

Global Stone
Congress 2010
Alicante (Spain)



Nuove metodologie standard per la classificazione dell'efficienza dei dischi da taglio diamantati

L.G. Rosa¹, J.C. Fernandes¹, P.M. Amaral¹, C.A. Anjinho¹, A. Coelho²

LOBBIETTIVO DI QUESTO LAVORO È PRESENTARE NUOVE METODOLOGIE STANDARD PER LA CLASSIFICAZIONE DELL'EFFICIENZA DI TAGLIO DEI DISCHI DIAMANTATI. GLI ESITI DI QUESTO CASO DI STUDIO METTONO IN EVIDENZA L'UTILITÀ E L'ACCURATEZZA DELLE METODOLOGIE DI TEST.

1. INTRODUZIONE

Il settore industriale che si occupa della lavorazione delle pietre ornamentali (estrazione, segagione, taglio e lucidatura) è estremamente subordinato al funzionamento delle attrezzature e dei rispettivi utensili. Come è noto, l'impiego degli utensili diamantati in ogni fase della lavorazione della pietra (dall'estrazione del blocco sino alla finitura ultima dei manufatti in pietra) rappresenta uno dei principali obiettivi del settore industriale, poiché gli utensili diamantati, rispetto ad altri utensili, presentano un'efficienza più elevata, una maggiore durata di vita e consentono di ottenere una migliore qualità del prodotto finale. Di conseguenza, per aumentare la soddisfazione dei propri clienti, i costruttori di utensili e i produttori di materie prime necessarie alla realizzazione degli utensili diamantati (polveri di metallo, resine polimeriche e polveri di diamante) si dedicano costantemente alla ricerca e allo sviluppo, in modo da creare nuovi e più efficienti utensili diamantati, con un elevato rapporto costo/rendimento.

Dal 1999 ad oggi, la I.S.T.-Technical University of Lisbon e FrontWave (una spin-off company della I.S.T.) hanno sviluppato una serie di studi e test

New standard methodologies to classify the efficiency of diamond cutting discs

THE OBJECTIVE OF THIS WORK IS TO PRESENT NEW STANDARD METHODOLOGIES TO CLASSIFY THE CUTTING EFFICIENCY OF DIAMOND DISCS. THE RESULTS OF THIS CASE STUDY REVEAL THE USEFULNESS AND ACCURATENESS OF THE TESTING METHODOLOGIES.

1. INTRODUCTION

The industrial sector involved in ornamental stones processing (extraction, sawing, cutting and polishing) is highly dependent of the behaviour of the equipments and respective tools. As is well known, the use of diamond tools in all stages of stone processing (from the block extraction till the final finishing of the stone products) is one of the main targets of the industry, because diamond tools show higher efficiency, higher life time, and allow the achievement of a better quality of the final products than the other tools.

Therefore, to increase the satisfaction of their clients, the tools' manufacturers as well as the producers of raw-materials needed for diamond-tool fabrication (metal powders,

(1) Department of Materials Engineering, Instituto Superior Técnico, T.U. Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal; email: carlosanjinho@ist.utl.pt

(2) FrontWave, Engenharia e Consultadoria SA, Rua do Comércio 15, 7150-321 Borba, Portugal; email: adriano.coelho@frontwave.pt



Fig. 1. Vista d'insieme del laboratorio utilizzato per eseguire i test. / *General view of the lab used to perform the tests.*

per analizzare la durata di vita e il funzionamento di utensili pre-esistenti e nuovi, ad esempio Fernandes et al. (1999), (2002) & (2008), Rosa et al. (2001) & (2004), Amaral et al. (2001) & (2009). Fra i numerosi altri sviluppi realizzati, poniamo l'accento sui test di efficienza dell'utensile, che consistono nella valutazione di due importanti aspetti del rendimento dell'utensile: 1) la durezza dell'utensile, determinata dalla misurazione dell'usura dei dischi (consumo utensile); e 2) l'efficacia di taglio dell'utensile, valutata in termini di consumo di energia, forze di taglio, vibrazioni e influenza del flusso lubrificante d'acqua.

L'attrezzatura di classificazione (vedi *figura 1*) utilizzata per questo tipo di test è composta da una speciale fresa a ponte, che incorpora una serie di nuovi sistemi di automazione e controllo. L'attrezzatura consente il pieno controllo delle condizioni di lavoro, mentre tutti i dati di uscita del taglio necessari vengono monitorati e memorizzati con un software speciale, utilizzato inoltre per definire metodologie di caratterizzazione predeterminate. I test vengono eseguiti seguendo una procedura standard. I valori medi dei parametri vengono calcolati dopo l'esecuzione di una serie di scanalature, sino a tagliare una determinata (costante) quantità di pietra. Questi test su scala reale consentono al costruttore di utensili di conoscere esattamente il comportamento di ogni utensile e come confrontarlo con altri utensili (posizionamento nella graduatoria degli utensili); ad esempio, il presente documento illustra un caso di studio che analizza e mette a confronto 3 differenti dischi diamantati nel taglio del granito Porrino spagnolo.

polymer resins and diamond grits) are continuously doing research and development in order to obtain new and more efficient diamond tools, with a high ratio of performance/cost.

Since 1999 till now, I.S.T.-Technical University of Lisbon and FrontWave (an I.S.T. spin-off company) have developed a series of studies and tests to analyse the lifetime and the behaviour of pre-existing and new diamond tools, e.g. Fernandes et al. (1999), (2002) & (2008), Rosa et al. (2001) & (2004), Amaral et al. (2001) & (2009). Among several other developments that were achieved, we highlight the tool efficiency tests that consist in the evaluation of two important aspects of tool performance: 1) the tool durability, determined by measuring the wear of the discs (tool consumption); and 2) the tool cutting effectiveness, evaluated in terms of energy consumption, cutting forces, vibrations and influence of lubricant water flow.

The classification equipment (see *figure 1*) used for this type of tests consists in a special bridge cutting machine incorporating a series of new automation and control systems. The equipment allows full control of the working conditions while all the necessary cutting outputs are monitored and stored by special software also used to establish pre-determined characterization methodologies. The tests are conducted according to a standard procedure. Average values of the parameters are calculated after performing a series of cutting slots till a given (constant) amount of stone is cut. These real-scale field tests allow a tool producer to know exactly how each tool behaves and how it can be compared to other tools (tool rank positioning);

Tab. 1. Matrici utilizzate in questo elaborato: elementi chimici e densità dopo sinterizzazione
Matrices used in this work: chemical elements and density after sintering

Codice della matrice utensile Tool matrix code name	Elementi chimici Chemical elements	Densità / Density [g/cm ³]
A	Co	8.93 ± 0.04
B	Cu+Fe+Co	8.40 ± 0.07
C	Fe+Co+Cu	7.97 ± 0.14

2. ESPERIMENTO

I tre utensili (denominati A, B e C) sono dischi da taglio diamantati segmentati del diametro di 400 mm. I segmenti dei tre utensili sono geometricamente identici e differiscono esclusivamente nella composizione della matrice utilizzata. I segmenti sono stati realizzati (sinterizzati) utilizzando differenti leganti metallici, ma la polvere e la concentrazione del diamante è la medesima per tutti i tipi di segmenti. La densità e le proprietà meccaniche dei leganti sinterizzati (matrici) sono state definite per mostrare l'influenza dei leganti metallici sull'efficienza del taglio. Più avanti nel presente documento, le proprietà delle matrici vengono confrontate con i parametri di uscita dell'operazione di taglio.

2.1 Caratteristiche delle matrici dell'utensile

La *tabella 1* evidenzia gli elementi chimici presenti in ogni matrice e la densità raggiunta dopo la sinterizzazione. Le proprietà meccaniche dei leganti sinterizzati vengono riportate nella *tabella 2*.

Le densità delle matrici sono state determinate mediante il metodo di Archimede. La durezza Vickers (HV5) è stata stabilita mediante il tester di durezza Mitutoyo AVK-C2 con un carico di 5 kg. La determinazione del modulo dinamico di Young (E) è stata eseguita utilizzando il dispositivo RFDA nella modalità vibrazione

and, as an example, this paper presents a case study analysing and comparing 3 different diamond discs when cutting Spanish Porrino granite.

2. EXPERIMENTAL

The three tools (with code names A, B and C) are segmented diamond-cutting discs of 400 mm diameter. The segments are geometrically equal for all the three tools, and the tools are different only because each of the tools A, B and C uses segments with different matrix composition. The segments were produced (sintered) using different metallic binders, but the grit and concentration of diamond is the same for all types of segments.

Density and mechanical properties of the sintered binders (matrices) were determined in order to understand the influence of the metallic binders in the cutting efficiency. Later on this paper, the properties of the matrices will be related with the output parameters of the cutting operation.

2.1 Characteristics of the tool matrices

Table 1 shows the chemical elements present in each matrix and the density achieved after sintering. The mechanical properties of the sintered binders are presented in *table 2*. The densities of the matrices were determined by the Archimedes method. Vickers hardness (HV5) was determined using the hardness

Tab. 2. Matrici utilizzate in questo elaborato: proprietà meccaniche / Matrices used in this work: mechanical properties

Codice della matrice utensile Tool matrix code name	HV5 [MPa]	E [GPa]	T _m [MJ/m ²]	σ _{0.2} [MPa]
A	2639 ± 107	215 ± 2	17.34 ± 1.02	933 ± 35
B	2912 ± 62	179 ± 3	0.56 ± 0.03	523 ± 24
C	2707 ± 144	211 ± 7	8.79 ± 0.83	1000 ± 11

flessionale (Rosa et al., 2008). Le altre proprietà meccaniche, come il limite d'elasticità allo 0,2% ($\sigma_{0,2}$) e il modulo di resistenza (T_m), sono state valutate mediante i test di trazione eseguiti in una macchina Instron (modello 3369) utilizzando una velocità di corsa trasversa di 0,5 mm/min.

2.2 Test di taglio

Tutti i test sono stati eseguiti su granito Porrino spagnolo utilizzando la versione più recente dell'attrezzatura di classificazione dell'utensile (vedi il dettaglio nella *figura 2*). Obiettivo dei test di taglio del presente elaborato è stato lo studio dell'influenza di due condizioni di lavoro sul rendimento dei dischi: velocità di taglio (velocità di avanzamento) e profondità del taglio. La velocità di rotazione o periferica (25 m/s) e il flusso d'acqua (26 l/min) vengono mantenuti costanti. I parametri di uscita misurati sono stati: a) il consumo di energia elettrica (W_{el}); b) le vibrazioni* provocate dal disco nell'eseguire i tagli; e c) le componenti verticali e orizzontali della forza generata (che consentono di stabilire la forza risultante F_r creata dal contatto fisico tra utensile e pietra).

*Le vibrazioni forzate sull'albero rotore vengono misurate con un accelerometro; con riferimento alla nostra metodologia, le vibrazioni vengono quantificate da un

tester Mitutoyo AVK-C2 with a load of 5 kg. Determination of the dynamic Young's modulus (E) was carried out using RFDA equipment in a flexural vibration mode (Rosa et al., 2008). Other mechanical properties, like 0.2%-offset yield stress ($\sigma_{0,2}$) and toughness modulus (T_m), were evaluated through tensile tests conducted in an Instron machine (model 3369) using crosshead travelling speed of 0.5 mm/min.

2.2 Cutting tests

All tests were conducted in Spanish Porrino granite using the most recent version of the tool classification equipment (see detail in *figure 2*).

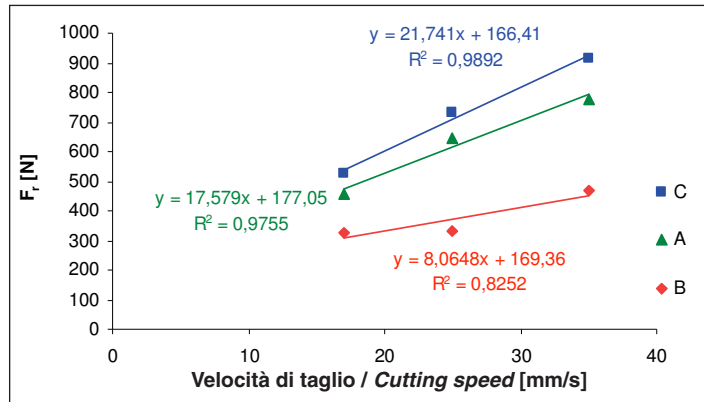
In the present work, the objective of the cutting tests consisted in studying the influence on the discs performance, of no more than two working conditions: the cutting speed (in-feed speed) and the depth of cut. The rotational or peripheral speed (25 m/s) and the water flow (26 l/min) were kept constant. The measured output parameters were: a) the electrical energy consumption (W_{el}); b) the vibrations* caused by the disc when performing the cuts; and c) the vertical and horizontal components of generated force (which allow the determination of the resultant force F_r created by the physical contact between tool and stone).

*The forced vibrations at the rotor shaft are

Fig. 2. Dettaglio dell'operazione di taglio del granito con un disco diamantato.
Detail of granite cutting operation with a diamond disc.



Fig. 3. Relazione tra la forza risultante (F_r) e la velocità di taglio per ognuno degli utensili (A, B, C).
Relation between resultant force (F_r) and the cutting speed for each of the tools (A, B, C).



parametro di uscita che rappresenta il valore medio degli spostamenti in un intervallo temporale [m/s].

3. RISULTATI

I risultati dei test di taglio sono riepilogati nei grafici illustrati nelle figure 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

4. DISCUSSIONE

Analizzando i risultati complessivi dei tre utensili diamantati è possibile concludere che l'utensile B evidenzia minori forze di taglio, minori vibrazioni e minori consumi di energia per le differenti profondità dei tagli e velocità di taglio prese in esame. L'utensile B risulta più adatto a tagliare il granito Porrino rispetto agli altri utensili (A e C). In rapporto alle matrici degli utensili A e C, la matrice dell'utensile B possiede i più bassi valori di limite di elasticità, modulo di Young e modulo di resistenza, ma

measured by an accelerometer; and, in our methodology, those vibrations are quantified by an output parameter representing a mean value of displacements over a period of time [m/s].

3. RESULTS

The results of the cutting tests are summarized in the graphs depicted on figures 3, 4, 5, 6, 7 and 8.

4. DISCUSSION

Analysing the overall results for the three diamond tools it is possible to conclude that tool B shows lower cutting forces, lower vibrations and lower energy consumptions for the different depths of cuts and cutting speeds that were studied. Tool B is more suitable for cutting Porrino granite than the others tools (A and C). Compared to the matrices of tools A and C, tool B matrix

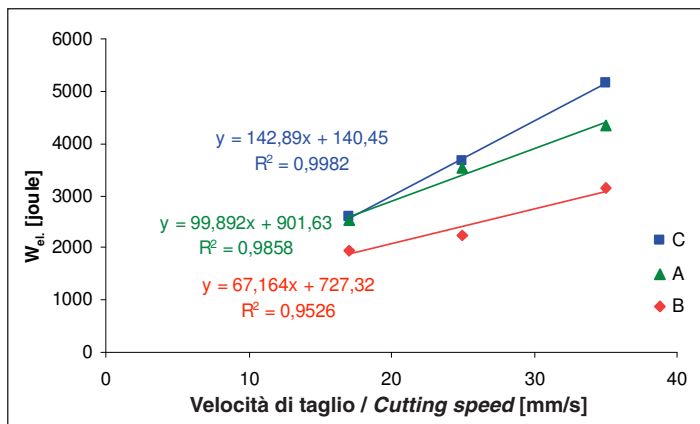


Fig. 4. Relazione tra il consumo di energia elettrica (W_{el}) e la velocità di taglio per ognuno degli utensili (A, B, C).
Relation between electrical energy consumption (W_{el}) and the cutting speed for each of the tools (A, B, C).

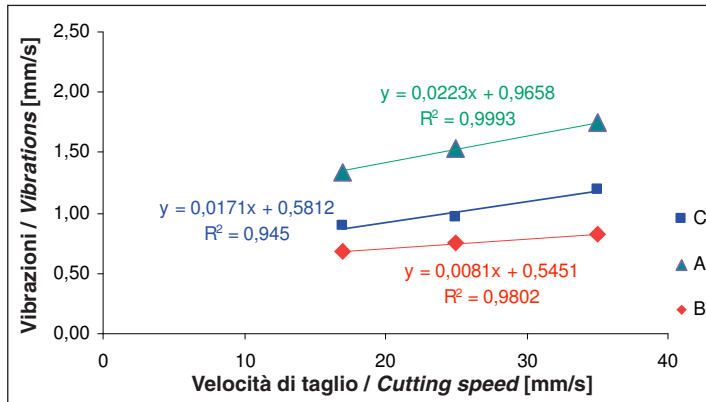


Fig. 5. Relazione tra le vibrazioni e la velocità di taglio per ognuno degli utensili (A, B, C).
Relation between vibrations and the cutting speed for each of the tools (A, B, C).

Fig. 6. Relazione tra la forza risultante (F_r) e la profondità di taglio per ognuno degli utensili (A, B, C).
Relation between resultant force (F_r) and the depth of cut for each of the tools (A, B, C).

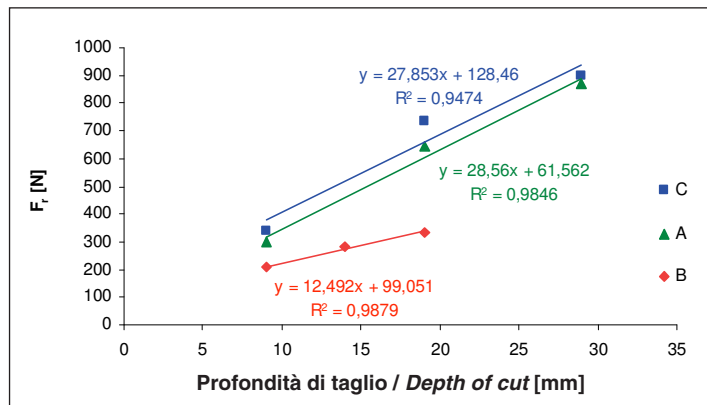
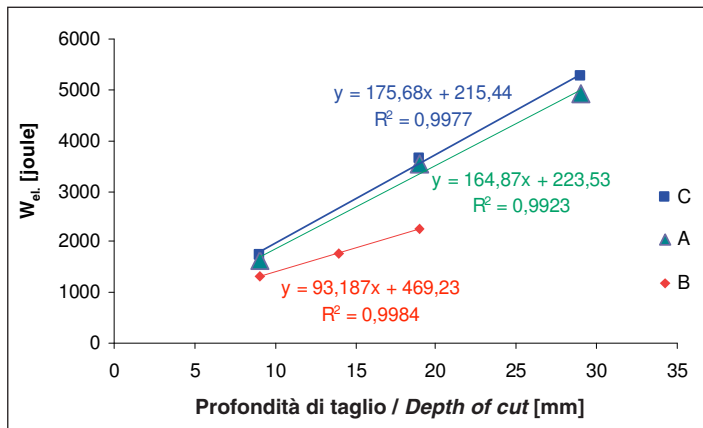


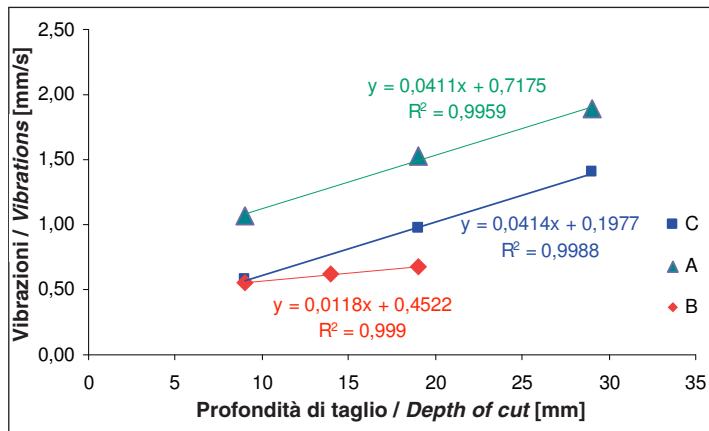
Fig. 7. Relazione tra il consumo di energia elettrica (W_{el}) e la profondità del taglio per ognuno degli utensili (A,B,C).
Relation between electrical energy consumption (W_{el}) and the depth of cut for each of the tools (A, B, C).



mostra il più alto valore di durezza (vedi tabella 2). La matrice dell'utensile B risulta relativamente più fragile se si considera il comportamento duttile delle matrici utilizzate negli utensili A e C. Un comportamento più fragile/sgetrolabile della matrice porta ad una più scarsa ritenzione (minore capacità di tenuta) delle particelle di diamante che costituiscono gli

possesses the lowest values of yield stress, Young's modulus and toughness modulus, but shows the highest value of hardness (see table 2). Tool B matrix is relatively more fragile compared to the ductile behaviour of the matrices used in tools A and C. A more fragile/brittle behaviour of the matrix results in a poorer retention (lower holding capacity) of the diamond particles which are

Fig. 8. Relazione tra le vibrazioni e la profondità del taglio per ognuno degli utensili (A, B, C).
Relation between vibrations and the depth of cut for each of the tools (A, B, C).



effettivi elementi di taglio. Quindi, durante il processo di taglio, il rinnovo dei diamanti è elevato, cioè le particelle di diamante nel segmento sono molto più attive, riducendo le forze prodotte, le vibrazioni e il consumo di energia dell'utensile.

5. CONCLUSIONE

I risultati di questo caso di studio evidenziano che il consumo di energia, le forze di taglio e le vibrazioni nell'utensile hanno una dipendenza abbastanza lineare sia rispetto alla profondità del taglio che alla velocità di taglio (velocità di avanzamento). I risultati dimostrano inoltre l'utilità e l'accuratezza delle metodologie standard proposte per eseguire test relativamente veloci su utensili diamantati, consentendo ai produttori di utensili di sapere esattamente come ogni utensile si comporta e come esso possa essere paragonato ad altri utensili.

the effective cutting elements. Therefore, during the cutting process, the refreshment of the diamonds is high i.e. the diamond particles in the segment are much more active, decreasing the generated forces, the vibrations and the energy consumption of the tool.

5. CONCLUSION

The results of this case study show that energy consumption, cutting forces and vibrations in the tools have a quite linear dependency of both the depth of cut and the cutting speed (in-feed speed). The results also demonstrate the usefulness and accurateness of the proposed standard methodologies to perform relatively quick tests in diamond tools, allowing tool producers to know exactly how each tool behaves and how it can be compared to other tools.



BIBLIOGRAFIA / BIBLIOGRAPHY

- Amaral P.M., Fernandes J.C., Midha S., Rosa L.G. (2001). *Advances on industrial characterisation of diamond tools and ornamental stones*. ROC Maquina (42): pp. 22-25.
- Amaral P.M., Fernandes J.C., Rosa L.G. (2009). *Wear mechanisms in materials with granitic textures – applicability of a lateral crack system model*. Wear, Vol. 266 (7-8): pp. 753-764.
- Fernandes J.C., Amaral P.M., Rosa L.G., Leal F. (1999). *A new method for testing diamond tools*. Proceedings of Int. Workshop on Diamond Tool Production, EURO PM 99: pp. 169-176.
- Fernandes J.C., Amaral P.M., Anjinho C.A., Rosa L.G. (2002). *An approach to design diamond tools for processing ornamental stones*. Proc. EURO PM2002, European Conference on Hard Materials and Diamond Tooling (ISBN 1-899072-17-9): pp. 109-119.
- Fernandes J.C., Pinto S., Rodrigues R., Amaral P.M., Rosa L.G. (2008). *Development of a new testing method for assessing the wear behaviour of circular cutting discs*. Materials Science Forum, Vols. 587-588: pp. 966-970.
- Rosa L.G., Amaral P.M., Anjinho C.A., Fernandes J.C. (2001). *New developments on diamond tool characterisation*. Proc. EURO PM2001 (ISBN 1-899072-08-X), Vol.1: pp. 414-422.
- Rosa L.G., Amaral P.M., Anjinho C.A., Fernandes J.C. (2004). *Evaluation of diamond tool behaviour for cutting stone materials*. Industrial Diamond Review, Issue 1: pp. 45-50.
- Rosa L.G., Amaral P.M., Fernandes J.C. (2008). *Experimental determination of Young's modulus in PM metal matrices used in diamond impregnated tools for cutting hard materials*. Powder Metallurgy, 51 (1): pp. 46-52.

SHORT PRESENTATION OF THE AUTHORS

Luís Guerra Rosa (Metallurgical Engineer with a Ph.D. in Mechanical Engineering and Aggregation in Materials Engineering).

Professor at Instituto Superior Técnico (Technical University of Lisbon), in the Mechanical Engineering Department. Professor Guerra Rosa is currently heading a research group on mechanical characterization of structural materials that deals, among other fields, with the characterization of hard materials (such as ceramics and stones), composite materials and PM materials used in diamond tools.

Jorge Cruz Fernandes (Metallurgical Engineer with a Ph.D. in Materials Engineering).

Professor at Instituto Superior Técnico (Technical University of Lisbon), in the Mechanical Engineering Department. Professor Cruz Fernandes main topics of research are: studies on ceramic materials and composites and characterization of PM materials used in diamond tools.

Pedro Miguel Amaral (Materials Engineer with a Ph.D. in Materials Engineering).

Researcher at Instituto Superior Técnico (Technical University of Lisbon), in the ICEMS (Institute of Science, Materials Engineering and Surfaces). Doctor Pedro Amaral main topics of research are: studies in mechanical characterization of stone, PM materials used in diamond tools, evaluation of tool performance and optimization of processing technologies dealing with stone manufacturing.

Carlos Alberto Anjinho

Researcher at Instituto Superior Técnico (Technical University of Lisbon), in the ICEMS (Institute of Science, Materials Engineering and Surfaces). Master in Materials Engineering.

Adriano Coelho

Materials Engineer in the company Frontwave. Master in Materials Engineering.

Новые стандартные методики определения эффективности резания алмазных режущих дисков

В данной работе дано описание новой стандартной методики, применяемой для определения эффективности резания алмазных дисков. Используемое для этой цели оборудование (разработка Лиссабонского технического университета I.S.T.) представляет собой специальный мостовой распиловочный станок с серией встроенных систем автоматизации и контроля. Это оборудование позволяет контролировать в полном объеме условия работы; при этом посредством специального программного обеспечения выполняется мониторинг и занесение в память всех выходных данных, относящихся к резанию. Данное программное обеспечение используется также для разработки методик с заранее заданными параметрами. Опираясь на результаты такого рода испытаний и на оценку эффективности резания, можно сформулировать критерии выбора оптимального

инструмента с первоочередным учетом требований конечных пользователей. В данной работе приводится описание конкретного случая с использованием трех алмазных режущих дисков диаметром 400 мм каждый. Инструмент различался только по типу основы, используемой для сегментов. Сегменты были изготовлены из металлических связующих веществ различного типа, но с алмазной крошкой одинаковой величины и концентрации. Все испытания проводились на испанском граните Поррино (Porrino). В целях изучения влияния металлических связующих компонентов на эффективность резания были определены механические характеристики отдельных связующих и сопоставлены с различными выходными параметрами операции резания. Результаты данного конкретного случая свидетельствуют о практической полезности и точности описанных методик испытаний.

مناهج معيارية جديدة لتصنيف نجاعة الأقراص الماسية القاطعة

القطع النهائية بواسطة برمجية خاصة، يقع استعمالها أيضا لتحديد مناهج التمييز المحددة.

ومن خلال النتائج المترتبة عن هذا الصنف من الاختبارات وتقديرات نجاعة عملية القطع، يمكن تحديد المعايير الخاصة بانتقاء التجهيزات الأكثر جودة، مع الأخذ في الاعتبار حاجة المستعمل النهائي. ويقدم هذا التقرير دراسة لعينة يتم فيها استخدام 3

يهدف هذا التقرير إلى تقديم مناهج معيارية جديدة لتصنيف نجاعة الأقراص الماسية القاطعة. تتكوّن أجهزة التصنيف (التي وضعتها الجامعة التقنية بلشبونة، بمساعدة شركة فرونت وايف (FrontWave) من مصقّلة جسرية خاصة تتضمن سلسلة من أنظمة جديدة للأتمتة والتحكم. وتسمح هذه الأجهزة بالتحكم الكلي في ظروف العمل، بينما يتم حفظ ومتابعة بيانات عملية

على جرانيت بورينو الإسباني. ولفهم تأثير السبائك المعدنية على نجاعة عملية القطع، فإن الخصائص الميكانيكية لكل سبيكة قد تم تحديدها وتجربتها مع العديد من المقاييس المتعلقة بعملية القطع النهائية. وقد أبرزت لنا النتائج المترتبة عن دراسة هذه العينة أهمية ودقة مناهج الاختبار المعتمدة.

أقراص ماسية قاطعة يُبلغ قطر الواحدة منها 400 ملمتر. وتختلف الأجهزة فقط من حيث نوع المادة المستعملة في الفصوص. وقد تم إنتاج الفصوص من سبائك معدنية مختلفة ولكن مع استعمال نفس نوعية الغبار والمحافظة على نفس درجة تركيز الماس. كما أن جميع الاختبارات قد تم إجراؤها