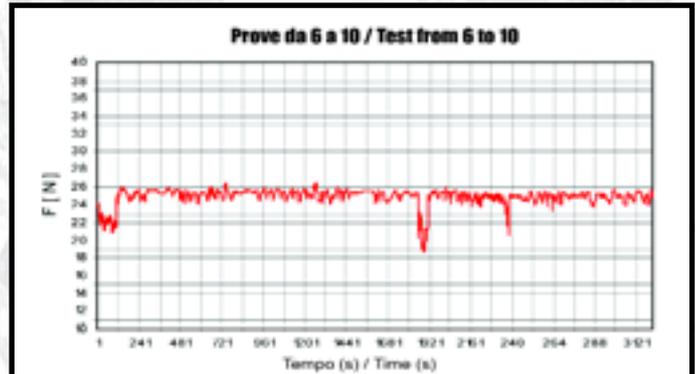
rent material cutting, included stones [7] and metals [8]. The results obtained in previous studies on electro-deposited beads demonstrate that test machine reproduces real cutting conditions with a good approximation. For the first time in this study machine was used to perform tests with diamond sintered beads. For a comparison with the industrial data it was possible to compute the contact force parameter between bead and marble sample (14,8 N) to set on test machine and validate the obtained removal speed values (0,16 m<sup>2</sup>/hour) and the marble removed volume values, also in the case of diamond sintered beads [9]. To perform cutting tests, bead has to be fitted and secured by adhesive on a steel shaft Ø 6 mm (Fig.1) suitably tapered and



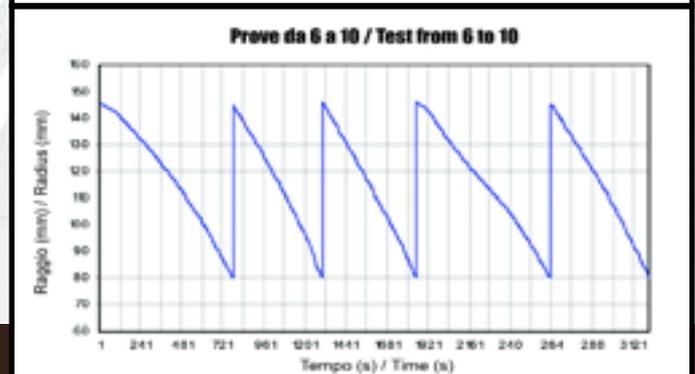
- tempo con frequenza di acquisizione di 50 Hertz di:
- forza di contatto relativa tra la perlina diamantata ed il materiale da tagliare;
  - posizione relativa tra la perlina diamantata ed il materiale da tagliare;
  - coppia applicata all'asse di rotazione del campione di marmo.

Alcuni esempi, con l'andamento di queste grandezze durante le prove, sono riportati nelle Figg. 5, 6 e 7 che rappresentano le prove da 6 a 10 della perlina testata con Perlato di Coreno. Per l'analisi di tutte le prove di taglio sono stati realizzati ed analizzati 246 grafici, dai quali scaturiscono le seguenti considerazioni:

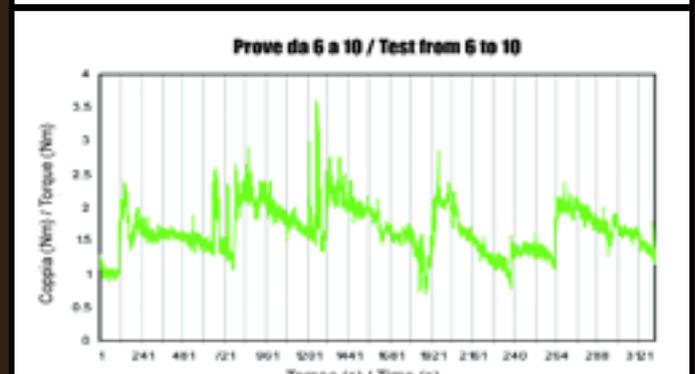
- Durante le prime 5 prove (corrispondenti a 65 minuti di taglio), l'asportazione di marmo è molto ridotta e l'andamento della riduzione del diametro del disco di marmo tagliato in funzione del tempo presenta un andamento non lineare, in quanto la perlina non ha ancora un numero sufficiente di diamanti in taglio.
- Successivamente, come noto, la capacità di asportazione mantiene un andamento costante nel tempo, in quanto trattasi di perlina diamantata sinterizzata.
- Le prove 6-41 con Perlato di Coreno sono state effettuate con una forza di contatto incrementata fino a 25 N, per asportare materiale alla stessa velocità raggiunta sul marmo di Carrara.
- In entrambi i casi, dopo le 41 prove, le perline presentano una vita residua molto elevata, essendo "a lunga durata", ma le analisi permettono comunque di stimare il comportamento della matrice metallica.



**Fig.5** Andamento temporale della forza di contatto tra la perlina diamantata e il campione di Perlato di Coreno. Le variazioni macroscopiche della forza di contatto sono dovute al transitorio che si verifica prevalentemente all'inizio di ogni prova. / Time trend of the contact force between the diamond bead and the Perlato di Coreno sample. Macroscopic variations of contact force are due to transient behaviour happening prevalently at each test beginning.



**Fig.6** Andamento temporale della posizione relativa tra la perlina diamantata e il campione di Perlato di Coreno (espresso in termini di diminuzione del raggio dei dischi di marmo tagliati). / Time trend from relative position between diamond bead and Perlato di Coreno sample (expressed in terms of reduction of cut marble disk radius).



**Fig.7** Andamento temporale della coppia applicata all'asse di rotazione del campione di Perlato di Coreno. Si evidenzia una condizione di forza di contatto radiale praticamente costante al variare del raggio e di valore approssimativamente uguale a quella tangenziale. / Time trend of the torque applied to the rotation axis of Perlato di Coreno sample. A radial contact force condition is shown practically constant at radius variation and of a value approximately equal to the tangential one.

- material to be cut;
- relative position between diamond bead and material to be cut;
  - torque applied to the rotation axis of marble sample.
- Some examples with the trend of these quantities during tests are shown in Figs. 5, 6 and 7 that represent tests from 6 to 10 of tested bead with Perlato di Coreno. For the analysis of all the cutting tests have been done and analysed 246 graphs, from which the following considerations rise:
- During the first 5 tests (corresponding to 65 min cutting) marble removal is reduced very much and cut marble disk diameter reduction trend as a function of time presents a non linear trend because bead has not yet a sufficient number of cutting diamonds.
  - Afterwards, as known, removal capability maintains a time constant trend because it is a sintered diamond bead.
  - 6-41 tests with Perlato di Coreno were done with a contact force increased up to 25 N to remove material at the same speed reached on Carrara marble.
  - In the both cases, after 41 tests, beads present a very high residual life, being "a long life", but analysis allow in any case to evaluate metal matrix behaviour.



#### 4. Analisi sperimentale dell'usura delle perline diamantate sinterizzate

Per quantificare il processo di usura sono stati sviluppati e applicati diversi metodi brevemente descritti:

1. Sono state seguite misurazioni dell'usura utilizzando uno strumento ottico a riflessione (profilometro) [10], che ha permesso di misurare l'abbassamento della matrice metallica.
2. L'usura macrogeometrica è stata anche valutata attraverso l'analisi di immagini dei profili delle perline diamantate retroilluminate.
3. L'usura microgeometrica della perlina è stata studiata attraverso l'analisi di immagini digitali ad elevato ingrandimento.

È stato anche sviluppato un sistema, oggetto di brevettazione a breve e che sarà descritto in un prossimo articolo, in grado di misurare l'usura in modo quantitativo e automaticamente. Tale tecnica innovativa è utilizzabile in laboratorio, in un dispositivo portatile (ad es. in cava) o a bordo di macchine per il taglio.

#### 4.1 Misurazioni dell'usura con profilometro ottico a riflessione

Dopo ogni ciclo di lavorazione la perlina diamantata viene smontata dalla macchina di prova e rimontata su di un apposito supporto collegato ad un motore elettrico a passi con l'asse di rotazione sul piano di misura. Con il profilometro è possibile acquisire delle generatrici equidistanti, facendo ruotare la perlina di un angolo prestabilito, dopo ogni misurazione, così da ricostruire tutta la superficie tagliente. Questi dati permettono di realizzare grafici dai quali è possibile valutare l'usura del profilo medio utilizzando il programma di misura Acquire [11]. Nello sviluppo del metodo di misura si sono presentati diversi problemi:

□ Tra i valori acquisiti erano presenti degli errori, in quanto il raggio laser emesso dal profilometro ottico veniva deviato in corrispondenza di alcuni diamanti e non veniva riflesso correttamente ma in maniera apparentemente casuale, probabilmente a causa della geometria del cristallo molto irregolare e talvolta spezzato. Non sono stati efficaci i tentativi di rendere opache le

Intervallo di prove Test range	Tempo di lavorazione Machining time [min]	Materiale asportato Removed material [mm <sup>3</sup> ]	Riduzione del diametro della perlina Bead diameter reduction [µm]	Osservazioni Observations
0 - 5	65	1,30	30	Rapida usura della matrice metallica per espone diamanti al taglio / Fast metal matrix wear for cutting diamonds coming out
6 - 14	134	3,62	< 5	La presenza di molti diamanti protrusi protegge la matrice / The presence of many protruded diamonds protects matrix
15 - 23	86	5,94	10	Macro-fessure nei diamanti in taglio, la matrice si è ridotta / Macro-fracture in diamonds during cutting, matrix was reduced
24 - 32	91	8,26	5	Usura costante della matrice / Matrix constant wear
33 - 41	114	10,58	5	Usura lieve ma costante / Light wear but constant
Totale Total	490	10,58	50 - 55	Dopo 490 minuti di taglio, il diametro medio della perlina è diminuito di circa 1% / After 490 min cutting, bead average diameter is reduced about 1%

**Tab.1** Caratterizzazione dell'usura di una perlina diamantata sinterizzata testata con marmo Bianco di Carrara con forza di contatto di 15 N / Wear characterization of a sintered diamond bead tested with white Carrara marble with a 15 N contact force

Intervallo di prove Test range	Tempo di lavorazione Machining time [min]	Materiale asportato Removed material [mm <sup>3</sup> ]	Riduzione del diametro della perlina Bead diameter reduction [µm]	Osservazioni Observations
0 - 5	114	1,30	30	La prima 5 prove sono state effettuate con una forza di contatto di 10N / The first 5 tests were executed with 10 N contact force / The constant 17% bead diameter reduction
6 - 14	86	3,62	10	È possibile il più forte dell'usura, molti punti diamanti in taglio / Perfect in harder than white marble, maximum wear diamonds in cutting
15 - 23	112	5,94	5	Usura accelerata della matrice, molti diamanti protrusi / Light matrix decrease, matrix protruded diamonds
24 - 32	86	8,26	10	Aumentano i diamanti macro-fessurati, la matrice si usura / Macro-fractured diamonds increase, matrix matrix wear
33 - 41	72	10,58	< 5	La perlina ha tagliato un carbonato più fragile o il Perlatto with more brittle bead that cut a more brittle carbonate and was much more exposed
Totale Total	644	10,58	50 - 55	Dopo 644 minuti di taglio sono stati eseguiti 10,58 mm <sup>3</sup> di usura / After 644 min cutting 10,58 mm <sup>3</sup> matrix area removed

**Tab.2** Caratterizzazione dell'usura di una perlina diamantata sinterizzata testata con Perlatto di Coreno con forza di contatto di 15 N nelle prime 5 prove e 25 N nelle prove successive / Wear characterization of a sintered diamond bead tested with Perlatto di Coreno with 15 N contact force in the first 5 tests and 25 N in the subsequent tests

#### 4. Wear experimental analysis of sintered diamond beads

To quantify wear process different methods have been developed and applied shortly described:

1. Wear measurements have been performed using an optical reflexion instrument (profilometer) [10], that allowed to measure reduction of metal matrix.
2. Macro-geometric wear has been evaluated by back lighted diamond bead profile analysis.
3. Micro-geometric bead wear has been studied by high magnification digital image analysis.

A system has been developed, subject of patenting process in short and that will be described in a next paper, capable to measure wear in a quantitative way and automatically. Such an innovative technique can be used in laboratory, in a portable device (e.g in quarry) or on a cutting machine.

#### 4.1 Wear measurements by a reflexion optical profilometer

After each machining cycle diamond bead is disassembled from the test machine and assembled on a suitable support connected to an electric stepper motor with rotation axis on the measurement plane.

By the profilometer it is possible to acquire equidistant generatrices, making bead rotating of a pre-established angle after each measurements, thus to reconstruct the whole cutting surface. These data allow to do the graphs from which the average profile wear can be evaluated using Acquire measuring program [11].

In the development of the measurement method different problems took place:

□ Among the acquired values errors were present, because laser ray emitted by the profilometer was deflected in correspondence of some diamonds and was not correctly reflected but in an apparently casual way, probably due to very irregular and sometimes fractured crystal geometry. The attempts were not effective to make opaque the reflective surfaces.

The problem was solved orienting the incidence plane of the profilometer orthogonally on respect to the displacement direction along bead generatrix.

Moreover a suitable error eliminating algorithm has been developed by profile data filtering [12].

□ Bead end usually appears with irregular surfaces that do not allow to find a reference on respect of which to evaluate metal matrix decreasing. Moreover the profilo-



superfici riflettenti. Il problema è stato risolto orientando il piano di incidenza del profilometro ortogonalmente rispetto alla direzione di spostamento lungo la generatrice della perlina. Inoltre, è stato sviluppato un apposito algoritmo di eliminazione degli errori tramite filtraggio dei dati del profilo [12].

□ L'estremità della perlina solitamente si presenta con superfici irregolari che non permettono di trovare un riferimento rispetto al quale stimare l'abbassamento della matrice metallica. Inoltre, il campo di misura del profilometro è limitato a 2 mm per i vincoli di risoluzione richiesta e non permette di acquisire il profilo fino all'albero sul quale è montata la perlina per usarlo come riferimento assoluto, dato che il raggio di una tipica perlina diamantata è di circa 5 mm. Questo problema è stato risolto inserendo un distanziale di diametro noto sull'albero della perlina e tale da essere compreso nel campo di misura del profilometro.

□ Per ridondanza, viene inoltre calcolata la retta dei minimi quadrati che interpola il tratto centrale del pro-

filo medio della perlina diamantata (cioè ottenuto dall'acquisizione di tutte le generatrici).

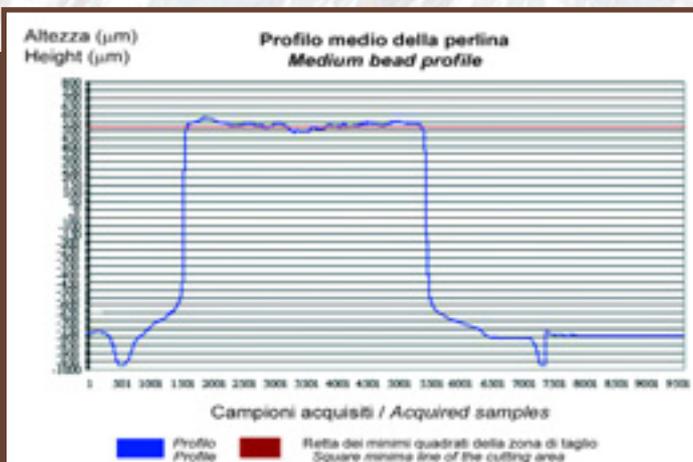
□ Un riferimento angolare permette di eseguire le misure sulle stesse generatrici ad ogni intervallo di lavorazione in modo da valutare il progresso dell'usura. Nelle Tabelle 1 e 2 sono riportati i valori della riduzione del diametro della matrice metallica.

Un esempio di profilo acquisito mediante l'utilizzo del profilometro è riportato in Fig.8.

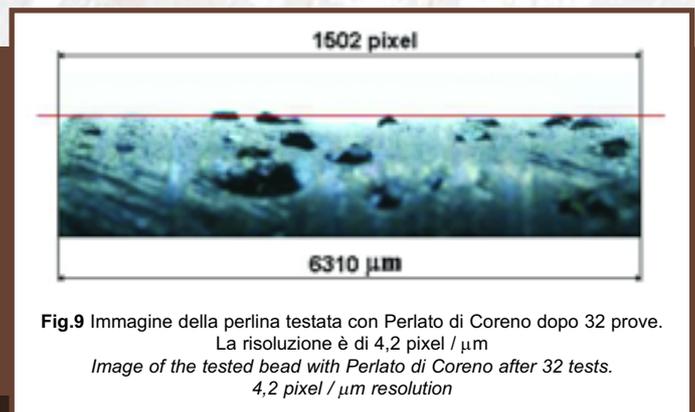
#### 4.2 Valutazione dell'usura macrogeometrica attraverso l'analisi dei profili

In aggiunta al metodo precedente, per valutare l'usura della matrice vengono utilizzate delle immagini ad alta risoluzione del profilo della perlina diamantata retroilluminata. Sfruttando lo stesso supporto rotante con motore elettrico a passi, la perlina viene fotografata ad intervalli regolari corrispondenti a rotazioni di 18°. Tramite taratura del sistema è possibile quantificare l'usura della matrice metallica (Fig.9).

Per valutare quantitativamente l'abbassamento del profilo della perlina diamantata (posta con l'asse orizzontale) viene presa come riferimento una zona centrale del profilo stesso, in corrispondenza della retta verticale in rosso in Fig.10. Per ogni profilo viene trac-



**Fig.8** Grafico elaborato utilizzando il profilometro. Il profilo rappresentato è la media delle acquisizioni di 20 generatrici, dopo 544 minuti di taglio e 10,58 dm<sup>3</sup> di materiale asportato. La perlina diamantata sinterizzata è stata testata con Perlato di Coreno con forza di contatto di 25 N / Graph made using a profilometer. The shown profile is the average of acquisition of 20 generatrices, after 544 min of cutting and 10,58 dm<sup>3</sup> removed material. Sintered diamond bead was tested with Perlato di Coreno with 25 N contact force



**Fig.9** Immagine della perlina testata con Perlato di Coreno dopo 32 prove. La risoluzione è di 4,2 pixel / µm  
Image of the tested bead with Perlato di Coreno after 32 tests.  
4,2 pixel / µm resolution

meter measuring range is limited to 2 mm for the required solution constraints and does not allow to acquire profile up to the shaft on which bead is assembled to use it as absolute reference because the radius of the typical diamond bead is equal about 5 mm. This problem was solved inserting a spacer of known diameter on the bead shaft and such as to be included in the profilometer measuring range.

□ For redundance moreover the least squares line has been computed that interpolates the central tract of the average profile of the diamond bead (i.e. obtained by all generatrices acquisition).

□ An angular reference allows to execute measurements on the same generatrices at each machining range in such a way to evaluate wear progress.

In Tables 1 and 2 the values of decreasing of the metal matrix diameter are shown. An example of an acquired profile by use of a profilometer is shown in Fig.8.

#### 4.2 Macro-geometrical evaluation by profile analysis

As an addition to the previous method, high resolution images of the profile of backlighted diamond bead are

used to evaluate matrix wear.

Exploiting the same rotating support with electric stepper motor, bead is photographed at regular ranges corresponding to 18° rotations. By system calibration it is possible to quantify metal matrix wear (Fig.9).

To evaluate quantitatively diamond bead profile decreasing (set with horizontal axis) a central zone of the same profile is taken as a reference in correspondence of the vertical red straight line in Fig.10. For each profile a horizontal segment is drawn and the distance is measured from the tangent to the new bead surface (measured before test beginning). Such a tangent is represented by the horizontal red straight line in Fig.10 and it is shown as a reference in all the images. As an example the profiles measured at 0° (left column) and at 18° (right column) are shown of the new bead (top) and tested with Perlato di Coreno at various machining ranges. As an addition to the previous images, in Tab.3 are reported all the measurements made by the described method on the bead tested with Perlato di Coreno. Tab.4 and graph in Fig.11 show that the wear values measured by the two methods proposed in this study show a good agreement. After the first 5 tests an average removal equal about 27 µm has been recorded.





PERLINA TESTATA CON PERLATO DI CORENO BEAD TESTED WITH PERLATO DI CORENO MARBLE														
Prove Tests	Profilo 1 Profile 1		Profilo 2 Profile 2		Profilo 3 Profile 3		Profilo 4 Profile 4		Profilo 5 Profile 5		Profilo 6 Profile 6		Profilo 7 Profile 7	
	PIXEL	[ $\mu\text{m}$ ]												
0-5	22	92	16	67	10	42	7	29	5	21	10	42	0	0
5-14	5	21	10	42	6	25	15	63	5	21	5	21	5	21
14-23	0	0	1	4	3	12	5	21	10	42	0	0	5	21
23-32	5	21	2	8	5	21	0	0	2	8	0	0	5	21
32-41	5	21	5	21	0	0	0	0	0	0	2	8	2	8

Prove Tests	Profilo 8 Profile 8		Profilo 9 Profile 9		Profilo 10 Profile 10		Profilo 11 Profile 11		Profilo 12 Profile 12		Profilo 13 Profile 13		Profilo 14 Profile 14	
	PIXEL	[ $\mu\text{m}$ ]	PIXEL	[ $\mu\text{m}$ ]	PIXEL	[ $\mu\text{m}$ ]	PIXEL	[ $\mu\text{m}$ ]	PIXEL	[ $\mu\text{m}$ ]	PIXEL	[ $\mu\text{m}$ ]	PIXEL	[ $\mu\text{m}$ ]
0-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	21
5-14	2	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	21
14-23	5	21	2	8	2	8	5	21	5	21	2	8	0	0
23-32	5	21	5	21	5	21	5	21	10	42	10	42	10	42
32-41	0	0	5	21	10	42	10	42	0	0	10	42	0	0

Prove Tests	Profilo 15 Profile 15		Profilo 16 Profile 16		Profilo 17 Profile 17		Profilo 18 Profile 18		Profilo 19 Profile 19		Profilo 20 Profile 20		MEDIA AVERAGE
	PIXEL	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]										
0-5	5	21	5	21	5	21	5	21	10	42	23	97	27
5-14	0	0	5	21	5	21	5	21	5	21	10	42	18
14-23	5	21	2	8	2	8	0	0	0	0	0	0	11
23-32	5	21	7	29	5	21	10	42	0	0	0	0	20
32-41	0	0	0	0	0	0	2	8	0	0	0	0	10

**Tab.3** Misure dell'abbassamento del profilo della perlina diamantata ricavate dalle immagini ad alta risoluzione al termine delle prove indicate / Measurements of diamond bead profile decreasing obtained from high resolution images at the end of the shown tests

ciato manualmente un segmento orizzontale e misurata la sua distanza dalla tangente alla superficie della perlina nuova (rilevata prima di iniziare le prove). Tale tangente è rappresentata dalla retta orizzontale in rosso in Fig.10 e viene riportata come riferimento in tutte le immagini. A titolo di esempio nella Fig.10 sono rappresentati i profili rilevati a 0° (colonna sinistra) e a 18° (colonna destra) della perlina nuova (in alto) e testata con Perlato di Coreno, a vari intervalli di lavorazione.

In aggiunta alle immagini precedenti, nella Tab.3 sono riportate tutte le misurazioni effettuate con il metodo descritto sulla perlina testata con Perlato di Coreno.

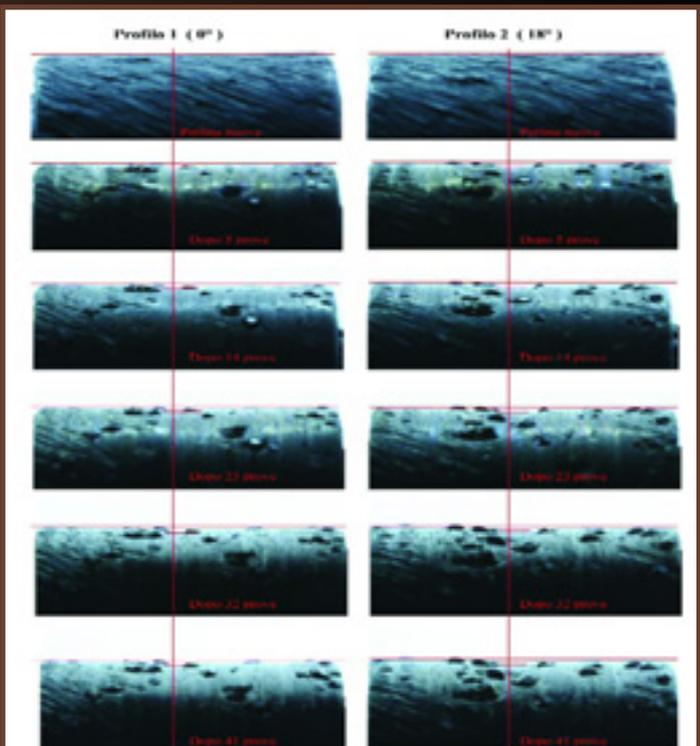
La Tab.4 ed il grafico in Fig.11 mostrano che i valori dell'usura rilevati con i due metodi messi a punto in questo studio presentano un buon accordo.

Dopo le prime 5 prove si è registrata un'asportazione media di circa 27  $\mu\text{m}$ . Nelle prove 5-14 il profilometro aveva misurato un abbassamento di 10  $\mu\text{m}$  (con le immagini fotografiche 18  $\mu\text{m}$ ). Nelle prove 14-23 si era verificata un'usura media di soli 5  $\mu\text{m}$ , nel secondo caso, trattandosi di una zona centrale, l'usura misurata è superiore e pari a 11  $\mu\text{m}$ . Infine, per entrambe le misurazioni si è verificato un incremento di asportazione durante le prove 23-32: 15  $\mu\text{m}$  per il profilometro, 20  $\mu\text{m}$  con le immagini fotografiche. Nell'ultimo ciclo di prove è confermata una diminuzione dell'usura: 5  $\mu\text{m}$

In 5-14 tests profilometer measured a decreasing of 10  $\mu\text{m}$  (with photographic images 18  $\mu\text{m}$ ). In 14-23 tests an average wear equal about only 5  $\mu\text{m}$ , in the second case, being a central zone, measured wear is larger and corresponds to 11  $\mu\text{m}$ . Finally, for both measurements a removal increment took place during 23-32 tests: 15  $\mu\text{m}$  for profilometer, 20  $\mu\text{m}$  with photographic images. In the last test cycle a wear decreasing was confirmed: 5  $\mu\text{m}$  for profilometer, 10  $\mu\text{m}$  with photographic images. Measured macro-geometric wear by high resolution photographic images, is slightly larger than the one measured by optical profilometer in some intervals because in the images only the profile central zone was considered, that is more subjected to wear.

#### 4.3 Evaluation of micro-geometric wear by high magnification digital image analysis

Profile visual analysis performed at any test cycle and described in the following allows to get further information on respect to the previous methods [13]. The correct bead positioning and the need to get coincident images in order to be able to compare them manually requires a large use of time and would require the development of suitable automated focusing and repositioning systems. The detailed study of profile local variations, depicted in



**Fig.10** Serie di immagini dei profili delle generatrici a 0° (colonna sinistra) e a 18° (colonna destra) della perlina diamantata retroilluminata acquisiti al termine delle prove indicate / Series of images of backlit diamond bead profile generatrix images at 0° (left column) e a 18° (right column) acquired at the end of shown tests



PERLINA TESTATA CON PERLATO DI CORENO TESTED BEAD WITH PERLATO DI CORENO MARBLE		
Prove Tests	Usura misurata con il profilometro ottico Wear measured by optical profilometer [µm]	Usura nella zona centrale misurata con le immagini digitali Central zone wear measured by digital images [µm]
0-8	30	37
8-14	10	18
14-23	5	11
23-32	10	20
32-41	5	10

**Tab.4** Confronto dei valori ottenuti con i due metodi di misura sviluppati / Comparison of the values obtained with the two developed measuring methods

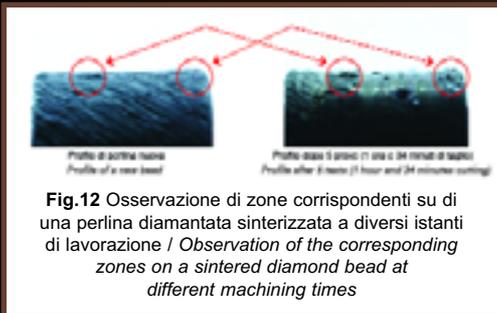
per il profilometro, 10 µm con le immagini fotografiche. L'usura macrogeometrica misurata tramite le immagini fotografiche ad alta risoluzione

risulta leggermente superiore a quella misurata con profilometro ottico in alcuni intervalli, in quanto nelle immagini è stata considerata solamente la parte centrale del profilo, che è più esposta ad usura.

### 4.3 Valutazione dell'usura microgeometrica attraverso l'analisi di immagini digitali ad elevato ingrandimento

L'analisi visiva dei profili ad ogni ciclo di prove descritta di seguito permette di ricavare ulteriori informazioni rispetto ai metodi precedenti [13]. Il corretto posizionamento della perlina e la necessità di avere immagini coincidenti per poterle confrontare manualmente comporta un notevole impiego di tempo e richiederebbe lo sviluppo di appositi sistemi automatici di messa a fuoco e di riposizionamento.

Lo studio dettagliato delle variazioni locali del profilo, schematizzato in Fig.12, si rivela indispensabile anche per la validazione degli altri metodi precedentemente descritti, poiché la sola analisi macrogeometrica della perlina non permette di apprezzare cambiamenti limitati



**Fig.12** Osservazione di zone corrispondenti su di una perlina diamantata sinterizzata a diversi istanti di lavorazione / Observation of the corresponding zones on a sintered diamond bead at different machining times

and in the subsequent example figures some details are shown of the surface of diamond beads tested.

metric analysis does not allow to evaluate limited changes of the matrix as in Fig.13.

Acquisitions are assembled into a sequence such as to re-generate the whole development of bead surface at different times, as shown in Fig.14.

This method allows:

- matrix erosion evaluation in the zones near diamond;
- cutting diamond number computation;
- diamond protrusion measurement and further meaningful data collection on wear phenomenon.

By the plane development of the diamond bead cutting surface it is possible to evaluate matrix geometry changes and to get important parameters to quantify diamond wear condition and wear condition evolution during tests. In Tab.5 and Fig.15 a synthesis of observations is shown

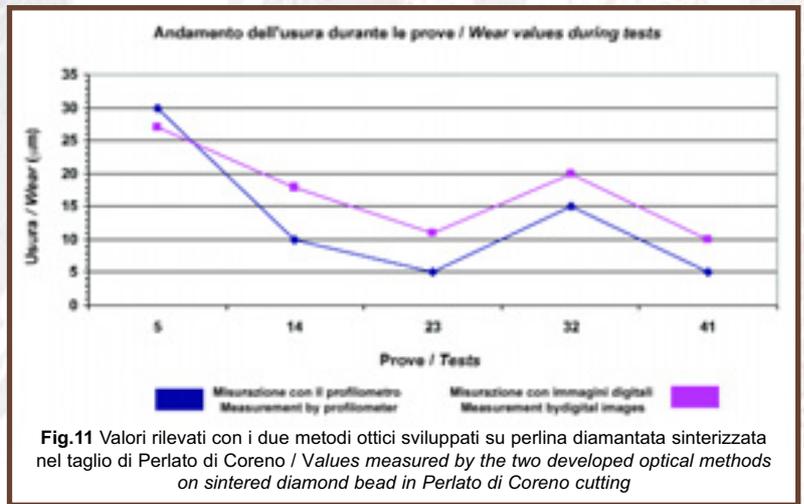
della matrice come in Fig.13. Le acquisizioni vengono montate in sequenza in modo da ricreare l'intero sviluppo della superficie della perlina a diversi istanti, come mostrato in Fig.14.

Questo metodo permette di:

- valutare l'erosione della matrice nelle zone adiacenti al diamante;
- calcolare il numero dei diamanti in taglio;
- misurare la protrusione dei diamanti e raccogliere ulteriori dati significativi sul fenomeno di usura.

Con lo sviluppo piano della superficie di taglio della perlina diamantata è possibile valutare i cambiamenti della geometria della matrice e ricavare importanti parametri per quantificare lo stato di usura e l'evoluzione dello stato dei diamanti durante le prove.

In Tab.5 e Fig.15 viene riportata una sintesi delle osservazioni e nelle figure seguenti sono riportati alcuni dettagli della superficie delle perline diamantate testate a titolo di esempio.



**Fig.11** Valori rilevati con i due metodi ottici sviluppati su perlina diamantata sinterizzata nel taglio di Perlato di Coreno / Values measured by the two developed optical methods on sintered diamond bead in Perlato di Coreno cutting

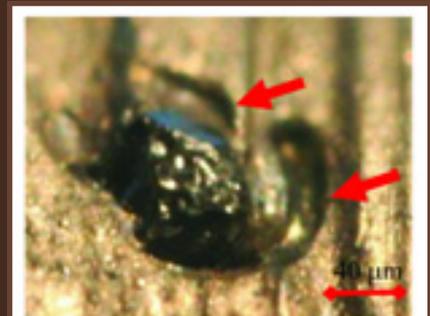
and in the subsequent example figures some details are shown of the surface of diamond beads tested.

## 5. Conclusions

This first phenomenological and systematical study on sintered diamond beads wear has been feasible due to machining condition testing on test machine.

The described process allows to evaluate matrix macro-geometric wear quantitatively. The low wear rate of this kind of bead required the development of refined measuring methods and a micro-geometric analysis of high magnification photographic images.

From the performed analysis it was shown that the evolution of single diamond condition



**Fig.13** Particolare di un diamante dopo 75 minuti di taglio di marmo Bianco di Carrara. Le frecce indicano i solchi prodotti dall'abrasione della polvere di materiale asportato, trascinata dal refrigerante, che fluisce intorno al diamante aumentandone la protrusione / Detail of a diamond after 75 min cutting of white Carrara marble. Arrows show the grooves produced by abrasion due to removed material powder, transported by coolant, which flows around diamond increasing its protrusion





## 5. Conclusioni

Questo primo studio fenomenologico e sistematico sull'usura delle perline diamantate sinterizzate è stato possibile grazie alle condizioni di lavoro controllate su macchina di prova. Il procedimento descritto permette di valutare quantitativamente l'usura macrogeometrica della matrice. Il basso tasso di usura di questo tipo di perlina ha richiesto lo sviluppo di metodi di misura raffinati e un'analisi microgeometrica attraverso immagini fotografiche ad elevato ingrandimento.

Dall'analisi effettuata è emerso che l'evoluzione dello stato dei singoli diamanti in taglio è un buon indicatore del processo di degradamento dell'utensile, mentre il solo numero di diamanti fuoriusciti dalla matrice non è esauriente, data la casualità della disposizione più o meno superficiale dei cristalli.

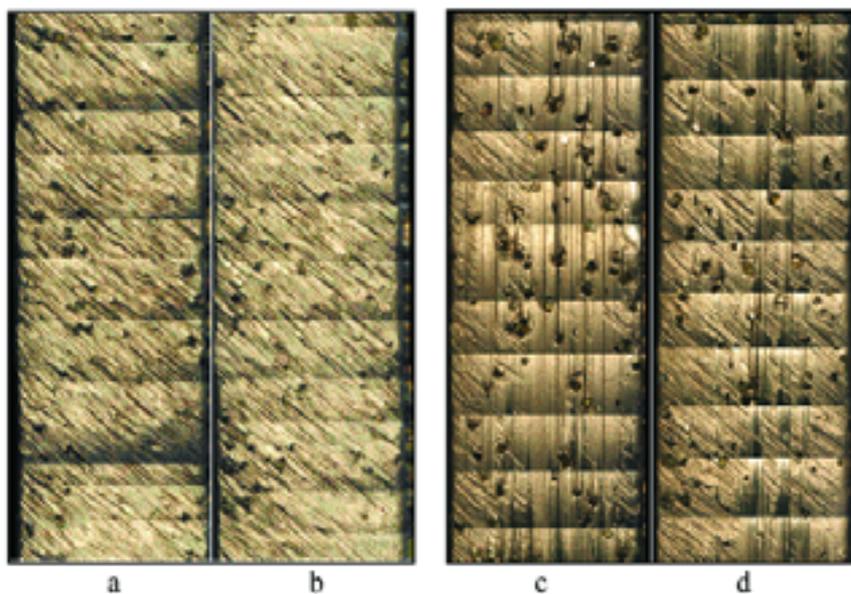
Analizzando il numero dei diamanti micro e macro-fratturati si hanno invece importanti indicazioni sulla durezza della matrice metallica (tanto più compatto è

il materiale legante, tanto più fratturati si presentano i diamanti). Una misura del numero di diamanti protrusi che si fratturano è indicativo della capacità legante della matrice metallica che è in grado di contrastare la precoce fuoriuscita del cristallo.

I dati raccolti sul comportamento all'usura di una perlina sinterizzata tradizionale rappresentano una base per lo sviluppo di utensili più efficienti.

## 6. Ringraziamenti

Le perline diamantate sinterizzate sottoposte alle prove di taglio sono state fornite dalla società Diamond Pauber Srl di Massa. La società Lochtmans Srl di Avenza - Carrara (MS) ha fornito i parametri di taglio impiegati nelle operazioni di riquadratura dei blocchi di marmo in cava.

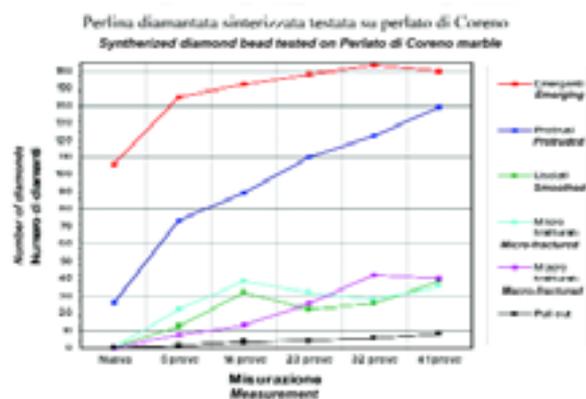


**Fig.14** Sviluppo piano tra le generatrici da 0° a 180° (a) e da 180° a 360° (b) della perlina diamantata sinterizzata prima di testarla con Perlato di Coreno. Sviluppo della stessa dopo 272 minuti di taglio: tra le generatrici da 0° a 180° (c) e da 180° a 360° (d)  
Plane development between generatrices from 0° to 180° (a) and from 180° to 360° (b) of sintered diamond bead before cutting tests of Perlato di Coreno. Development of the same after 272 min cutting: between generatrices from 0° to 180° (c) and from 180° to 360° (d)

during cutting is a good index of tool degradation process, while the only number of diamonds gone out of the matrix is not enough, due to the causality of less or more superficial disposition of crystals.

On the contrary analysing the number of micro and macro-fractured diamonds important indications on metal matrix hardness (the more compact is the tool matrix material the more fractured are the diamonds). A measure of the number of protruded diamonds which fracture is an index of bonding capability of metal matrix which is able to avoid the premature release of crystal.

The data collected on wear behaviour of a traditional sintered bead represent a base for the development



**Fig.15** Evoluzione dello stato dei diamanti durante le prove di usura  
Evolution of diamond condition during wear tests

of more efficient tools.

## 6. Acknowledgements

Sintered diamond beads subjected to cutting tests have been supplied by Diamond Pauber Srl company at Massa. Lochtmans Srl Company at Avenza - Carrara (MS) supplied cutting parameters used in squaring operations of marble blocks in quarry.

		PERLINA / BEAD					
		Nuova New	Dopo 5 prove After 5 tests	Dopo 14 prove After 14 tests	Dopo 22 prove After 22 tests	Dopo 32 prove After 32 tests	Dopo 41 prove After 41 tests
DIAMANTE DIAMOND	Emergente Emerging	100	140	162	158	163	160
	Protrusi Protruded	38	145	152	158	163	160
	Liscio Smoothed	0	74	89	110	122	139
	Micro-fratturati Micro-fractured	0	52	32	22	25	38
	Macro-fratturati Macro-fractured	0	18	38	29	23	35
	Pull out	0	7	13	28	42	40

**Tab.5** Evoluzione dello stato dei diamanti nella perlina testata su Perlato di Coreno in funzione del numero delle prove / Evolution of diamond condition in the tested bead on Perlato di Coreno as a function of number of tests

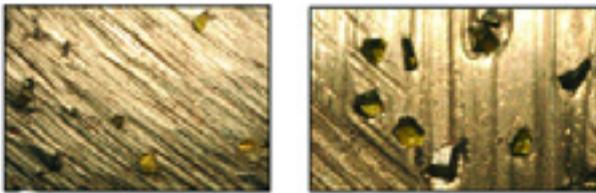


## 7. Bibliografia / References

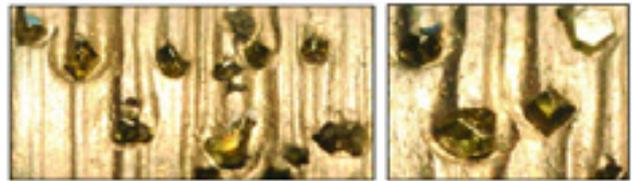
- [1] Spriano, S.; Chen, Q.; Settineri, L.; Bugliosi, S.: Low content and free cobalt matrixes for diamond tools, *Wear*, Volume 259, Issues 7-12, 15th International Conference on Wear of Materials, July-August 2005, p. 1190-1196.
- [2] Tonshoff, H.K.; Friemuth, T.; Hillmann-Apmann, H.: Diamond tools for wire sawing metal components, *Abrasives*, August/September (2001), p. 31-37.
- [3] Özçelik Y., Kulaksiz S., Çetin M. C.: Assessment of the wear of diamond beads in the cutting of different rock types by the ridge regression, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, Issue 3, 3 October 2002, p. 392-400.
- [4] Bortolussi A., Ciccu R., Manca P.P., Massacci G.: Computer simulation of diamond-wire cutting of hard and abrasive rock, *Transactions of the Institution of Mining & Metallurgy*, England, Section A: Mining Industry, Vol. 103, May-Aug, 1994, p. A124-A128.
- [5] Agus, M.; Bortolussi, A.; Careddu, N.; Ciccu, R.; Grosso, B.; Massacci, G.: Influenza delle caratteristiche della roccia sulle prestazioni del filo diamantato/Influence of stone properties on diamond wire performance, *Diamante*, Anno 11, N° 42, p. 99-109.
- [6] Tantussi, G.; Lanzetta, M.; Romoli, V.: A Multi-axis Machine for Single Diamond Bead Testing, *Roc Maquina - Dimension Stone Industry*, num. 51, December 2003, Ed. Reed Business Information, S.A., ISSN: 1130-8362, p. 30-33, Legal Record: BI - 899 - 91.
- [7] Tantussi, G.; Lanzetta, M.; Romoli, V.: Diamond Wire Cutting of Marble: State of the Art, Modeling and Experiments with a New Testing Machine, *A.I.Te.M VI*, Proceedings of the 6th International Conference of the Italian Association of

Mechanical Technology, Enhancing the Science of Manufacturing, Ed. L. Carrino, Pub. D'Arco Edizioni, Gaeta (LT), Italy, September 8th-10th, 2003, ISBN: 88890210121, p. 113-126.

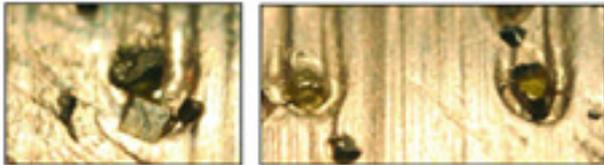
- [8] Tantussi, G.; Lanzetta, M.; Romoli, V.: Diamond wire cutting of cast iron, *A.I.Te.M 2005*, Proceedings of the 7th Conference of the Italian Association of Mechanical Technology, Pub. Facoltà di Ingegneria di Lecce, Lecce, Italy, September 7th-9th, 2005, ISBN: 88-86406-20-7, p. 100-114.
- [9] Tantussi, G.; Lanzetta, M.: Macchina innovativa per il taglio di materiali lapidei mediante filo diamantato, *DIMNP 27* (2001), Atti del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università di Pisa.
- [10] Tantussi, G.; Lanzetta, M.: 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. A. Del Taglia, Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università degli Studi di Firenze, Pub.: Centro Editoriale Toscano, Firenze, Italy, ISBN: 88-7957-264-4, p. 97 (29).
- [11] Zambardi, V., Rilievo di superfici con metodi ottici, Relazione di tirocinio per il conseguimento della Laurea in Ingegneria Meccanica, Università di Pisa, 2007.
- [12] Lanzetta, M., Tantussi, G., Zambardi, V.: Rilievo micrometrico di superfici con metodi ottici, *Automazione e Strumentazione*, in corso di pubblicazione.
- [13] Schmid, H. G.: La classificazione qualitativa dei diamanti mediante l'analisi quantitativa delle immagini/Quality classification of Diamonds by Means of Quantitative Image Analysis, *Diamante*, Anno 11, N° 42, p. 91-96.



Diamanti emergenti dalla matrice metallica. A sinistra perlina nuova  
*Diamond emerging from the metal matrix. A new bead on the left*



Diamanti protrusi / *Protruded diamonds*



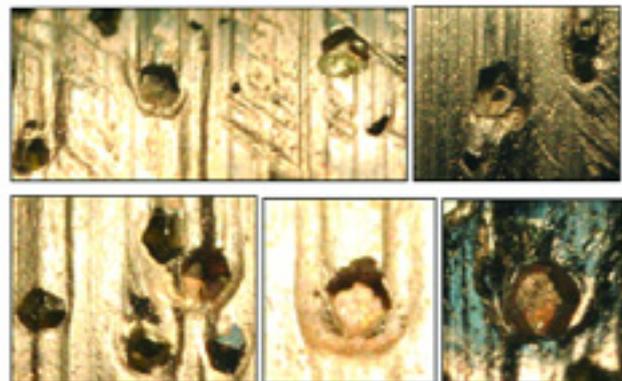
Diamanti protrusi / *Protruded diamonds*



Diamanti lisciati / *Smoothed diamonds*



Diamanti fratturati / *Fractured diamonds*



Diamanti pull-out / *Diamond pull-out*



Esempio di diamante (sinistra) rilasciato dalla matrice (destra), probabilmente a causa dell'erosione prodotta dal refrigerante dirottato dai diamanti vicini in modo da accelerare la protrusione / *Example of diamond (left) released by the matrix (right) probably due by the erosion produced by coolant deviated by near diamonds in such a way to accelerate protrusion*

