

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA



**Facoltà di Ingegneria**

**Corso di laurea in Ingegneria Meccanica**

Tesi di laurea

**Interventi migliorativi su una macchina di prova di perline diamantate  
ed esecuzione di una serie di sperimentazioni**

Candidato

**Massimo Bertoloni**

Relatori:

Prof. Ing. Giovanni Tantussi

Ing. Michele Lanzetta

Ing. Valter Romoli

27 Ottobre 2003

Archivio tesi corso di laurea in ingegneria meccanica /03

Anno accademico 2002/2003

Consultazione consentita

Titolo della tesi

**Interventi migliorativi su una macchina di prova di perline diamantate ed  
esecuzione di una serie di sperimentazioni**

di

**Massimo Bertoloni**

Tesi proposta per il conseguimento del

titolo accademico di

**DOTTORE IN INGEGNERIA MECCANICA**

presso la

Facoltà di Ingegneria

della

Università degli Studi di Pisa

27 Ottobre 2003

Autore:

Massimo Bertoloni..... *Massimo Bertoloni*.....

Approvata da:

Prof. Ing. Giovanni Tantussi..... *Giovanni Tantussi*.....

Ing. Michele Lanzetta..... *Michele Lanzetta*.....

Ing. Valter Romoli..... *Valter Romoli*.....

## Riassunto

### **Interventi migliorativi su una macchina di prova di perline diamantate ed esecuzione di una serie di sperimentazioni**

Il presente lavoro di tesi è inserito nell'ambito di un progetto di ricerca interuniversitaria coinvolgente gli atenei di Pisa, Cassino, L'Aquila ed il Politecnico di Milano, sul tema "*Tecnologie di lavorazione delle pietre naturali*" cofinanziato dal Ministero per l'Istruzione, l'Università e la Ricerca.

Al termine di una rapida descrizione della macchina tramite la quale vengono condotti test di taglio con perlina diamantata su materiali lapidei, la tesi riporta una serie di interventi migliorativi per l'apparecchiatura stessa che ne hanno consentito il corretto funzionamento, permettendo l'acquisizione di dati significativi.

Dopo alcune considerazioni di carattere generale riguardanti l'usura di un utensile diamantato e circa la meccanica della formazione del truciolo, viene analizzato un modello sperimentale per le forze di taglio agenti su un singolo grano diamantato.

La seconda parte del lavoro inizia descrivendo il modo in cui sono stati determinati i parametri tecnologici con i quali eseguire i test affinché, grazie ad essi, si possano simulare al meglio le reali operazioni di taglio, per poi continuare con lo studio della particolare dinamica di lavoro della perlina durante le prove.

Sono stati successivamente riportati ed analizzati tutti i risultati forniti da questa prima serie di sperimentazioni; la loro acquisizione ha fatto sì che potesse essere elaborato un modello che è in fine descritto e di cui si auspica la validazione anche per le situazioni non ancora testate.

## Abstract

### **Improving actions on a diamond beads test machine and execution of a experimentations series**

This thesis is part of a national research project involving Universities of Pisa, Cassino, L'Aquila and Milano, about "*Natural stones cutting technologies*" co-financed by the Ministry for Education, University and Research.

At the end of a fast description of the machine by which diamond beads tests are carried out on natural stones, the work reports a series of improving actions for the same machine which now runs properly and enables a significative data acquisition.

After some general consideration about diamod tools wear and stone chip formation, an experimental model for the cutting forces on a single diamond grit is analyzed.

The second part of the thesis begins describing the determination of machinig parameters by which to perform the test so that they can simulate the real cutting operations at best; the work goes on studying the bead working particular dynamics during the test.

All results given by this first experimentations series has subsequently been reported and analysed; on account of these results a model, whose validation is hoped also for the parts of not tested situations, has been carried out and finally described.

# INDICE

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
--------------------------	----------

## **CAPITOLO 1**

### **La Macchina: obiettivi, origini e sintetica descrizione.....3**

1.1 Generalità sull'impiego del filo diamantato e sua descrizione.....	3
1.2 Necessità di una macchina da laboratorio per test d'usura.....	7
1.3 Origini dell'attuale apparecchiatura di prova.....	8
1.4 Breve descrizione della macchina e della dinamica di funzionamento.....	12
1.4.1 Analisi dei particolari costruttivi.....	13
1.4.2 Apparecchiature accessorie.....	17
1.4.3 Consolle di comando.....	19

## **CAPITOLO 2**

### **Iniziali problematiche di funzionamento e relativi interventi**

#### **risolutivi.....21**

2.1 Analisi dello stato della macchina prima dei test di taglio.....	21
2.2 Problemi insorti durante le prime operazioni di taglio.....	24
2.3 Scelte effettuate per la risoluzione delle problematiche presenti ed interventi migliorativi apportati sulla macchina.....	28

## **CAPITOLO 3**

### **Generalità sull'usura dell'utensile diamantato ed analisi delle**

#### **forze agenti su di un singolo grano.....35**

3.1 Considerazioni sull'usura di un utensile diamantato.....	35
3.2 Approccio analitico all'usura dell'utensile diamantato.....	39
3.3 Meccanica della formazione del truciolo.....	44
3.4 Modello sperimentale per l'analisi delle forze di taglio su un singolo grano diamantato.....	46



## **CAPITOLO 4**

### **Dinamica e cinematica delle operazioni di taglio svolte**

<b>sull'apparecchiatura di prova.....</b>	<b>56</b>
4.1 Forze agenti sulla singola perlina diamantata nelle reali operazioni di taglio.....	56
4.2 Dalla cava al laboratorio: determinazione delle forze di contatto perlina-campione lapideo e delle velocità relative di taglio con cui eseguire i test sull'apparecchiatura di prova.....	62
4.3 Approfondimento inerente la dinamica delle operazioni di taglio condotte sulla macchina di prova.....	66
4.4 Definizioni geometrico-cinematiche e parametri di usura.....	71

## **CAPITOLO 5**

### **Prima serie di sperimentazioni e conseguenti risultati.....**

5.1 Descrizione dei test effettuati e grafici ottenuti.....	75
5.2 Rielaborazione dei dati sperimentali e creazione di un modello.....	86
5.3 Osservazione microscopica dello stato dei grani diamantati.....	92

### **CONCLUSIONI.....**

**95**

### **BIBLIOGRAFIA.....**

**96**

### **RINGRAZIAMENTI.....**

**99**

## **INTRODUZIONE**

Il taglio e l'estrazione con filo diamantato di pietre naturali è, ormai da più di tre lustri, una tecnologia palesemente efficiente e non distruttiva, venendo così a costituire la risposta più avanzata per questa tipologia di operazioni. Rispetto ai metodi tradizionali l'uso del filo diamantato consente un più razionale sfruttamento delle cave e diventa indispensabile per migliorare costi, quantità e qualità del materiale estratto; è chiaro quindi come sia chi costruisce, sia chi utilizza questo particolare utensile, abbia forte interesse nel determinare quali siano i parametri di taglio da adottare in funzione dell'usura progressiva delle perline diamantate (che ne sono l'elemento costitutivo principale), per ottenere vantaggi in termini economici e di produttività, cercando di ottimizzare entrambi senza mai prescindere dai canoni di sicurezza nelle fasi di taglio.

La ricerca che si sta conducendo presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione dell'Università di Pisa vuol dare una risposta a questo interrogativo attraverso un piano di sperimentazione condotto mediante un'innovativa macchina di prova su cui testare le singole perline.

Le operazioni di costruzione, collaudo ed assemblaggio di tutti i componenti costituenti quest'apparecchiatura, sono state ultimate nello scorso mese di Marzo, e, da quel momento, risolti diversi problemi iniziali di funzionamento, i test hanno avuto inizio.

I parametri tecnologici adottati nella loro conduzione sono il risultato di un preciso studio inerente la dinamica delle reali operazioni di taglio, seguito da un'opportuna conversione dei dati da esso ottenuti, in modo da consentirne una fedele simulazione sulla macchina.

Ad oggi sono state eseguite prove su dischi campione di marmo Bianco di Carrara, lavorati con perline di tipo elettrodeposto.

I risultati conseguiti hanno permesso l'elaborazione di un primo modello sperimentale, funzione di velocità e forza di contatto, per la determinazione del volume di materiale asportato nell'unità di tempo; il modello è stato sin ora validato per una perlina nuova e per una perlina usurata, giunta ad un terzo

della propria vita utile (in termini di resa) lavorando con parametri non costanti in sequenza random.

E' stato inoltre condotto un interessante confronto tra due perline dopo che hanno asportato la medesima quantità di materiale, ma in condizioni di lavoro differente, ovvero utilizzando parametri di taglio variabili per una e molto spinti per l'altra.

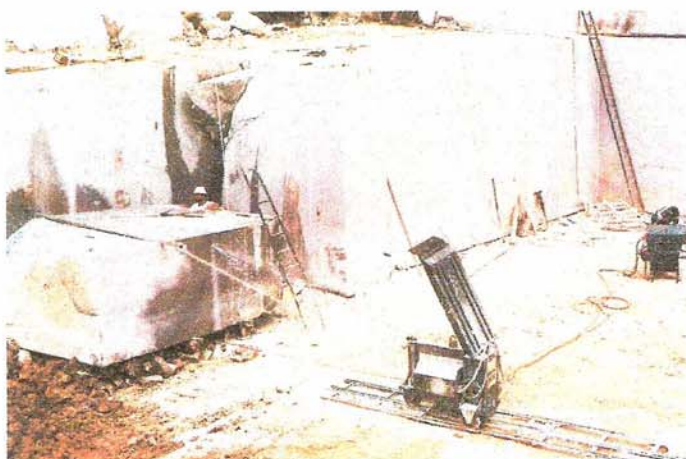
## CAPITOLO 1

### LA MACCHINA : OBIETTIVI, ORIGINI E SINTETICA DESCRIZIONE

#### 1.1 Generalità sull'impiego del filo diamantato e sua descrizione

L'attività estrattiva di pietre naturali quali marmo e granito, ha inizio, una volta stabilito un piano di coltivazione ed eseguita la messa in sicurezza della cava, eseguendo fori orizzontali e verticali nel blocco tramite apposite macchine oleodinamiche perforanti. Internamente ad essi viene inserito il filo diamantato, che, fatto passare sulla puleggia guida e sui volanetti di rinvio della tagliatrice a filo, viene automaticamente teso durante l'avanzamento del taglio attraverso lo scorrimento della macchina su binari orizzontali e portato in rotazione ad alta velocità dal gruppo volano-motore azionato da inverter (necessario per avere la possibilità di variare in modo continuo la velocità angolare), così da ottenere un taglio netto e preciso del blocco, fino al completo distacco.

E' ormai da tempo che l'impiego del filo diamantato risulta essere la tecnologia di taglio più efficiente e meno distruttiva sia per le estrazioni di materiale lapideo sia per la successiva riquadratura di blocchi. Rispetto ai metodi tradizionali (si pensi all'uso del filo elicoidale o a quello di cariche esplosive) il filo diamantato consente un più razionale sfruttamento della cava e diventa indispensabile per migliorare costi, quantità e qualità del materiale estratto.



**Figura 1.1: tagliatrice a filo all'opera in una cava di marmo**

Le macchine a filo diamantato sono sempre più usate anche nel settore dell'edilizia; esse sono una derivazione in misura ridotta, sia per dimensioni che per potenza, delle macchine da cava. Il principio di funzionamento è il medesimo, ma la lunghezza del filo adoperato è minore: mentre nelle cave di pietra si usano circuiti da 50/100 metri, in edilizia si arriva mediamente a 15/20 metri. I principali impieghi si hanno nei lavori di riconversione industriale, taglio di ponti, e demolizione urbana.

Il filo diamantato, che può presentare diverse tipologie, consiste in un cavo di acciaio sul quale vengono fissate, vedremo in seguito come, speciali perline (30 o 40 per metro, rispettivamente per marmi e per graniti).



**Figura 1.2: diverse tipologie di filo diamantato**



La singola perlina è una piccola boccia in acciaio rivestita esternamente da una matrice metallica legante in cui sono dispersi i grani di diamante sintetico, che rappresentano i taglienti dell'utensile. I grani di diamante utilizzati, inseriti nella matrice metallica per sinterizzazione o per elettrodeposizione, sono di tipo sintetico, sia per ragioni economiche che di disponibilità, ma anche perché, avendo essi struttura policristallina (al contrario del diamante naturale, strutturalmente monocristallino), rompendosi generano sempre nuove punte; ciò rende il grano sintetico ideale per il taglio di materiali lapidei.

I diamanti sintetici possono essere prodotti in un'ampia gamma di dimensioni. Le grane solitamente utilizzate per la lavorazione di pietre naturali variano da 20 mesh a 50 mesh (la mesh di un setaccio indica il numero di aperture per pollice di lunghezza). La dimensione del grano determina la sporgenza di diamante sulla superficie della perla che influisce sulla profondità di taglio di ogni grano e, di conseguenza, sulla velocità di asportazione.

Il legante svolge funzioni molto importanti per le prestazioni dell'utensile: garantisce infatti una usura controllata consentendo la sporgenza progressiva dei cristalli di cui ne previene il distacco, agisce come dissipatore di calore ed assorbe urti e sollecitazioni quando il diamante viene in contatto con il pezzo da lavorare.

La perlina diamantata può avere diversi diametri a seconda del materiale che essa andrà a lavorare e della tipologia di utilizzo: tipicamente dagli 8 mm (per l'impiego su macchine sagomatici) agli 11 mm (per l'utilizzo in cava o su macchine adibite alla riquadratura dei blocchi).



**Figura 1.3: perline diamantate sinterizzate**

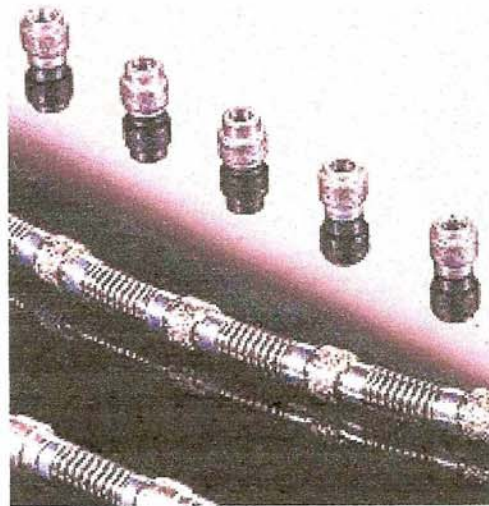
Fino ad alcuni anni fa esisteva un unico tipo di filo diamantato, quello in cui le perline venivano fissate sul cavo d'acciaio (del diametro nominale di 5mm) per mezzo di molle pretensionate, distanziali cilindrici e pressatori che, posti ogni 3-5 perline, hanno lo scopo di impedire lo sfilamento di tutti i componenti in caso di rottura del cavo.

Oggi però, in rispetto delle normative di sicurezza sul lavoro e per ragioni di praticità ed efficienza, si preferisce un montaggio delle perline mediante iniezione ad alta pressione in matrice plastica.

Il cosiddetto "filo gommato" è indispensabile nella lavorazione dei graniti per via della forte abrasione esercitata durante la lavorazione dagli elementi costitutivi di questo materiale, la quale causerebbe una rapida usura dei componenti metallici del filo tradizionale.

Nel taglio del marmo in cava si usa ancora il filo "tradizionale" principalmente per il migliore trascinarsi dell'acqua di raffreddamento, per il minor costo (dovuto all'assenza del processo di plastificazione) e per la possibilità di effettuare il montaggio desiderato direttamente in cava ; inoltre le perline si usurano uniformemente in quanto ruotano su se stesse durante il funzionamento (nel filo gommato lo stesso risultato si ottiene precaricando il filo con un carico torsionale prima di aggiungerlo).

Durante il taglio è necessario refrigerare gli utensili diamantati perché mantengano costanti le proprie caratteristiche chimico-fisiche, garantendo l'efficacia delle operazioni. Per questo scopo si ricorre all'utilizzo di getti d'acqua opportunamente posizionati, che hanno anche il compito di allontanare dalla zona di taglio il materiale asportato durante la lavorazione.



**Figura 1.4 : perline diamantate elettrodeposte e spezzone di filo con montaggio "meccanico"**

## **1.2 Necessità di una macchina da laboratorio per test d'usura**

Da quanto finora detto, è facile intuire che uno studio dell'usura della perlina diamantata correlato alla variazione dei parametri tecnologici della lavorazione, quali velocità di taglio e forza di contatto tra "utensile" e pezzo, sia assolutamente necessario a tutti i costruttori di perline per la permanenza sul mercato.

Ad oggi essi sono costretti ad inviare agli utilizzatori costose campionature di perline o di filo diamantato per poter eseguire "in loco" prove di ottimizzazione in occasione di variazione del modello di perlina o del tipo di materiale da tagliare. Nasce da questa esigenza l'idea di sottoporre a test la singola perlina, riproducendo in laboratorio condizioni di lavoro il più possibile simili a quelle che si presentano nel caso delle normali operazioni di taglio.

La creazione di un'apposita macchina con cui condurre una sperimentazione del genere, permette di conseguire numerosi vantaggi: innanzitutto superare le chiare difficoltà intrinseche nelle prove eseguite direttamente in cava, con il conseguimento di una maggiore sicurezza per gli operatori. Dal punto di vista prettamente operativo è sicuramente possibile raggiungere una maggiore flessibilità, nel senso che sia il materiale campione su cui condurre esperienze, sia la tipologia di perlina da testare risultano essere facilmente intercambiabili; conseguenza diretta di quanto detto è una decisa riduzione dei tempi di prova, la quale, associata al fatto che i test, come già detto, vengono eseguiti su un'unica perlina, comporta una non trascurabile diminuzione di costi.

Inoltre la precisione di dati rilevati in laboratorio porta a risultati molto più accurati e non generici. Va da sé che sarà necessario estendere ed adattare successivamente tali risultati all'intero filo che rimane comunque ciò che è in effetti usato.

Quindi, attraverso un piano di sperimentazione realizzabile con apposita tecnologia che preveda la facile variazione dei parametri di taglio, del materiale da testare e del tipo di perlina diamantata (elettrodeposta o sinterizzata), diventa possibile coprire un vasto range di condizioni operative ed ottenere



finalmente, in funzione di differenti combinazioni di esse, una serie di “curve di durata” che riportino l’andamento temporale dell’usura della perlina.

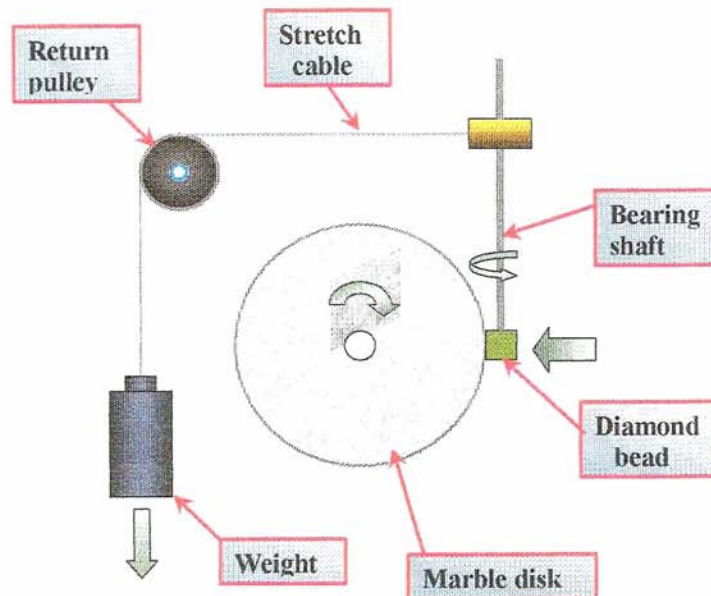
Tutto questo deve essere effettuato nell’ottica di un’ottimizzazione combinata di tempi di lavorazione, di produttività (relazionata alla quantità di materiale asportato) e soprattutto di costi; si vuol individuare una perlina “ad hoc” per ogni eventuale situazione lavorativa.

### **1.3 Origini dell’attuale apparecchiatura di prova**

La macchina realizzata ed attualmente funzionante presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione (D.I.M.N.P.) della facoltà di Ingegneria di Pisa è figlia, oltre che delle conoscenze acquisite negli ultimi 15-20 anni nel settore delle lavorazioni dei materiali lapidei, di diverse esperienze precedenti condotte all’Università di Cagliari e di alcuni progetti sviluppati nel corso degli anni '90 al D.I.M.N.P. stesso.

I primi tentativi di analisi e studio inerenti l’andamento dell’usura di perline diamantate sono stati eseguiti sul finire degli anni '80 presso la facoltà di Ingegneria dell’Università di Cagliari. Per la prima volta si testava una singola perlina e non uno spezzone di filo diamantato.

Lo schema cinematico adottato forniva una buona riproduzione della maniera di operare della perlina diamantata durante le reali fasi di lavorazione: essa infatti, montata su un albero di lunghezza approssimativamente uguale al raggio del disco campione di materiale lapideo da tagliare ed avente asse ortogonale a quello del disco stesso, veniva portata in rotazione a velocità molto bassa al solo scopo di uniformare l’usura lungo la circonferenza (della perlina ovviamente). La forza premente costante contro il campione di marmo, posto in rotazione ad elevata velocità, era ottenuta inizialmente mediante un semplice sistema di contrappesi.

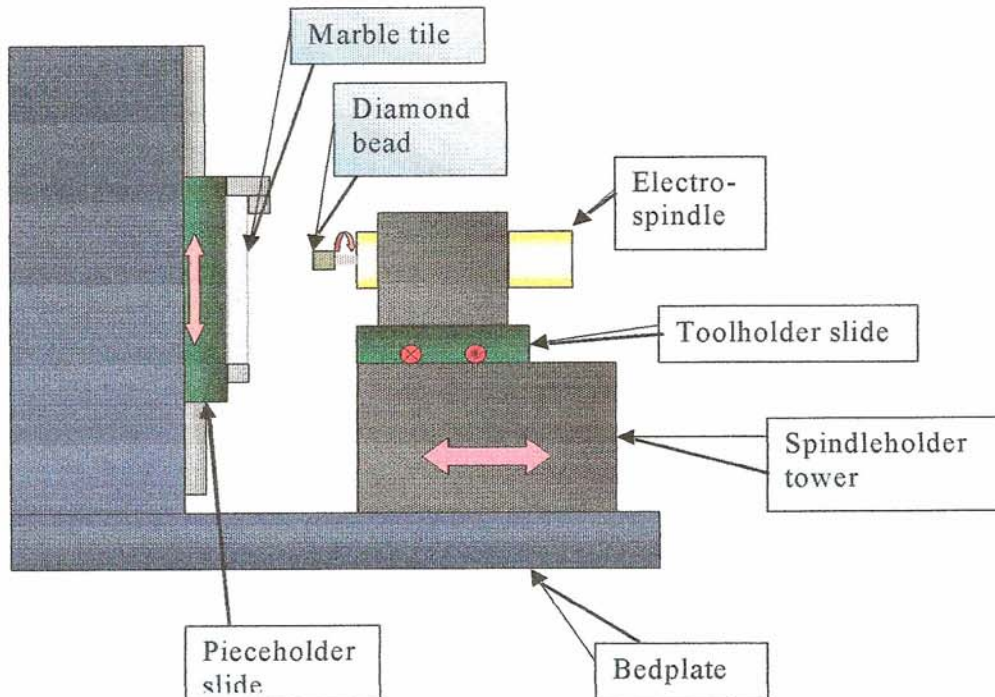


**Figura 1.5: schema semplificato dell' apparecchiatura sviluppata presso l'Università di Cagliari**

Tuttavia tale sistema aveva messo in luce taluni problemi prevalentemente di origine dinamica. Vi era una certa difficoltà nel realizzare una forza premente costante, ed inoltre l'elevata velocità del disco era causa di un contatto non continuo tra perlina e provino, il che innescava pericolose vibrazioni a cui contribuiva anche la lunghezza dell'alberino portaperlina.

Anche l'adozione di un sistema di controllo della forza ad anello chiuso non aveva risolto tutti i problemi.

Intorno alla metà degli anni '90, presso l'attuale D.I.M.N.P. si pensò di montare un'apparecchiatura costituita da un mandrino ad alta frequenza, portante in rotazione una perlina diamantata incollata ad un alberino di sostegno, in successione su un trapano a montante, su tornio parallelo e su una fresatrice; con tale attrezzatura si effettuava la spianatura di una piastrina di materiale lapideo collocata su una tavola mobile.



**Figura 1.6: Schema semplificato di una delle prime idee realizzate presso il D.I.M.N.P.: 'elettromandrino è montato su una fresatrice**

Il più grosso vantaggio che si aveva adottando un sistema del genere era una drastica riduzione dei fenomeni vibratori, ora praticamente nulli in virtù del fatto che è il provino a rimanere fermo mentre è la perlina che ruota velocemente.

Alcuni inconvenienti però erano ancora presenti: alla fine di ogni passata, non disponendo le macchine di movimenti automatici, era necessaria una regolazione manuale del provino lapideo; la velocità di rotazione del mandrino ad alta frequenza risultava ancora troppo bassa (max 30 m/sec) per poter riuscire a coprire l'intero range di velocità di taglio effettivamente raggiunte nella realtà; infine si doveva ancora eseguire un'impostazione manuale della forza di contatto.

Il problema maggiore era però costituito dal fatto che la perlina non poteva lavorare di testa, per cui, anche se una delle estremità della boccia cilindrica della perlina era stata asportata, nascevano comunque eccessive forze di attrito in corrispondenza della testa stessa.

La risoluzione delle diverse problematiche presentatesi nel corso degli anni sulle diverse attrezzature di prova e la ricezione di quanto di buono essi

avevano comunque lasciato, sono state le molle per la creazione del modello unico e definitivo di macchina da laboratorio per test d'usura per l'ottimizzazione del taglio di pietre naturali con perlina diamantata.

Il caratteristico layout da essa presentato è tale che tutti gli elementi rotanti coinvolti nel taglio hanno assi paralleli e giacenti sullo stesso piano, cosa che la distingue da tutte le esperienze antecedenti; nel prossimo paragrafo si riporta una essenziale descrizione dei singoli componenti costituenti la macchina e del loro modo di lavoro.

Prima di concludere è necessario precisare che in tutte le prove di laboratorio sin ora effettuate, comprese quelle in corso d'opera presso il D.I.M.N.P., la perlina, durante la sua rotazione, asporta materiale con moto relativo circonferenziale, mentre nel reale funzionamento in cava la singola perla asporta materiale con moto relativo, rispetto al blocco, assiale. Ciò non viene a costituire un problema dato che l'usura del micrograno diamantato, orientato in modo del tutto casuale, viene ad essere influenzata esclusivamente dai parametri di taglio essendo il materiale anisotropo, per cui gli effetti ottenuti nei due casi sono del tutto comparabili.



## 1.4 Breve descrizione della macchina e della dinamica di funzionamento

Nonostante la macchina di prova e le sue modalità di funzionamento siano già state particolareggiatamente descritte in [5] ed in [12], si ritiene comunque necessario riportare una sintetica descrizione della stessa, dei suoi elementi accessori e della dinamica da essa adottata per i test di taglio, così che il lettore possa meglio comprendere gli interventi migliorativi apportati e la modalità di esecuzione delle prove.

Nella “nostra” macchina, la perlina, montata su un alberino avente lunghezza minima pari alla metà dello spessore del disco in materiale lapideo (diametro 300 mm e spessore 50 mm), è posta in rotazione mediante un elettromandrino ad alta frequenza che può raggiungere una velocità massima di 90.000 giri/min. La perlina viene premuta con forza mantenuta costante grazie ad un opportuno feedback (in seguito descritto), contro la superficie esterna del disco da lavorare, ruotante, grazie ad un motore elettrico azionato da inverter, in un range di velocità mantenuto piuttosto basso [4÷16 giri/min.]; grazie a ciò, si realizza l’assenza di rottura fragile del materiale lapideo, possibile per azione della forza centrifuga durante la lavorazione.

Inoltre si consegue il grosso vantaggio di una velocità relativa di taglio (assimilabile alla sola velocità della perlina, essendo essa molto maggiore di quella del provino) variabile in una gamma di valori coincidente con quello delle reali operazioni [30/40 m/s].

La scelta fondamentale di adottare un processo di taglio che preveda la contemporanea rotazione dell’utensile diamantato e del provino lapideo, fornisce la possibilità di massimizzare la quantità di materiale asportato dal disco campione, cosa difficilmente ottenibile con differenti configurazioni, ed anche una riduzione dei tempi di prova dato il funzionamento continuo della perlina sino al quasi esaurimento del provino lapideo.

Dato che la perlina può lavorare soltanto lungo la propria periferia (sulla quale sono disposti i grani diamantati) e non di “testa”, è necessario ricavare preventivamente sul disco da lavorare una serie di solchi ortogonali all’asse del

mandrino porta-disco, in modo da ottenere un “vano di scarico” che permetta alla perlina stessa di lavorare correttamente.

Tali solchi vengono realizzati sulla stessa macchina, impiegando un ulteriore mandrino che porta in rotazione una fresa a disco diamantata.



**Figura 1.7: visione d'insieme della macchina**

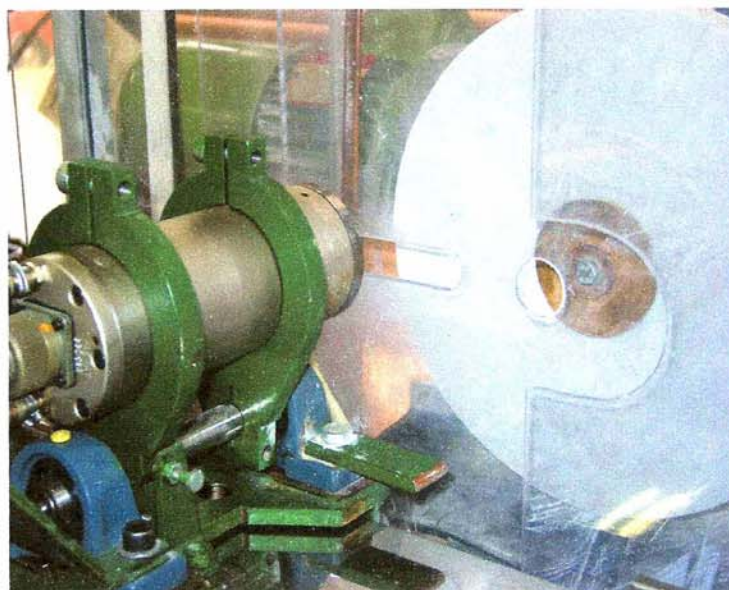
#### **1.4.1 Analisi dei particolari costruttivi**

Sul piano d'appoggio della struttura portante realizzata in profilati d'acciaio saldati, si trovano

- *Elettromandrino azionato da inverter*

Questi, inserito su un supporto basculante, è montato su una slitta a bassissimo attrito, azionata da un cilindro oleodinamico differenziale, che ne consente il moto traslatorio in direzione ortogonale al proprio asse.



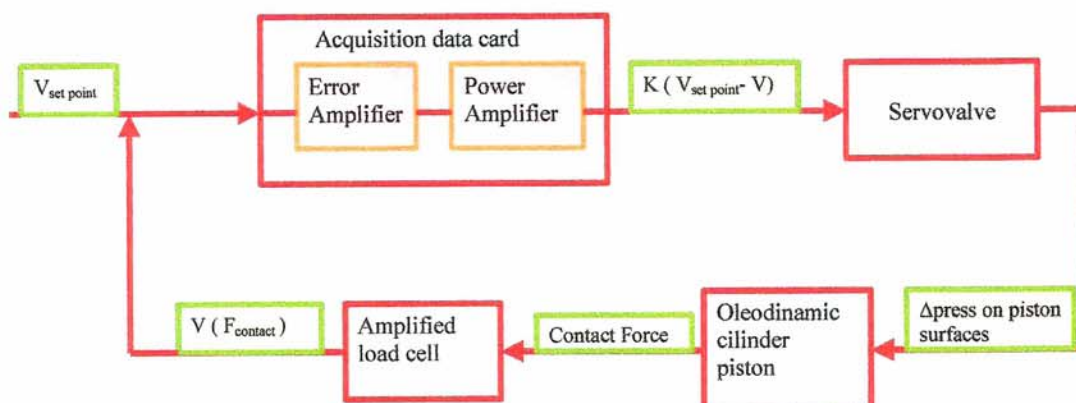


**Figura 1.8: primo piano dell'elettromandrino**

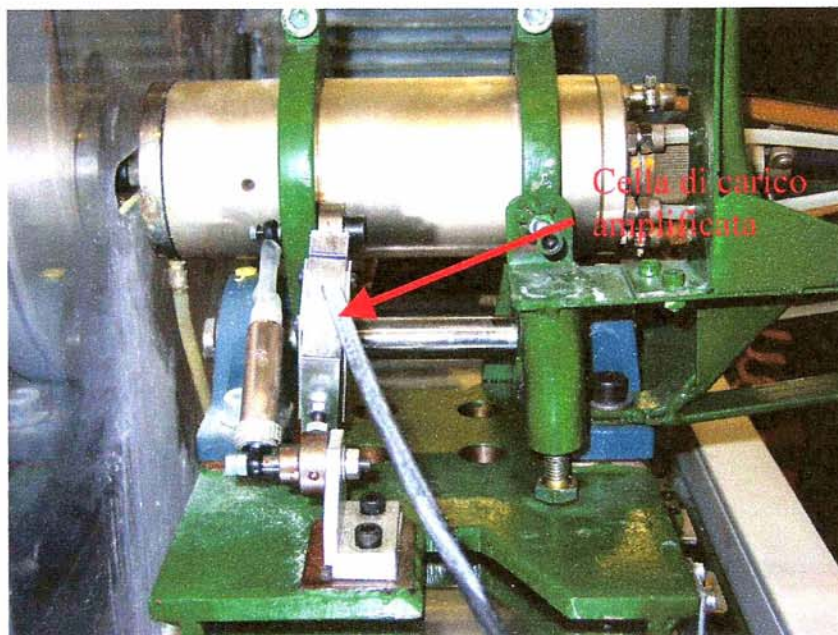
La differenza di pressione agente sulle due facce del pistone del cilindro, da cui dipende la forza di contatto perlina-disco lapideo, è regolata da una servovalvola; la forza premente realizzata, impostabile in un range di valori compreso tra 0.1 e 2 daN, viene continuamente misurata da una cella di carico amplificata (tarata come in [ ]).

La tensione in uscita dalla cella è inviata ad una scheda di acquisizione dati dove viene confrontata con un valore di set-up preimpostato; la differenza tra i due valori (l'errore  $\epsilon$ ) rappresenta la tensione di comando per la servovalvola.

Un trasduttore lineare elettromagnetico misura gli spostamenti della slitta.



**Figura 1.9: schema anello retroattivo**



**Figura 1.10: cella di carico collegata al supporto dell'elettromandrino**

- *Mandrino porta-disco lapideo*

Esso è posto in rotazione, come già detto, tramite un gruppo motore-riduttore azionato da inverter, così da poterne regolare in continuo la velocità.

Tale motore è fissato su una slitta di precisione capace di muoversi parallelamente all'asse del mandrino grazie ad un secondo gruppo motore-riduttore anch'esso azionato da inverter.

Su questo secondo gruppo è montato un encoder che permette di controllare l'entità degli spostamenti assiali del disco, in modo da ottenere i corretti posizionamenti relativi fra lo stesso disco da lavorare e, rispettivamente la perlina e la fresa diamantata.



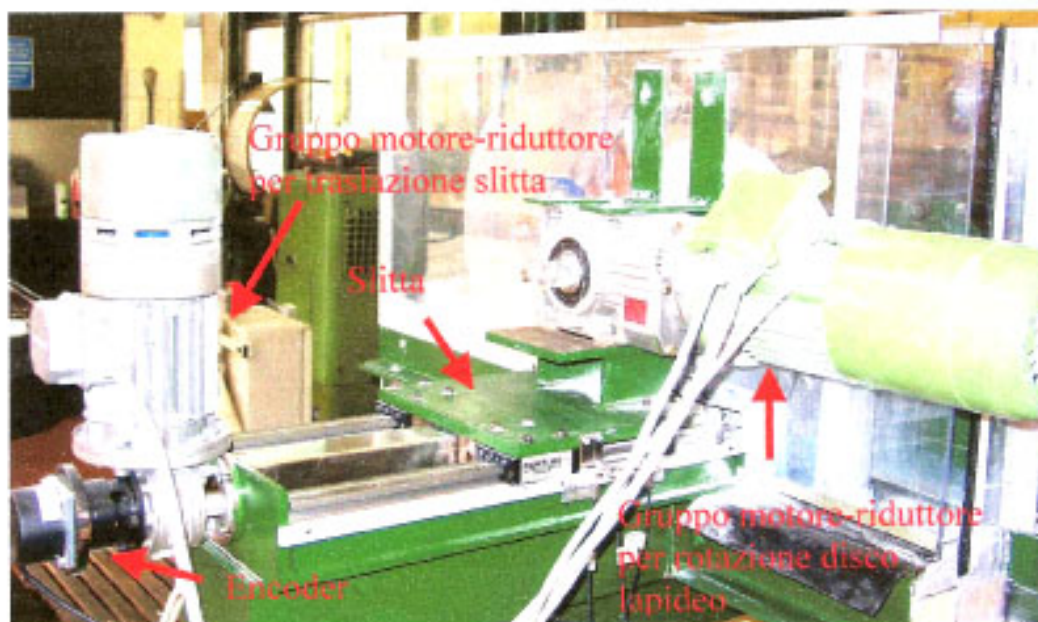


Figura 1.11: azionamenti per movimentazione provino lapideo

- *Mandrino porta-fresa diamantata*

La fresa circolare diamantata, necessaria per ottenere i "vani di scarico" sulla superficie periferica del disco lapideo, è azionata da un motore elettrico funzionante a numero di giri costante; questi è a sua volta ancorato ad una slitta di precisione in grado di spostarsi ortogonalmente all'asse dell'elettromandrino ad alta velocità grazie ad un gruppo motore-riduttore azionato da Inverter .



Figura 1.12: sistema di creazione "solchi di scarico"

E' doveroso inoltre precisare che i movimenti di tutte le slitte fin qui citate sono regolati da sensori di prossimità e microswitch di fine corsa.

### 1.4.2 Apparecchiature accessorie

- Sistema di circolazione e raffreddamento del liquido impiegato per stabilizzare la temperatura dell'elettromandrino ad alta velocità (fig. 1.12).



Figura 1.13

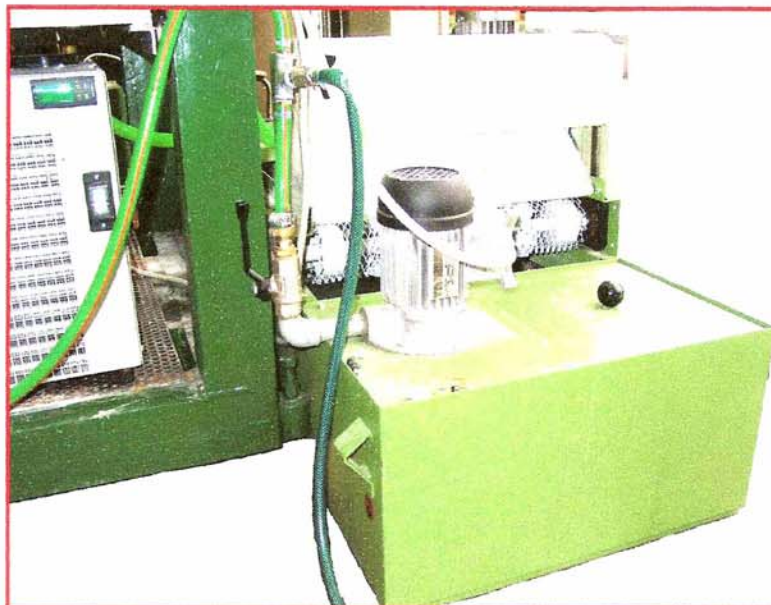
- Sistema di dosaggio olio-aria per la lubrificazione dei cuscinetti dell'elettromandrino stesso (fig 1.13 a sinistra).
- Centralina idraulica per il funzionamento del cilindro oleodinamico (fig1.13 a destra).





**Figura 1.14**

- Vasca di raccolta, depurazione e alimentazione dell'acqua impiegata sia durante il taglio col disco diamantato, che durante l'azione della perlina (fig. 1.14).



**Figura 1.15**

La macchina è inoltre dotata di dispositivi di protezione e sicurezza; i primi, costituiti da pannelli in lexan opportunamente sagomati e posti tutt'intorno alla "zona di taglio", oltre ad evitare involontari contatti da parte degli operatori, hanno anche la funzione di contenere gli spruzzi di acqua refrigerante

adoperata sia durante i test che durante la creazione dei solchi sul provino; i secondi invece sono realizzati oltre che con fine corsa elettromeccanici e magnetici a riluttanza variabile, anche tramite due pulsanti di arresto di emergenza a fungo posizionati in corrispondenza della posizione di lavoro dei due operatori che governano l'uso dell'apparecchiatura.

### 1.4.3 Consolle di comando

Separata dalla struttura è realizzata una consolle di comando (fig.1.15) che presenta:

- un quadro elettrico di potenza;
- un quadro elettrico contenente un PLC Siemens ed i relativi circuiti di interfaccia;
- un PC dotato di software di acquisizione dati (Labview);
- un gruppo inverter per l'azionamento dell'elettromandrino ad alta velocità;

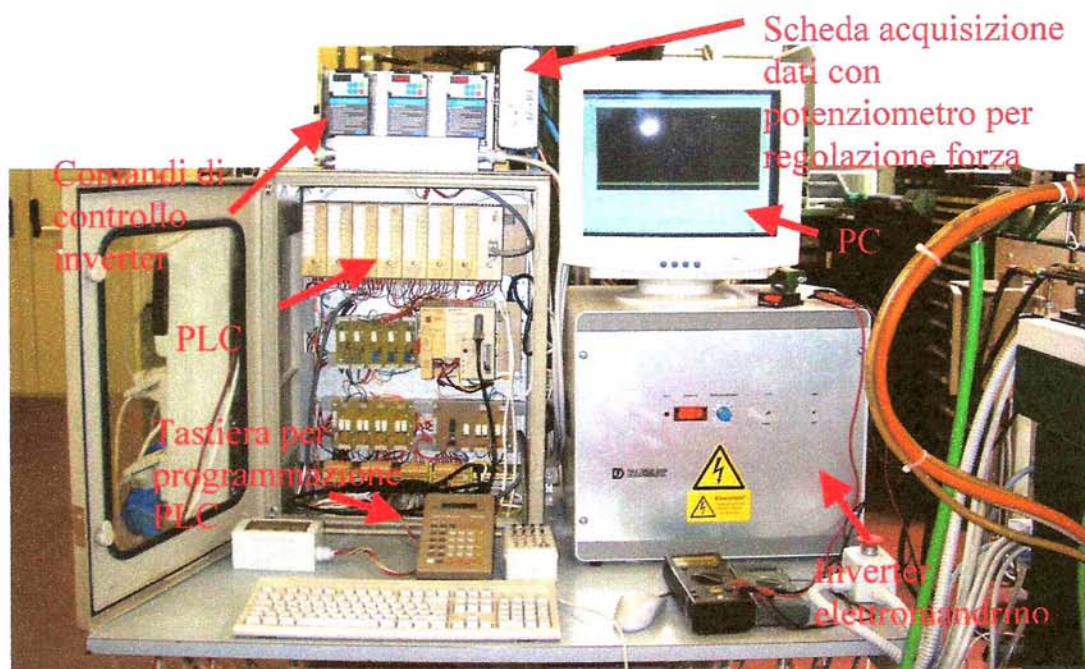


Figura 1.16

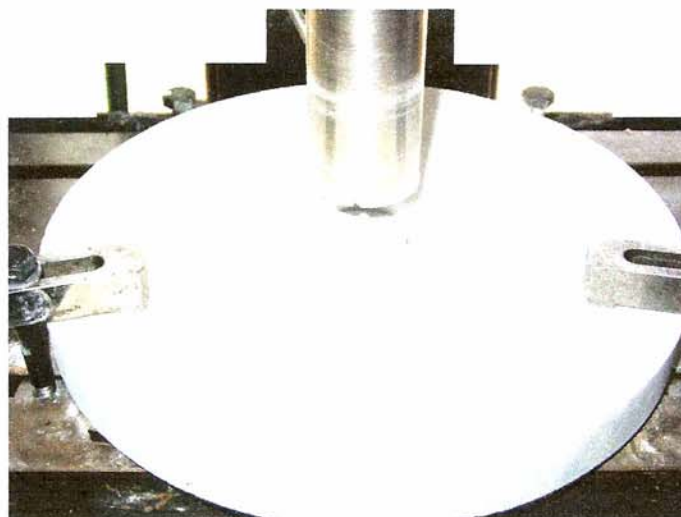


- tre inverter per l'azionamento delle due slitte e del motore per la rotazione del disco lapideo;
- un quadro per l'alimentazione dei servizi accessori.

Una opportuna programmazione del PLC consente il controllo della macchina, coordinandone la sequenza di operazioni da eseguire sia in fase di generazione dei "solchi di scarico", sia per le prove di taglio.

Sebbene non sia un'operazione compiuta direttamente sulla macchina, si ritiene necessario far presente che, prima di poter essere montati sul proprio mandrino, i dischi di materiale lapideo devono essere opportunamente forati nel proprio centro, così che l'albero del riduttore, mediante un fissaggio tra boccia e controboccia, possa adeguatamente supportarli.

Questa operazione avviene tramite un utensile appositamente creato a forma di tubo, di cui un'estremità è rivestita da una matrice legante ricoperta di grani diamantati; il particolare utensile viene montato sul trapano a montante presente in officina. Una volta riferito il disco e bloccato mediante staffe sulla tavola porta-pezzo del trapano, la foratura, con l'apporto di acqua refrigerante, può essere eseguita.



**Figura 1.17 : foratura del disco lapideo mediante apposito utensile montato su trapano a montante**

## CAPITOLO 2

### INIZIALI PROBLEMATICHE DI FUNZIONAMENTO E RELATIVI INTERVENTI RISOLUTIVI

#### **2.1      Analisi dello stato della macchina prima dei test di taglio**

Fin dalle sue fasi iniziali, il processo di progettazione dell'apparecchiatura di prova ha sempre mirato alla costruzione di una macchina che fosse sicura da ogni punto di vista ed in ogni dettaglio.

L'analisi dei rischi riportata in [5] rappresenta dunque semplicemente il naturale perfezionamento di un'opera di progettazione attenta, come detto, a non creare condizioni di attività particolarmente rischiose, ma è comunque stato doveroso eseguirla soprattutto nell'ottica di una futura redazione della dichiarazione di conformità ai requisiti base di sicurezza per l'apposizione della marchiatura CE sull'apparecchiatura.

Prima che i test di taglio avessero inizio, tutte le singole componenti della macchina sono state collaudate sia singolarmente sia poi, man mano durante l'assemblaggio, assieme, in modo da assicurare il progressivo soddisfacimento dei requisiti imposti dall'attività ordinaria della macchina stessa.

Il funzionamento meccanico dei gruppi di movimentazione, sia di quelli adibiti alla traslazione delle slitte che di quelli adibiti alla rotazione del provino e della fresa diamantata, si è dimostrato da subito soddisfacente; anche la funzionalità del sistema di smaltimento dei liquidi è risultata buona, così come l'elettromandrino, testato su un'attrezzatura di sostegno al banco, ed i suoi sistemi di lubrificazione e raffreddamento nonché il convertitore statico che

permette la regolazione della velocità angolare, hanno dimostrato perfetta efficienza.

Solamente il cilindro differenziale oleodinamico atto alla movimentazione della slitta porta-elettromandrino, a causa di un ritardo nella consegna da parte della ditta costruttrice (Cabot Oleodinamica), doveva essere ancora collaudato ed assemblato col resto della macchina.

Per testarne la capacità di movimento, il corpo del microcilindro è stato fissato ad una base in legno la quale presentava sulla direzione dell'asse dello stelo due blocchetti dotati di molle, così da evitare possibili urti del pistone sul fincorsa durante le prove.

Una volta caricata la centralina oleodinamica con circa 35 litri d'olio, collegati i tubi di mandata del fluido in pressione ai relativi ingressi del cilindro, si è proceduto con la connessione della scheda Moog di acquisizione dati alla servovalvola ed alla cella di carico.

Accendendo la pompa dell'olio, portato ad una pressione di 60+80 bar, ed esercitando manualmente in modo ciclico leggere pressioni sulla cella di carico, lo stelo del cilindro si sarebbe dovuto muovere nei due sensi, ma purtroppo, almeno nelle fasi iniziali, ciò non accadeva.

Preso atto di ciò, si è innanzitutto verificato che l'olio in pressione arrivasse in modo corretto al corpo del cilindro allentando leggermente i dadi di collegamento tra i tubi di mandata dalla centralina e quelli in ingresso al cilindro; lasciando trafilare una minima quantità d'olio si è inoltre ottenuto lo "spurgo" di eventuali bolle d'aria ancora presenti nel circuito.

Di seguito, allo scopo di ridurre gli attriti, si è effettuata una accurata lubrificazione dello stelo e si sono allentate le viti di fissaggio dei supporti necessari per l'ancoraggio del cilindro alla base in legno (anche queste forze, seppur necessarie, se troppo elevate, potevano costituire un ostacolo al moto dello stelo).

Questi tre semplici accorgimenti sono stati sufficienti per ripristinare il corretto funzionamento del cilindro che poteva ora essere finalmente assemblato col resto della macchina.



**Figura 2.1: cilindro differenziale con slitta porta-elettromandrino**

Fatto questo, si è verificata l'efficienza del feedback dell'anello chiuso descritto nel paragrafo 1.4.1; impostando attraverso il potenziometro presente sulla scheda Moog una tensione di 10 Volt, il cilindro doveva essere in grado di trasmettere una spinta di 2 kg (vedi [12]).

Che ciò in effetti avveniva, era dimostrato dal fatto che interponendo una molla opportunamente tarata, tra la slitta, mossa dal cilindro stesso, ed un'apposita battuta, la sua variazione di lunghezza moltiplicata per la rigidezza, forniva il valore voluto della forza; inoltre la cella di carico, all'equilibrio, dava in uscita un segnale (misurato per mezzo di un tester) di circa 10 Volt, secondo quanto previsto.

A questo momento tutto risultava pronto per l'inizio dei test di taglio.



## 2.2 Problemi insorti durante le prime operazioni di taglio

Se dal punto di vista della sicurezza degli operatori, come prevedibile dall'analisi preventivamente eseguita, mai, in questi primi mesi di funzionamento, si è incorsi in situazioni che richiedessero adeguate correzioni in corso d'opera, lo stesso non si può dire per l'aspetto meccanico-tecnologico. Sebbene, in linea teorica, visto quanto riportato in precedenza, fin dall'inizio delle operazioni di taglio, non si sarebbero dovuti incontrare problemi di funzionamento, tuttavia, in pratica, come ci si poteva aspettare, sia durante l'esecuzione dei "solchi di scarico" con disco diamantato, che durante i test con la perlina, si sono registrati malfunzionamenti ed inconvenienti che, direttamente od indirettamente, potevano influenzare, se non addirittura impedire, una corretta acquisizione dei dati durante le sperimentazioni.

Riportiamo di seguito i problemi a cui si è dovuto far fronte prima di iniziare il previsto piano di prove.

- I dati inerenti gli spostamenti della slitta di movimentazione assiale del provino lapideo, non erano ancora stati correttamente inseriti nel programma che avrebbe dovuto eseguire il PLC; quindi, per fare in modo che lo spessore dei dischi da asportare con la perlina, fosse della dimensione giusta (4,5 mm come la larghezza della superficie laterale della perlina), dopo aver approssimativamente riferito il pezzo alla fresa, si dovevano effettuare continue misure manuali, con una conseguente ovvia dilatazione dei tempi.

Il discorso può ripetersi per la fase in cui, in un secondo tempo, si necessitava di posizionare i medesimi dischi via via centrati sulla perlina diamantata, in modo da poter iniziare il test vero e proprio; anche in questo caso si era costretti ad un posizionamento dipendente dall'occhio umano, correndo quindi i rischi di poca precisione ad esso connessi.

- Si presentavano leggere perdite di acqua refrigerante (indispensabile per le operazioni di taglio) dal basamento della struttura di supporto, sia al momento della creazione dei "vani di scarico" sia durante la fase operativa della perlina; inoltre alcuni spruzzi fuoriuscivano anche dalla barriera protettiva di

lexan attraverso l'asola necessaria per consentire il movimento dell'elettromandrino assieme alla propria slitta.

- La realizzazione dei "solchi" con fresa diamantata risultava inizialmente piuttosto difficoltosa: infatti, man mano che essi si andavano creando, si osservava un repentino sgretolamento dei dischi lapidei adiacenti, il che precludeva qualsiasi test su perlina.

- Risolto, vedremo nel prossimo paragrafo come, il problema al precedente punto, prima dell'inizio delle prove di taglio vere e proprie, si doveva far fronte ad un nuovo inconveniente. Infatti durante l'avanzamento della slitta porta-elettromandrino, spesso si incappava in fenomeni di stick-slip sullo stelo del cilindro differenziale oleodinamico, i quali, inoltre, facevano entrare in risonanza il gruppo in questione; non era certo questa la situazione che ci si auspicava per l'inizio dei test.

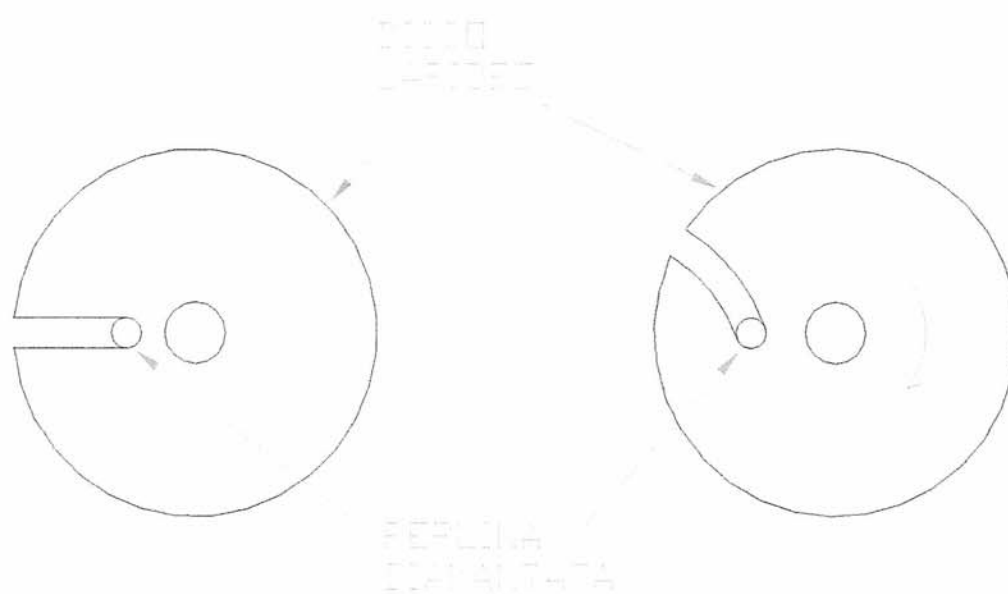
Anche nel momento in cui la perlina riusciva a venire in contatto col disco lapideo, la presenza di attriti sullo stelo del cilindro dava vita a problemi: essi, impedendo l'avanzamento della slitta, provocavano il distacco della perlina dal pezzo, la quale subito veniva spinta verso di esso da una forza maggiore della precedente (proprio per vincere l'attrito) trasmessa dal cilindro. Nell'istante del nuovo contatto, oltre a crearsi un'impronta sul disco, la cella di carico, percependo una forza più grande di quella a priori impostata, imponeva che la servovalvola comandasse sul pistone una pressione differenziale tendente a far allontanare di nuovo la slitta dal provino; il processo si ripeteva di continuo, innescando una pericolosa oscillazione del sistema slitta-elettromandrino.

Data la frequenza con cui si presentava, quello descritto è stato un problema piuttosto sentito e venirne a capo è stato abbastanza impegnativo.

Al momento in cui si è potuto cominciare ad asportare materiale con la perlina diamantata, per poter iniziare a rilevare dati e soprattutto far in modo che essi fossero attendibili, è stato necessario affrontare alcuni contrattempi legati principalmente alla "dinamica" di taglio.

- Innanzitutto si è resa necessaria la regolazione, facilmente eseguibile grazie al sistema inverter, della velocità angolare del disco lapideo; si notava infatti che una velocità troppo bassa, intorno ai 4 giri/min., non consentiva alla

perlina un'asportazione circonferenziale del campione, ma, piuttosto, faceva sì che essa, avanzando, rapidamente "entrasse" nel disco, tagliando il materiale in maniera paragonabile a quanto sarebbe accaduto se il disco fosse stato fermo. In quest'ultimo caso la perlina rotante avrebbe seguito una traiettoria rettilinea, creando un intaglio radiale nel provino, mentre nel caso reale, data la presenza del, per quanto lento, moto di rotazione, l'intaglio assumeva una particolare traiettoria curva (visibile in fig. 2.2), data dalla combinazione dei due movimenti, che rendeva il disco totalmente inutilizzabile.



**Figura 2.2: a sinistra la perlina rotante asporta materiale su disco fermo, a destra è riportata la situazione in cui il provino ruota troppo lentamente per permettere un'asportazione "circonferenziale"**

D'altro canto una velocità troppo elevata (16 ÷ 20 giri/min.) del provino generava inaccettabili vibrazioni del gruppo elettromandrino durante le operazioni di taglio.

Al termine di vari tentativi, è stata individuata la velocità angolare ottimale per il disco lapideo in 8 giri/min..

- Il momento del primo contatto tra perlina rotante ad elevata velocità e disco lapideo (rotante a bassa velocità come suddetto) era, ed è, piuttosto delicato.

Soprattutto per valori più elevati della forza, se lasciato libero di avvenire, tale contatto risultava piuttosto brusco, tanto che, nell'attimo dell'"impatto", la perlina creava nel punto di ingresso un leggero avvallamento sul provino.

Tutte le volte che questo avvallamento, al completamento di un giro, si ripresentava alla perlina, questa, trovando per un istante il vuoto, era spinta repentinamente, grazie al funzionamento caratteristico dell'anello retroattivo in cui veniva a mancare in quell'attimo l'equilibrio, all'interno dell'avvallamento stesso, amplificandolo così giro dopo giro.

Si creavano così difetti come quello mostrato nella figura seguente.



**Figura 2.3: difetto causato da un brusco inizio del contatto perlina-disco in fase di taglio**

- A causa di una non perfetta complanarità delle facce dei campioni di marmo forniti, lo spessore dei dischi più esterni realizzati, mediante fresa diamantata, sul campione stesso, risultava spesso non costante sui 360°. Ciò faceva sì che la forza di contatto perlina-materiale, di valore costante grazie al loop retroattivo più volte citato, si trovasse ad agire, durante la rotazione del disco, su superfici non sempre uguali; ciclicamente quindi, nei tratti a spessore ridotto, l'aumento della pressione specifica di taglio provocava un tasso di asportazione di materiale maggiore rispetto ai tratti con spessore regolare.

Il risultato era che, dopo alcuni giri, il provino iniziava a presentare una forma non più perfettamente circolare, ma anzi simile ad una sorta di “fagiolo” la quale rendeva non più attendibili i dati successivamente acquisiti.

### **2.3 Scelte effettuate per la risoluzione delle problematiche presenti ed interventi migliorativi apportati sulla macchina**

Si intende ora descrivere, in risposta, punto per punto, a tutte le difficoltà analizzate nel precedente paragrafo, le scelte effettuate e le operazioni svolte che hanno permesso un buon funzionamento dell'apparecchiatura di prova e consentito la corretta acquisizione di dati durante la serie di sperimentazioni previste.

- Per fare in modo che il disco lapideo trovasse automaticamente la posizione assiale giusta in riferimento alla fresa a disco diamantata, così che potessero essere creati su di esso dischi dello spessore di 4,5 mm, si è proceduto come di seguito.

Dopo aver portato la slitta per la traslazione del provino sul microswitch di fine corsa più lontano dalla zona di taglio, la si è fatta avanzare fin quando la faccia esterna del medesimo provino non diventava complanare alla superficie interna della fresa diamantata.

Così riferiti, si è determinato in modo opportuno un set-point sul quale azzerare l'encoder dell'asse in questione e da quel punto, si sono calcolati (tenendo conto anche dello spessore, pari a 5 mm, della fresa) gli spostamenti da fornire al campione lapideo perché i “solchi di scarico” venissero realizzati in posizione tale da conferire ai dischi lo spessore voluto.

Tali spostamenti, conoscendo la risoluzione dell'encoder (si ricorda che la risoluzione di un trasduttore è lo spostamento rilevato ad un impulso fornito) e tenendo presente che il nostro trasduttore era in modalità di funzionamento “risoluzione doppia” (ovvero il rapporto spostamento/impulso è dimezzato



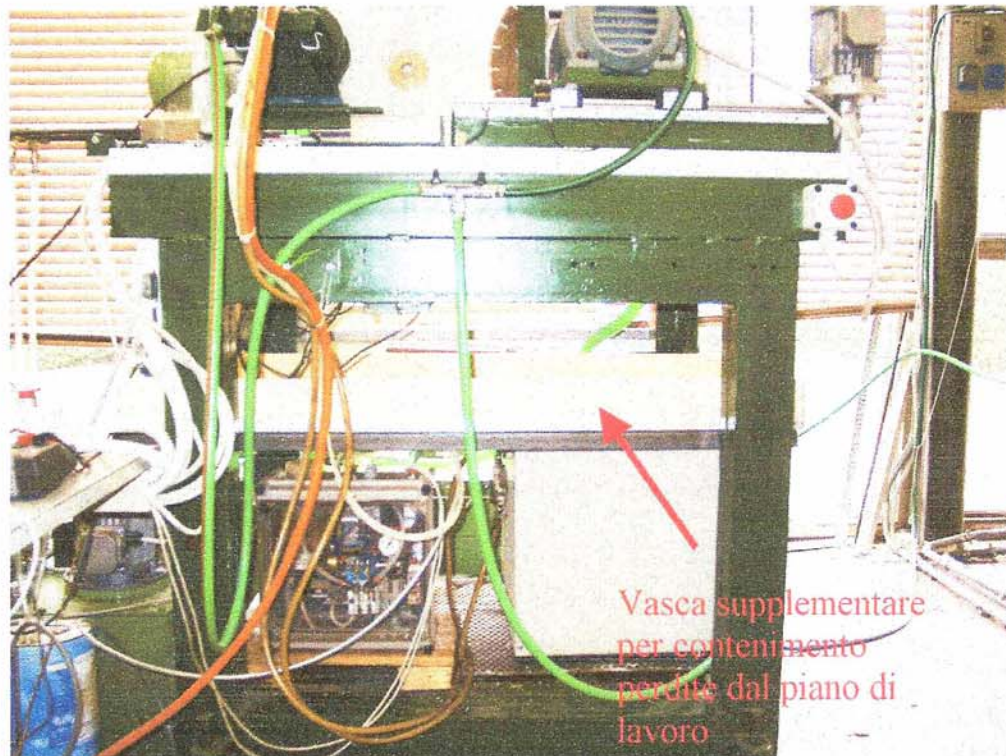
rispetto alla risoluzione standard), sono poi stati facilmente convertiti da millimetri a numero di impulsi.

Implementando, attraverso la consolle di comando, questi dati nel programma eseguito da PLC, si riuscivano ad ottenere i risultati desiderati; il controllore logico programmabile, una volta richiamato il sottoprogramma specifico, continuava a far avanzare la slitta con il provino finchè l'encoder non contava il numero di impulsi fornitogli; a quel punto il sistema si arrestava e, attivando rotazione ed avanzamento della fresa diamantata, poteva essere creato il primo solco. Terminata questa operazione, fermata e fatta uscire la fresa, la slitta era in grado di riavanzare dell'incremento necessario per l'esecuzione di un secondo vano.

Un procedimento del tutto analogo a quello descritto è stato eseguito per centrare i dischi del campione lapideo sulla perlina diamantata.

- Il problema delle perdite d'acqua dal piano di lavoro della macchina, è stato risolto creando una vasca di raccolta supplementare in PVC con apposito scarico alla vasca principale; la nuova vasca, opportunamente dimensionata e sorretta da supporti saldati alle gambe della struttura portante, è stata posizionata al di sotto delle zone di taglio

Per evitare invece spruzzi uscenti dalla zona di lavoro della perlina, è stata fissata, a mezzo di un magnete, sulla slitta porta-elettromandrino un'ulteriore piccola barriera in lexan debitamente sagomata.



**Figura 2.4**

- La causa della progressiva rottura dei dischi sul campione lapideo durante la creazione dei “vani di scarico” sono state preliminarmente valutate in un non perfetto parallelismo tra gli assi di provino e disco diamantato (che poteva far nascere problemi di soqqadro in fase operativa), ed in una troppo elevata velocità di avanzamento della fresa durante il taglio.

Inoltre il disco diamantato, essendo di tipo sinterizzato aveva una limitata capacità di asportazione durante il primo periodo di funzionamento.

Si è, per prima cosa, proceduto nel ritollerare gli assi suddetti, raggiungendo valori dell'ordine del centesimo di millimetro sia per il parallelismo nel piano orizzontale per essi passante, sia per eventuali errori di inclinazione rispetto al medesimo piano.

Per ridurre la velocità di avanzamento in causa, l'idea iniziale è stata quella di diminuire la frequenza di alimentazione del motore elettrico della slitta tramite inverter, ma, così facendo, per problemi di insufficiente potenza, il motore non riusciva a far girare la vite a ricircolo di sfere. Si è reso quindi necessario un cambio di riduttore, tale da dimezzare il rapporto di trasmissione.



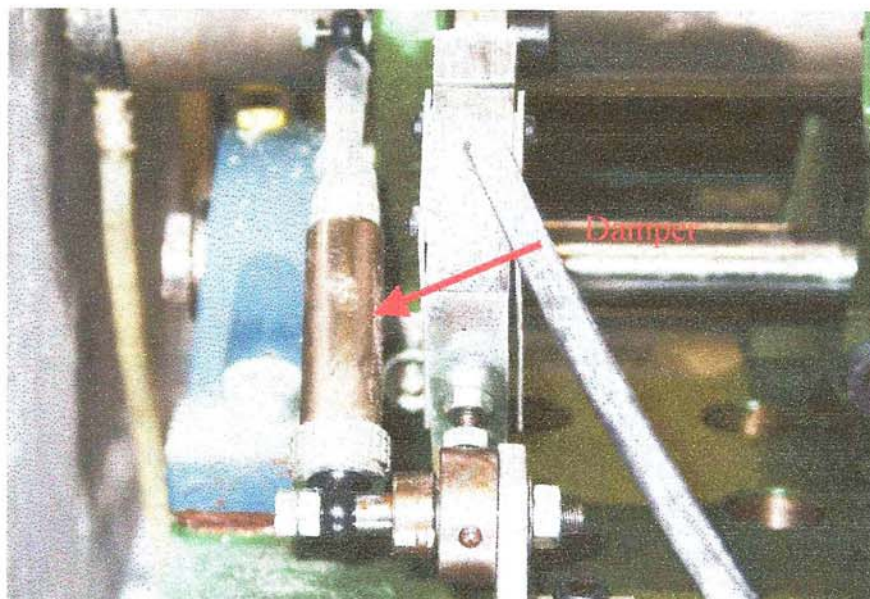
Inoltre il moto di avanzamento della fresa diamantata è stato “temporizzato” tramite PLC ad intervalli di 4 secondi, in modo che fosse consentito un migliore scarico del truciolo durante la lavorazione (pena un allungamento dei tempi).

L'adozione di questa serie di provvedimenti ha permesso la risoluzione del problema, che mai, nel corso dei mesi successivi si è ripresentato.

- L'eliminazione dei fenomeni di stick-slip descritti nel paragrafo precedente e delle vibrazioni ad esso conseguenti, è stata complessa e laboriosa.

Dopo una nuova attenta lubrificazione degli organi in moto, si è passati alla riprogettazione dei perni di vincolo per la cerniera dello stelo del cilindro e delle relative squadrette di sostegno da fissare al supporto; il fine di questa operazione era quello che l'asse dello stelo si venisse a trovare in una posizione, tra le diverse consentite dai nuovi disegni, che non desse luogo ad alcun impuntamento.

Contemporaneamente si svolgeva una misura, tramite oscilloscopio, della frequenza della vibrazione in cui veniva a trovarsi il gruppo, la quale risultava essere di circa 30-40 Hz; ciò ha portato alla decisione di inserire in parallelo alla cella di carico un opportuno smorzatore che aumentasse il coefficiente di smorzamento del sistema variandone così la risposta.



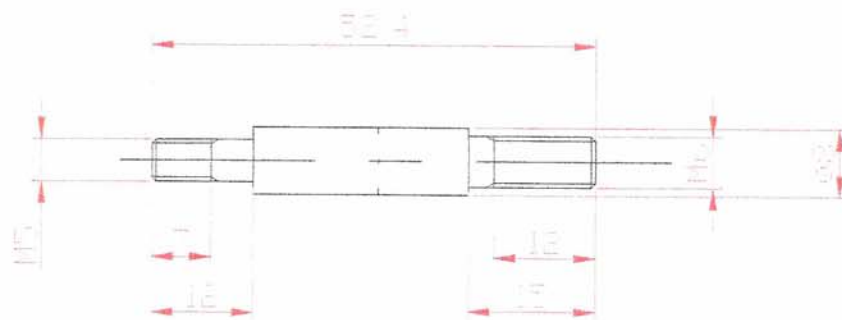
**Figura 2.5: smorzatore in parallelo alla cella di carico**



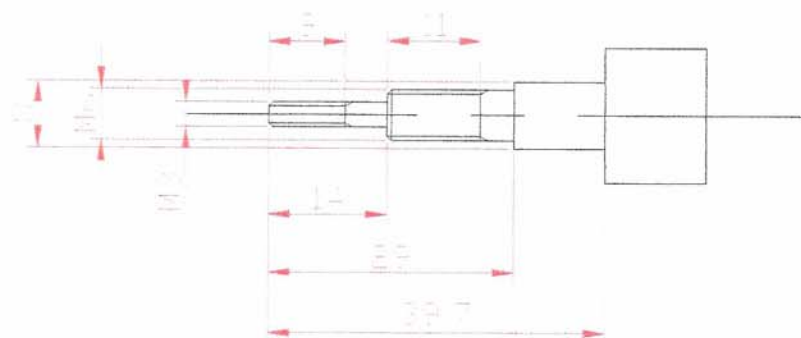
Questa decisione implicava anche la modifica dei perni che avrebbero dovuto tener accoppiate cella e smorzatore.

I risultati ottenuti sono stati piuttosto buoni.

Perno basso  
cella-smorzatore

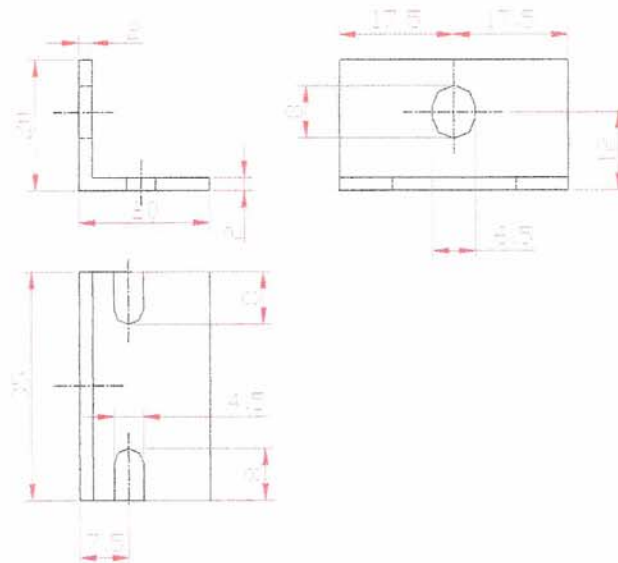


Perno alto  
cella-smorzatore

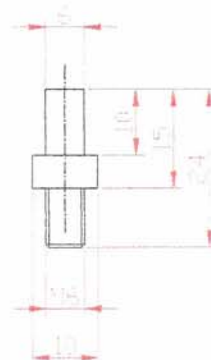


**Figura 2.6: nuovi perni per accoppiamento in parallelo smorzatore-cella di carico**

Squadretta per  
attacco perno



Perno di  
accoppiamento  
cerniera sferica  
cilindro - squadretta



**Figura 2.7: squadretta con relativo perno per vincolo cerniera sferica dello stelo del cilindro**

- Per far sì che l'inizio del contatto tra perlina ruotante e provino lapideo avvenisse nel modo più "dolce" possibile, senza così dar vita a difetti (vedi fig. 2.3) sulla superficie esterna del disco, si è adottato un rimedio tanto semplice quanto efficace: attraverso una leva opportunamente posizionata sulla guida di supporto della slitta porta-elettromandrino, si tratteneva manualmente la slitta stessa, facendola avanzare in modo lento e graduale sino al contatto in questione.

Non venendosi a creare nel punto di inizio contatto alcun avvallamento, l'operazione di taglio risultava ora essere uniforme e costante ad ogni giro del campione di marmo.

- Il problema del non perfetto parallelismo tra le facce dei provini lapidei consegnati, è stato risolto eseguendo una sfacciatura preliminare delle medesime tramite la fresa diamantata presente sulla macchina stessa. In questo modo, sebbene si allungassero i tempi di preparazione del campione per test di taglio, tuttavia si eliminava la possibilità che i dischi durante la lavorazione venissero ad assumere forme particolari non consone ad una corretta acquisizione dei dati.

Una volta eseguita questa serie di necessarie correzioni, il funzionamento dell'apparecchiatura di prova risultava più che soddisfacente e l'acquisizione dei dati, ora svolta nel modo teoricamente previsto, appariva significativa.

Ad oggi non sono stati apportati ulteriori interventi o modifiche.

## CAPITOLO 3

### GENERALITA' SULL'USURA DELL'UTENSILE DIAMANTATO ED ANALISI DELLE FORZE AGENTI SU DI UN SINGOLO GRANO

#### 3.1 Considerazioni sull'usura di un utensile diamantato

Tutti gli utensili usati per le operazioni di taglio e lavorazione dei materiali lapidei (frese, dischi, le stesse perline etc...) si basano su un meccanismo abrasivo dovuto allo sfregamento di particelle di un materiale di elevata durezza e resistenza all'usura, più specificamente i grani diamantati, inserite su una matrice legante di durezza notevolmente inferiore, contro la superficie del materiale da lavorare (anch'esso di durezza piuttosto elevata)

Il processo di asportazione di materiale dipende sia dalle caratteristiche dell'utensile usato, quali forma, granulometria dell'abrasivo e materiale impiegato come legante, sia dalla cinematica e meccanica con cui esso avviene; è intuitivo infatti pensare ad una relazione con parametri come velocità di taglio, avanzamento, profondità di passata.

In considerazione di ciò, si possono osservare diversi stati d'usura dell'utensile diamantato, che verrà a dipendere, oltre che dalle caratteristiche costitutive e dai parametri appena citati, anche dal grado di "abrasività" della roccia.

In ogni caso il processo di usura dell'utensile diamantato può essere scisso nell'analisi di due fenomeni, in realtà contemporanei: l'usura del grano e l'usura della matrice legante.

Inoltre non si deve dimenticare che anche il liquido di raffreddamento, in combinazione con le minuscole particelle di materiale abraso durante il

processo, costituisce un agente erosivo soprattutto nei confronti della matrice legante.

Tutti questi meccanismi partecipano alla determinazione della risposta generale dell'utensile all'usura, ed inoltre influenzano direttamente i risultati del processo di taglio.

Si deve precisare che l'erosione provocata dalle particelle di materiale frantumato in fase di smaltimento dipende in gran parte dalla composizione della roccia lavorata.

Infatti rocce metamorfiche generano grani di dimensioni minori rispetto a quelli diamantati dell'utensile, mentre quelle sedimentarie formano dei detriti più grandi, a causa della loro granulometria più grossolana e delle forze di coesione dei grani cristallini nettamente inferiori. In quest'ultimo caso si genera un'usura del diamante trascurabile rispetto a quella del legante, che risulta invece molto consistente per via della grande abrasività del materiale.

#### A USURA DEL DIAMANTE

Le cause che fundamentalmente determinano il meccanismo di usura del grano diamantato sono quattro:

- usura adesiva: le sollecitazioni di taglio che nascono in seguito all'adesione del diamante alla roccia provocano il distacco di microscaglie dal grano;
- usura per attrito: particelle di roccia molto dure e molto piccole abradono la superficie del diamante trasportate dal liquido di raffreddamento
- usura per diffusione, causata da reazioni chimiche tra la superficie del materiale lapideo e quella del diamante, che viene da esse indebolito diminuendo la sua durezza
- frattura dei grani diamantati causata da sovraccarichi meccanici o termici e da fenomeni di fatica

L'usura adesiva e quella per diffusione non hanno un'incidenza significativa nella lavorazione delle pietre naturali, mentre alla riduzione nel tempo del volume del tagliente contribuiscono soprattutto la frattura del diamante e l'usura per attrito.

Anche la forma di un grano usurato dipende dalle modalità di taglio e dal materiale lavorato: per esempio, nel taglio in opposizione con l'applicazione di

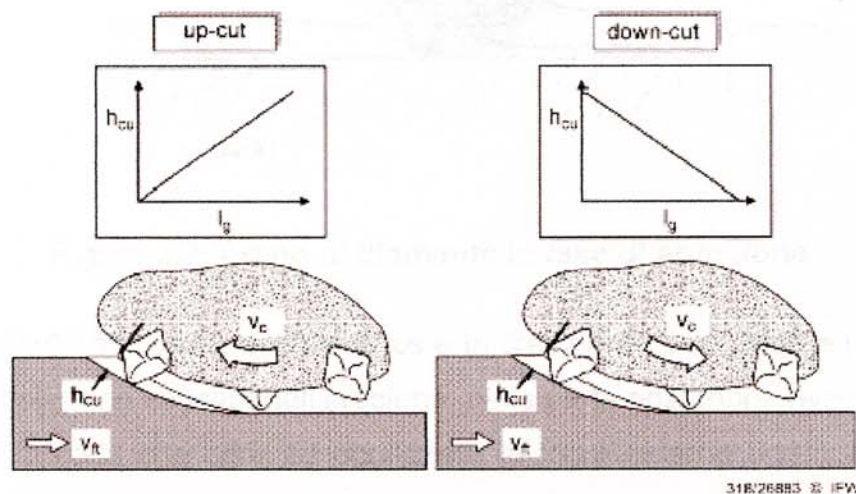


una modesta velocità di taglio, operando su una roccia piuttosto omogenea, il diamante si usurerà arrotondando progressivamente i suoi spigoli e appiattendendo la sua superficie.

Adottando invece un taglio in concordanza con elevata velocità di avanzamento per un materiale che presenti zone di elevata durezza, si otterrà, molto probabilmente, una frattura dei diamanti per sovraccarico da impatto.

Dunque l'osservazione di grani appiattiti e tondeggianti è testimonianza, oltre del fatto che la sollecitazione meccanica non è sufficientemente grande per generare fratture, ad esempio a causa di una velocità di taglio modesta, anche di alti carichi termici.

La frattura, invece, implica un impulso meccanico, trasmesso a causa di una superficie attiva del grano relativamente grande o di una velocità di taglio elevata.

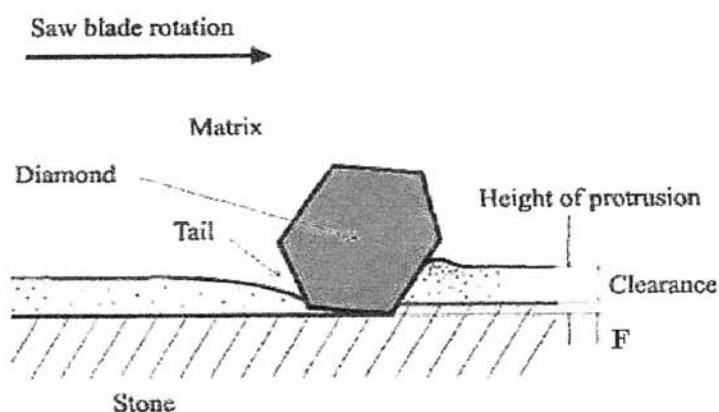


**Figura 3.1: spessore del truciolo generato da un singolo grano diamantato con taglio in opposizione ed in concordanza**

### B USURA DELLA MATRICE

L'erosione della matrice legante dell'utensile diamantato è, come detto, provocata essenzialmente dal liquido di raffreddamento della zona di taglio che trascina con sé particelle di roccia abrasiva.

Il materiale della matrice va scelto con attenzione in funzione del tipo materiale lapideo lavorato, altrimenti si potrebbe incappare in indesiderate conseguenze: nel caso in cui la matrice si usuri troppo rapidamente, le potenzialità del diamante non sono sfruttate appieno poiché questi viene espulso dalla matrice stessa prima di essersi consumato. Nella situazione opposta di un'usura più lenta della matrice rispetto a quella del diamante, lo spigolo tagliente si riduce progressivamente senza mostrare nuovi suoi tratti così che l'utensile perderà ben presto la sua capacità di abrasione.



**Figura 3.2: grano di diamante in fase di abrasione**

Una peculiarità dell'usura della matrice è la creazione di un cratere nella parte anteriore del grano causata dall'erosione; nella parte posteriore invece si forma una sorta di coda che oltre ad equilibrare le forze esterne agenti sul grano, impedisce che esso sia scalzato via.

### C INFLUENZA DEI PARAMETRI CINEMATICI E DI TAGLIO

Il pericolo di raggiungere temperature o carichi meccanici troppo elevati per il diamante costituisce un limite alla velocità di abrasione.

Quindi è importante considerare che il carico termico sulla sezione attiva del diamante aumenta sia al crescere della profondità di passata sia al crescere della velocità di taglio, mentre diminuisce all'aumentare dell'avanzamento.

Il massimo spessore del truciolo asportato dal singolo grano è ottenuto all'inizio del contatto con il materiale se si opera in concordanza, l'opposto avviene se si lavora in opposizione (vedi fig. 3.1); per questa modalità di taglio, nelle fasi

iniziali del contatto si ha soprattutto una deformazione elastica del materiale con il truciolo che aumenta progressivamente con il procedere del contatto tagliente-materiale, finché non viene raggiunto un suo valore critico oltre il quale ha inizio l'asportazione.

Queste considerazioni spiegano perché ci si aspettino caratteristiche diverse dell'usura a seconda che si operi in concordanza od in opposizione.

Durante la lavorazione in concordanza sul tagliente del grano, hanno luogo elevati impulsi meccanici e, in funzione del tipo di abrasivo e del legante, è più probabile che si verifichi la frattura o lo scalzamento del grano.

### **3.2 Approccio analitico all'usura dell'utensile diamantato**

Eseguita un'analisi generale del fenomeno dell'usura per gli utensili diamantati, è necessario approfondire l'argomento mediante un approccio analitico in grado di dar vita ad un modello che, considerando tutte le variabili in gioco, possa essere validato da evidenze empiriche e sperimentali; il che permetterebbe di formulare corrette previsioni per il maggior numero di casi pratici possibile.

Si è visto come il processo di usura della matrice legante sia importante quanto quello dei grani di diamante affinché l'utensile si mantenga efficace ed efficiente; è proprio dalla loro sincronizzazione, in funzione del materiale lapideo lavorato, che dipende la capacità dell'utensile stesso di mantenersi "aperto", ovvero con un numero di taglienti attivi in superficie sempre adeguato.

Per poter iniziare uno studio quantitativo del fenomeno, tale da permettere una corrispondenza tra risultati empirici e modello analitico, si ha bisogno di definire alcuni parametri che consentano una corretta ed univoca descrizione del fenomeno stesso.

A questo scopo, facendo riferimento ad un lavoro svolto dal prof. Di Ilio [3], sono stati definiti a proposito dell'usura dei taglienti diamantati i seguenti parametri:



- Wear Rate:  $WR$  [ $\mu m / \text{min}$ ] (Tasso di usura determinato come diminuzione della protrusione del grano abrasivo nel tempo);
- Grinding Ratio:  $G = \frac{\text{Volume}_{\text{rimosso}}}{\text{Volume}_{\text{usura}}} =$   

$$= \frac{\text{Velocità}_{\text{asportazione}}_{\text{per unità di larghezza}}}{n \cdot L \cdot WR}$$
 (ove  $n$  = numero di grani per unità di lunghezza e  $L$  = lunghezza del contatto roccia-utensile);
- Wear Performance :  $WP =$   

$$= \frac{\text{Velocità}_{\text{asportazione}}_{\text{per unità di larghezza}}}{WR} [m^2 / \mu m].$$

Ciascun grano abrasivo sporge dalla matrice per un'altezza "p" detta protrusione, variabile nel tempo, ed indenta nel materiale lapideo per una profondità F (vedi fig. 3.2).

La protrusione del grano varia in funzione della velocità di usura della matrice  $V_M$  e della velocità di usura del grano  $V_G$  (entrambe espresse in  $\mu m / \text{min}$  )

All'aumentare di p, la velocità di usura del grano aumenta mentre quella della matrice diminuisce.

Per poter definire le caratteristiche geometriche del grano si ricorre alla misura dell'ADPD (average diamond particle diameter) ovvero al diametro medio della particella di diamante ( $ADPD = V^{1/3}$  con  $V = 57 \text{ mm}^3 / \text{PPC}$  che rappresenta il volume medio dei grani,  $57 \text{ mm}^3$  è il volume di un carato e PPC, cioè le parti per carato, è la concentrazione di diamante), inoltre si considera il numero attivo dei grani costante nel tempo così da poter riferire il modello ad un unico grano e poi poter estendere i risultati all'intero utensile.

Da ciò deriva che p può variare da 0 ad un valore massimo pari a  $\frac{1}{2}$  ADPD.

Si può dunque scrivere l'equazione differenziale che governa il modello di usura formulato:

$$-\frac{dp(t)}{dt} = V_G[p(t)] - V_M[p(t)] \quad (*)$$

con  $0 < p < p_{\text{max}}$ .



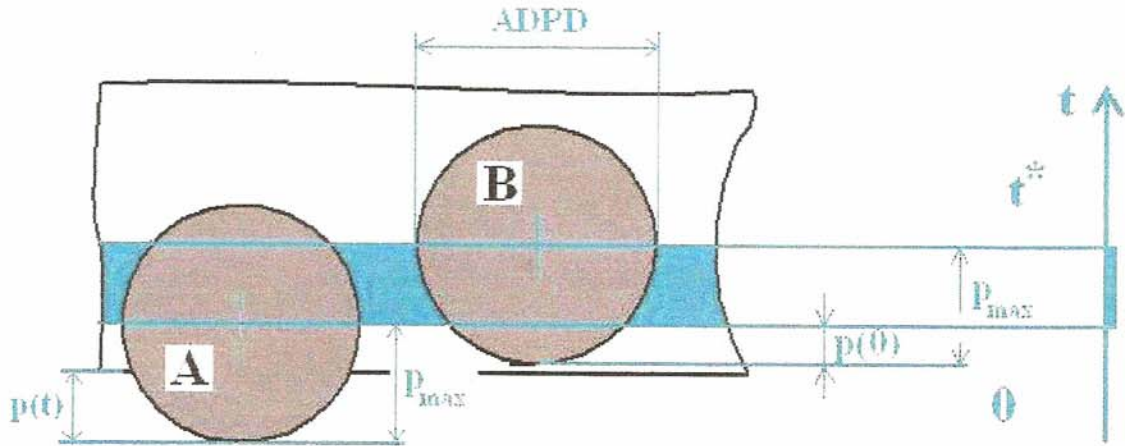


Figura 3.3: schema del modello di usura

Attraverso rilievi sperimentali si è potuto desumere l'andamento delle velocità di usura in funzione di  $p$ , che, con buona approssimazione, può essere considerato lineare.

L'espressione analitica delle velocità di usura di grano diamantato e matrice legante diventa:

$$V_G(t) = \frac{V_{G\_max}}{P_{max}} \cdot p(t) ;$$

$$V_M(t) = -\frac{V_{M\_max}}{P_{max}} \cdot p(t) + V_{M\_max} \cdot$$

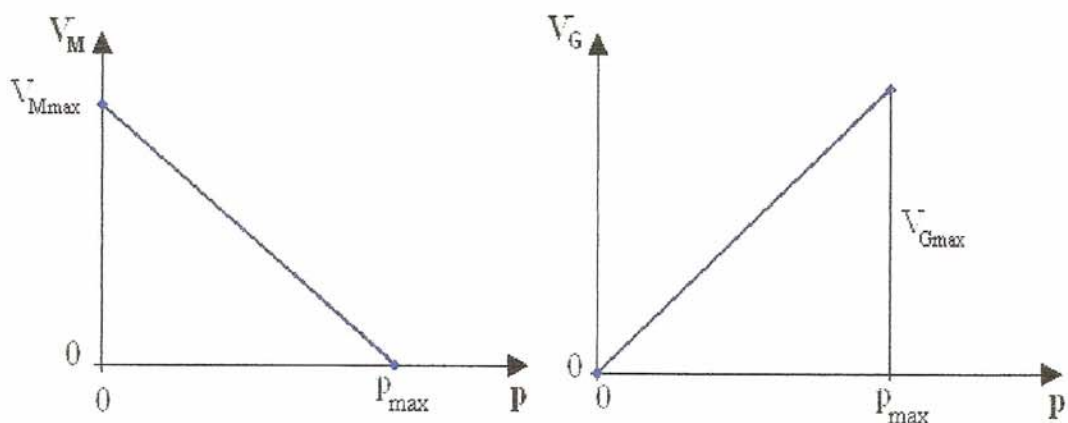


Figura 3.4: andamento della velocità di usura per matrice e grano diamantato

Andando a sostituire le espressioni di  $V_G(t)$  e  $V_M(t)$  nell'equazione (\*) ed integrando, si ottiene l'andamento di  $p$  nel tempo:

$$p(t) = \frac{V_{M \max} \times p_{\max}}{V_{M \max} + V_{G \max}} + \left[ p(0) - \frac{V_{M \max} \times p_{\max}}{V_{M \max} + V_{P \max}} \right] \times e^{\frac{V_{M \max} + V_{G \max}}{p_{\max}} \times t}$$

ove  $p(0)$  è il valore della protrusione di un grano all'istante  $t = 0$

Il comportamento dell'utensile nel tempo può quindi essere definito di "apertura" o di "chiusura" a seconda che abbia la tendenza a scoprire progressivamente il grano o veda, al contrario, diminuire la protrusione con l'avanzare dell'usura.

Si avrà chiusura dell'utensile se:

$$\frac{V_{M \max}}{V_{M \max} + V_{G \max}} < \frac{p(0)}{p_{\max}} ;$$

si avrà invece apertura se:

$$\frac{V_{M \max}}{V_{M \max} + V_{G \max}} > \frac{p(0)}{p_{\max}} .$$

La figura seguente illustra tali comportamenti attraverso l'andamento della funzione  $p(t)$ .

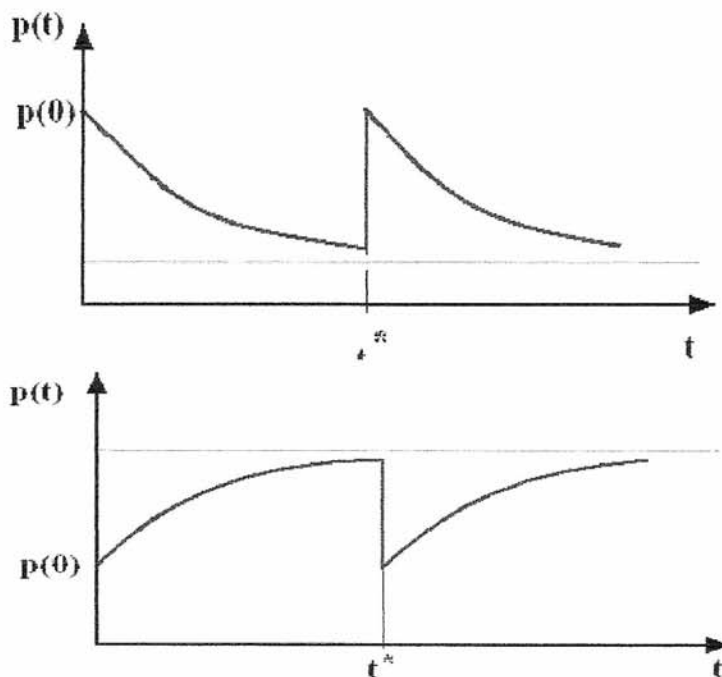


Figura 3.5: comportamenti di "chiusura" e di "apertura" dell'utensile

Il valore  $t^*$  è il tempo impiegato dal grano per passare da un valore della protrusione  $p(0)$  al valore di scalzamento  $p_{\max}$

Al modello fin qui illustrato è possibile apportare modifiche che facciano dipendere con maggior accuratezza i fenomeni descritti dai numerosi fattori.

Basti pensare quanti sono i fattori che influenzano sia  $V_M$  che  $V_G$ : durezza della matrice e del materiale, velocità di taglio, velocità di avanzamento e profondità di passata per  $V_M$ , densità dei grani nella matrice, durezza del grano e del materiale ed ancora i medesimi parametri di taglio per  $V_G$ . Tutte queste variabili nel modello sono racchiuse in soli due parametri.

Inoltre non si è tenuto conto del fatto che l'inserito diamantato può essere "inserito" nella matrice tramite elettrodeposizione o per sinterizzazione; sarebbe quindi utile introdurre un opportuno coefficiente che tenga conto del processo tecnologico di deposizione del diamante, visto che negli utensili con inserti elettrodeposti è presente un solo strato di grani taglienti per i quali, probabilmente, il campo di variazione di  $p(t)$  non ha gli stessi limiti.

Anche la forma dell'equazione della velocità di usura della matrice potrebbe essere variata, per mettere in luce che tale velocità non dipende semplicemente da  $p(t)$ , ma piuttosto da:

$$\text{Clearance} = p(t) - F \quad (\text{vedi fig 3.2})$$

Infatti la matrice viene erosa principalmente ad opera dei detriti di materiale lapideo allontanati dalla zona di taglio dal liquido di raffreddamento proprio attraverso questo spazio.

Questa modifica porterebbe ad una esplicita dipendenza della velocità di usura della matrice dalla profondità di passata:

$$F = p(t) - \text{Clearance}$$

e potrebbe scriversi, ad esempio:

$$V_M(t) = K_{a-m} (1-a \times \text{Clearance})$$

In cui  $K_{a-m}$  ed  $a$  sarebbero costanti della matrice.

Il miglioramento dei modelli analitici dei meccanismi di taglio e di usura sono tutt'oggi in fase di continuo sviluppo, e la macchina di prova presso il DIMNP è uno strumento importante per poter acquisire dati per nuove indagini e verifiche nel settore in cui si registra la minore incidenza di studi sperimentali, la tecnologia di taglio con perlina diamantata.

### **3.3 Meccanica della formazione del truciolo**

La formazione di truciolo può essere descritta come la "rottura", l'"interruzione" della continuità di un materiale tramite l'uso di un utensile.

Questo è vero per tutti i materiali. Per quanto riguarda in particolare i materiali lapidei, come detto in precedenza, la formazione di truciolo è essenzialmente un processo di abrasione.

La maggior parte dei modelli inerenti al fenomeno, basati su semplici geometrie di tagliente, dividono il processo di formazione del truciolo in due meccanismi (primario e secondario), mostrati in fig. 3.6.

Ambedue dipendono dalle proprietà fisiche della roccia, come durezza e resistenza a compressione, dalle forze scambiate tra diamante e materiale, dalla distribuzione delle tensioni nella roccia e dalle temperature all'interfaccia pezzo-utensile.

Il meccanismo di taglio di materiali lapidei (marmo in particolare) è stato spiegato come una deformazione plastica (nella zona compressa) e come una rottura fragile della roccia.

Sia la deformazione plastica che quella a rottura sono influenzate da parametri di taglio quali profondità di passata, forma dell'estremità del tagliente e dalle proprietà del materiale di lavoro.

Nel caso di taglio con utensili diamantati, l'interazione meccanica tra l'utensile stesso ed il pezzo è il risultato di forze "in process", principalmente causate dai seguenti fattori: deformazione elastica e plastica del pezzo ad opera dei taglienti; l'attrito tra la roccia e la matrice legante; l'attrito tra la roccia ed il



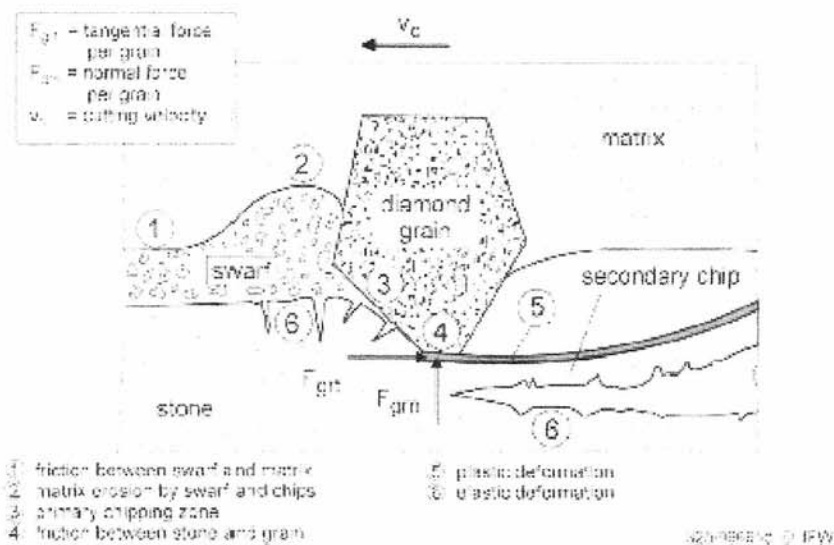
diamante; l'attrito tra il materiale frantumato da smaltire (attraverso il liquido di raffreddamento) e la matrice.

Nella zona anteriore al singolo grano le tensioni sono indotte da forze tangenziali.

Qui si ha lo sviluppo di particelle di materiale frantumato grazie a tali tensioni sia di trazione che di compressione; questo è il meccanismo primario di formazione del truciolo, il quale viene poi forzatamente rimosso attraverso i solchi creati davanti e tutt'intorno al grano.

Sebbene la roccia mostri un comportamento elastico fino al conseguimento della tensione di rottura, è necessario per il taglio raggiungere uno spessore minimo di molatura.

Il materiale per poter essere tagliato, è deformato da tensioni di compressione esercitate nella zona sottostante al grano diamantato. Nel momento in cui il carico è rimosso, un ritorno elastico induce tensioni di trazione che raggiungono valori critici per il materiale generando frattura fragile; in questo modo si compie il secondo meccanismo di formazione del truciolo.



**Figura 3.6: interazione meccanica tra grano diamantato e pezzo durante il taglio**

Durante tutto il processo di taglio il liquido di raffreddamento ha il compito di rimuovere il materiale frantumato dalla zona di taglio.

Le forze e l'energia di taglio giocano un ruolo importante in tutti i processi di lavorazione dei materiali lapidei. Esse sono funzione del massimo spessore del truciolo e della sua geometria.

Diverse forme di truciolo stanno a significare comportamenti differenti durante il taglio.

La geometria del truciolo è caratterizzata da due parametri fondamentali, il suo spessore massimo e la sua lunghezza.

Si può assumere che la forza di taglio media agente su un grano di diamante sia proporzionale al massimo spessore del truciolo, di conseguenza diventa importante la determinazione di tale parametro.

La forza totale di taglio può essere considerata la somma delle singole forze agenti sui grani diamantati.

### **3.4 Modello sperimentale per l'analisi delle forze di taglio su un singolo grano diamantato**

Il taglio, con metodi convenzionali, di materiali lapidei è, come detto in precedenza, il risultato di un'interferenza sull'interfaccia roccia-utensile.

Questa interazione si realizza attraverso il contatto delle sporgenze dei singoli grani diamantati e tramite il continuo scorrimento della superficie sia della matrice legante che del diamante, sulla roccia e sulle particelle di materiale già asportato.

Per meglio interpretare il fenomeno, è chiaro come ci sia bisogno di un modello sperimentale che, considerando tutte le variabili in gioco, possa correlare alla realtà, per la maggior parte delle situazioni di lavoro attuabili, quanto analiticamente previsto.

Nel corso degli anni sono stati creati diversi modelli empirici, che, soprattutto grazie allo sviluppo delle tecnologie adottate, hanno compiuto costanti miglioramenti.

E' di recente sviluppo un particolare modello [16], elaborato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Cassino dai

professori Carrino L., Polini W. e Turchetta S., nel quale si analizza il comportamento di un singolo grano diamantato in fase di taglio.

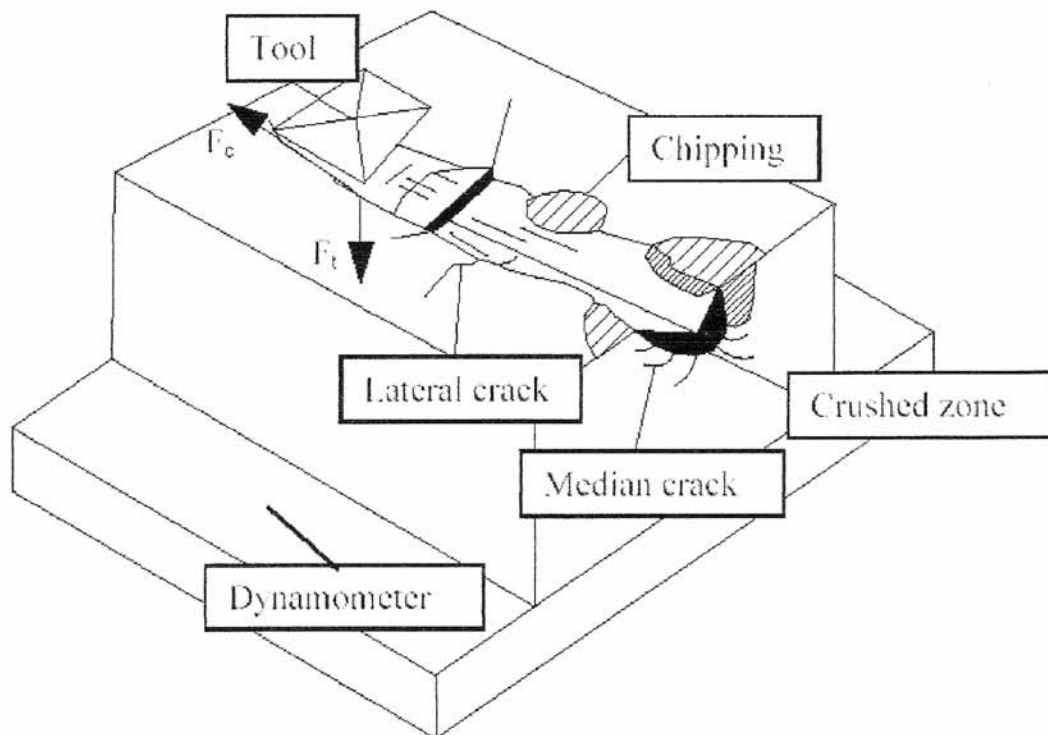
Il fine principale è quello di studiare la relazione esistente tra le forze di taglio, date appunto da un solo grano diamantato, e tutti gli altri parametri di processo per differenti condizioni operative.

E' stata condotta una serie di test utilizzando un utensile montato su un centro di lavoro a controllo numerico. Questo utensile altro non è che un inserto diamantato, ottenuto tramite un processo di deposizione di vapori chimici su una placchetta in carburi sinterizzati. L'inserto è poi fissato ad uno stelo.

Sono stati presi in considerazione due valori dell'angolo di inclinazione degli spigoli della piramide costituente la punta del grano, rispettivamente  $-20^\circ$  e  $-40^\circ$ ; questi erano i valori osservabili mediante microscopio a scansione su un campione di grani prelevato dalla superficie di una fresa per lavorazione di pietre naturali.

Queste due sono state le tipologie di utensile usate per la simulazione dei fenomeni di "rottura" tra grano e roccia durante il taglio.

Il materiale fin ora testato, è stato un marmo in particolare: il Perlato di Coreno.



**Figura 3.7: schema di taglio per un singolo grano diamantato**

L'esecuzione dei test sperimentali è stata effettuata con tre diversi valori della velocità di taglio (10 m/min, 20 m/min e 30 m/min) e per un range della profondità di passata compreso tra 0,008 mm e 0,18 mm.

Sono state portate a termine complessivamente 90 prove.

Poiché il centro di lavoro disponibile non aveva una buona ripetibilità per la profondità di passata in due test consecutivi, non sono state eseguite prove ripetute (cioè, con i medesimi parametri di taglio).

Tutte le variabili di processo utilizzate sono state scelte in modo da riprodurre al meglio le condizioni di taglio più comunemente usate nella prassi industriale.

I test sono stati condotti con una sequenza del tutto casuale, così da ridurre gli effetti di ogni errore sistematico possibile.

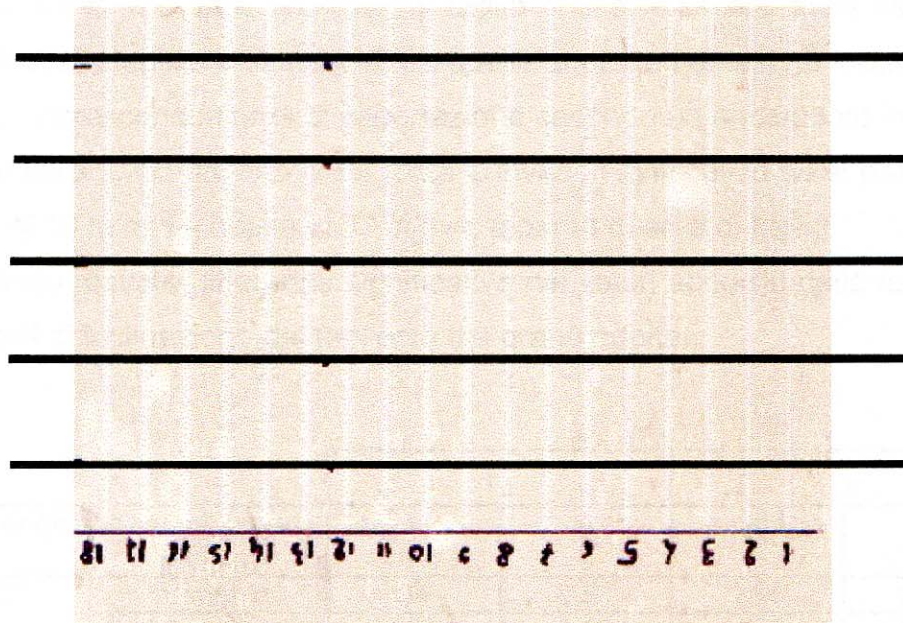
Non è stato usato liquido di raffreddamento, in quanto esso avrebbe alterato i dati rilevati dal dinamometro.

La forza di taglio  $F_c$  (vedi fig. 3.7) lungo la direzione in cui avviene il taglio stesso, e la forza  $F_t$  ad essa perpendicolare, sono state misurate in ogni singola sperimentazione da una piattaforma dinamometria piezoelettrica Klister 9257 BA.

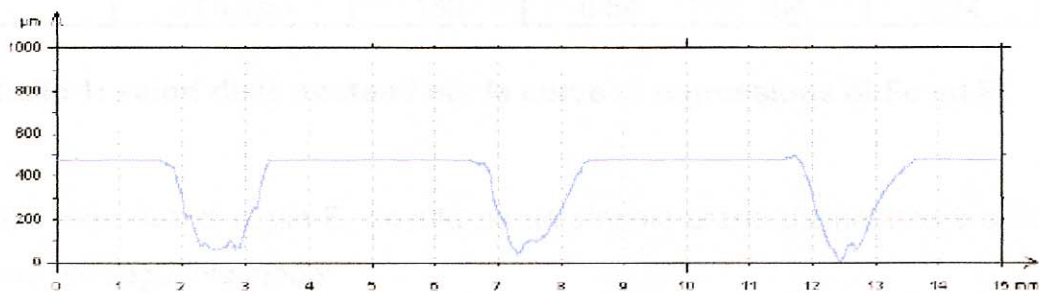
Gli output dal dinamometro sono stati inviati ad un convertitore A/D e campionati ad alta frequenza tramite PC; di seguito i segnali registrati dal PC sono stati filtrati a bassa frequenza con il software Matlab.

I solchi ottenuti nel processo di taglio sono stati osservati tramite un microscopio ottico Leica e poi misurati con un profilometro in 5 posizioni distribuite in modo uniforme lungo la lunghezza di ogni traccia (vedi fig. 3.8). Si è potuto così conoscere l'entità della profondità, della larghezza e dell'area di tutti i solchi, come possibile vedere dall'esempio di rilievo riportato in fig. 3.9.





**Figura 3.8: sistema di misura dei solchi di taglio**



**Figura 3.9: esempio di rilievo del profilo dei solchi dati da 3 grani diamantati**

I valori misurati delle due componenti  $F_c$  ed  $F_t$  della forza di taglio per le due diverse inclinazioni degli spigoli taglienti del grano, sono stati rielaborati ottenendo così curve di regressione. Un unico modello sembrava essere adatto per descrivere l'andamento della forza di taglio in funzione dell'area asportata  $S$ :

$$F_X = k \cdot S^n$$

Dove  $X$  sta per  $c$  o  $t$ , mentre  $K$  ed  $n$  sono due costanti i cui valori sono riportati nella tabella 1 per tutte le combinazioni di parametri sperimentalmente testate.

Le figure da 3.10 a 3.13 riportano le curve di regressione assieme ai dati rilevati, per i due differenti angoli di inclinazione già citati. Il valore della forza

aumenta sia al crescere dell'area di taglio che al crescere della velocità di taglio. Inoltre, stabilita una velocità tra quelle adottate nei test, la forza di taglio aumenta accrescendo l'area di asportazione secondo un andamento inferiore a quello lineare. L'incremento della forza è invece significativo se si passa dalla velocità di 10 m/min a quella di 30 m/min, a parità di area di taglio.

Non si sono rilevate differenze significative nei valori acquisiti della forza per i due angoli di inclinazione del tagliente del grano adottati.

Rake angle	Cutting speed [m/min]	$F_c$		$F_t$	
		k	n	k	n
-40°	10 m/min	94	0.51	264	0.63
	20 m/min	121	0.52	445	0.67
	30 m/min	154	0.52	455	0.59
-20°	10 m/min	82.2	0.43	180	0.46
	20 m/min	147	0.68	489	0.60
	30 m/min	186	0.54	754	0.74

**Tabella 1: valori delle costanti per le curve di regressione di  $F_c$  ed  $F_t$**

L'energia specifica di taglio  $E_c$  dovuta ad un singolo grano diamantato è stata calcolata nel seguente modo:

$$E_c = \frac{F_c}{S}$$

L'energia specifica di taglio dipende dalla profondità di passata secondo la seguente relazione:

$$E_c = K_1 \cdot d_p^{n_1}$$

Dove  $K_1$  ed  $n_1$  sono due costanti il cui valore è riportato nella tabella 2 per le diverse condizioni di prova assunte nei test. Le figure 3.14 e 3.15 riportano le curve di regressione dell'energia specifica di taglio in funzione della profondità di passata assieme ai valori sperimentali registrati, per i due soliti angoli di inclinazione.

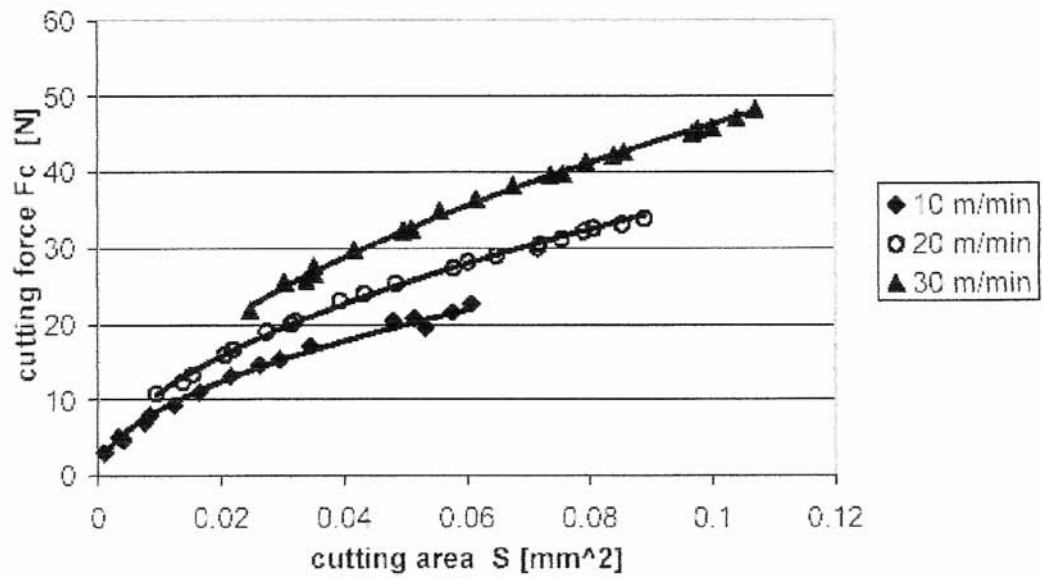


Figura 3.10: andamento della forza  $F_c$  in funzione dell'area di taglio per differenti valori della velocità (angolo di inclinazione  $-40^\circ$ )

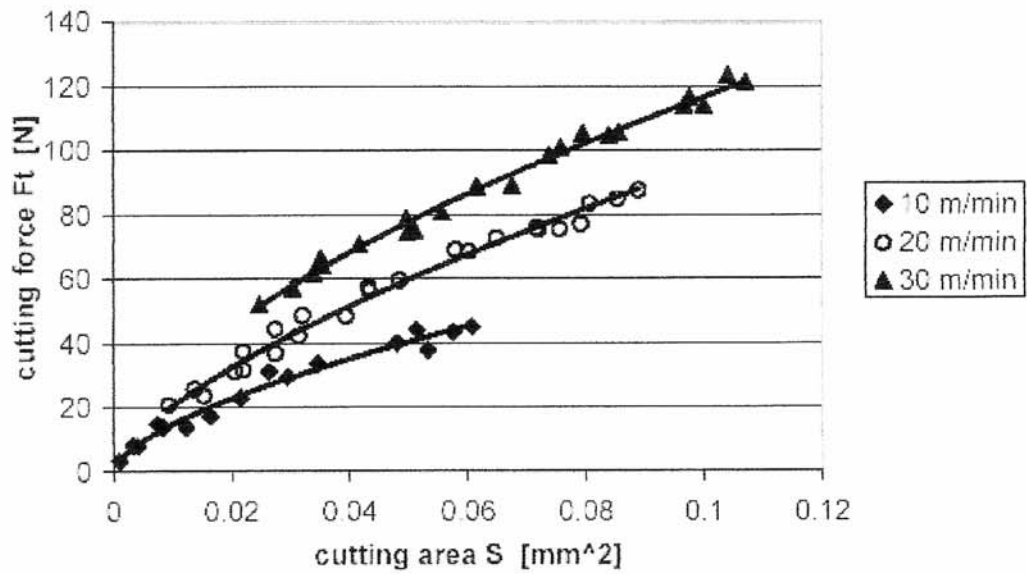


Figura 3.11: andamento della forza  $F_t$  in funzione dell'area di taglio per differenti valori della velocità (angolo di inclinazione  $-40^\circ$ )

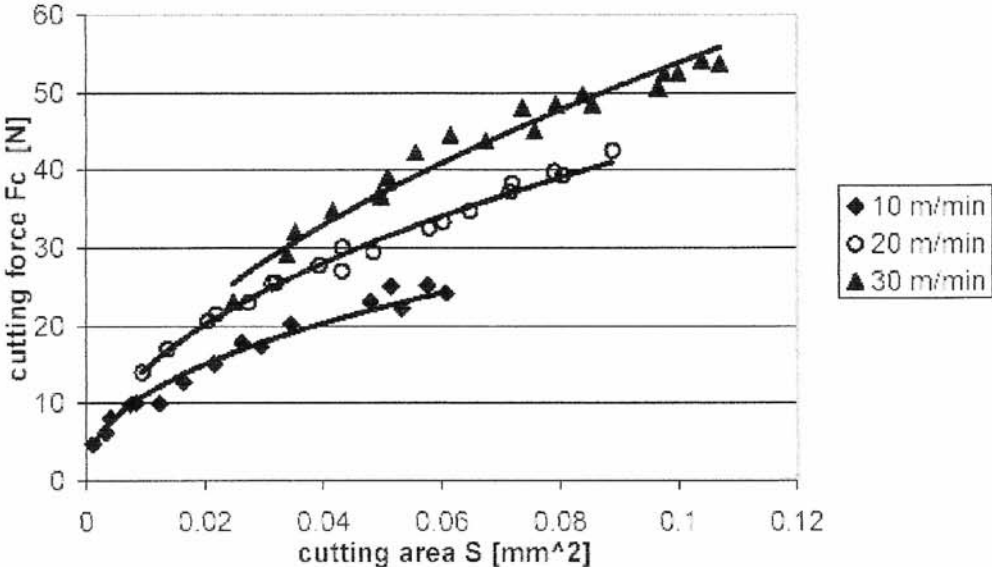


Figura 3.12: andamento della forza  $F_c$  in funzione dell'area di taglio per differenti valori della velocità (angolo di inclinazione  $-20^\circ$ )

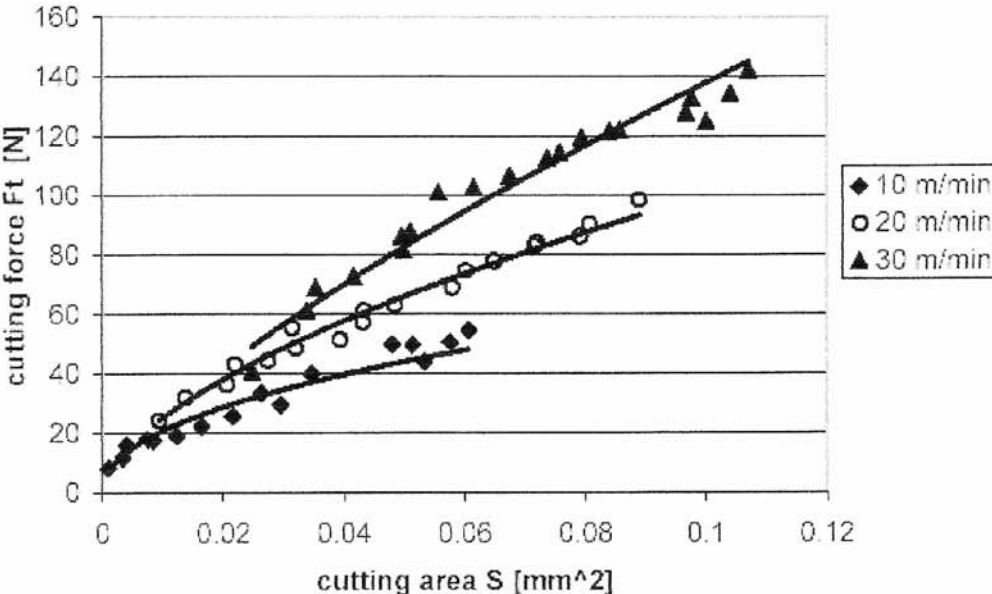
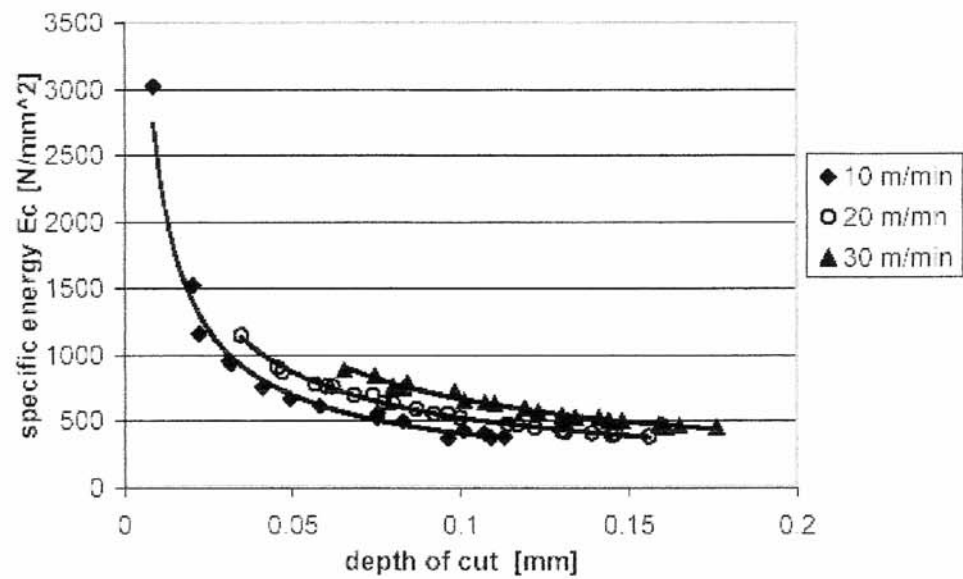
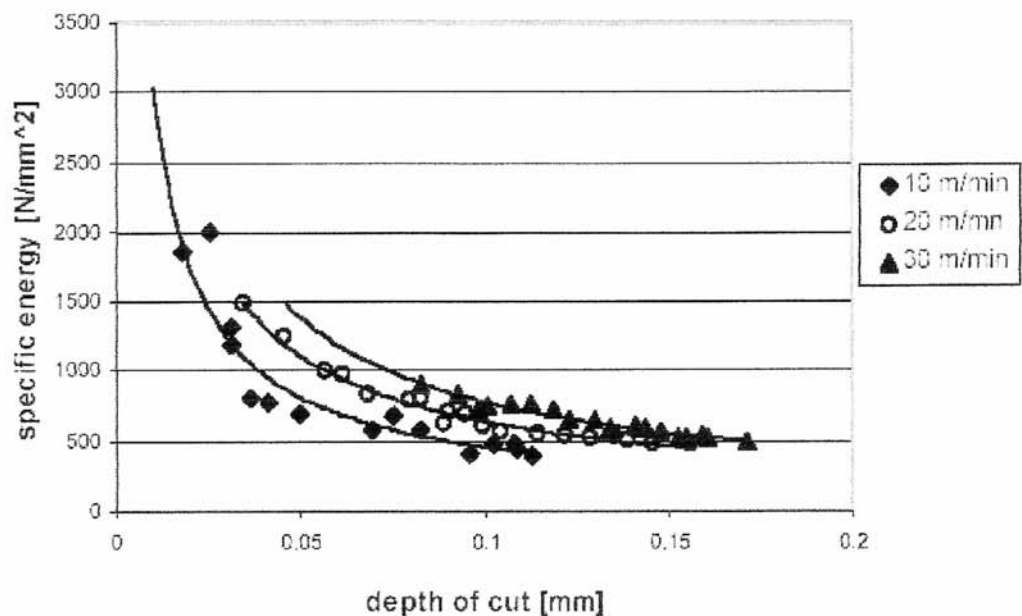


Figura 3.13: andamento della forza  $F_t$  in funzione dell'area di taglio per differenti valori della velocità (angolo di inclinazione  $-20^\circ$ )





**Figura 3.14:** andamento dell'energia specifica di taglio  $E_c$  in funzione della profondità di passata per differenti valori della velocità (angolo di inclinazione  $-40^\circ$ )



**Figura 3.15:** andamento dell'energia specifica di taglio  $E_c$  in funzione della profondità di passata per differenti valori della velocità (angolo di inclinazione  $-20^\circ$ )

Rake angle	Cutting speed [m/min]	$E_c$	
		k	n
-40°	10 m/min	69.5	-0.78
	20 m/min	97.3	-0.73
	30 m/min	121	-0.74
-20°	10 m/min	60.1	-0.92
	20 m/min	105	-0.79
	30 m/min	116	-0.82

**Tabella 2: valori delle costanti per le curve di regressione di  $E_c$**

Una volta fissato un valore della velocità tra quelli plausibili, si nota come l'energia specifica di taglio decresca all'aumentare della profondità di passata con un andamento inferiore a quello lineare, mentre aumenta quando la velocità passa da 10 m/min a 30 m/min per un valore della profondità di passata stabilito.

Non si rilevano invece differenze degne di nota, adottando grani con diversi angoli di inclinazione degli spigoli taglienti.

Si precisa che tutti i coefficienti ottenuti per la determinazione delle curve di regressione valutate, sono significativi in percentuali maggiori del 95%.

Si è voluto descrivere questo interessante modello sperimentale in quanto si ritiene che con diversi adattamenti, potrebbe essere in futuro applicato per un'analisi a livello microscopico dei fenomeni presenti sui grani delle perline diamante testate sulla macchina oggetto di questo lavoro di tesi.

Ad oggi non è stato ancora pensato di poter eseguire prove su una perlina portante un solo inserto diamantato, e, data la cinematica di taglio adottata sull'apparecchiatura di prova, lo si ritiene piuttosto improbabile nell'immediato futuro; tuttavia, effettuando una stima del numero dei grani contemporaneamente in presa sull'arco dei contatti pezzo-perlina e, sfruttando il grosso vantaggio che nel nostro caso la forza di taglio totale è nota (in quanto preimpostata dall'esterno), si potrebbe risalire ugualmente al valore della forza

agente su di un singolo grano diamantato anche per l'attuale modalità di funzionamento.

Non sarebbe invece molto semplice, per non dire impossibile, trovare il modo di pervenire all'area di taglio dei solchi lasciati dal grano in lavorazione; diversamente risulterebbe molto più agevole effettuare una correlazione tra l'avanzamento "radiale" sul disco lapideo ad ogni suo giro, con quella che nel modello trattato è la profondità di passata. Anche tra le velocità di taglio adottate nel piano di sperimentazione dell'Università di Cassino e quelle impostabili sulla "nostra" apparecchiatura, si dovrebbe trovare una opportuna corrispondenza, essendo le ultime molto maggiori rispetto alle prime.

Con queste operazioni, oltre a fornire un'ulteriore validazione di questo modello sperimentale, si creerebbe un sua prima applicazione ad un utensile effettivamente usato nella realtà, che è poi ciò che in realtà interessa a coloro che operano nel settore del taglio e della lavorazione dei materiali lapidei.

## CAPITOLO 4

### DINAMICA E CINEMATICA DELLE OPERAZIONI DI TAGLIO SVOLTE SULL'APPARECCHIATURA DI PROVA

#### 4.1 Forze agenti sulla singola perlina diamantata nelle reali operazioni di taglio

Prima di effettuare test di taglio sull'apparecchiatura di prova, era evidentemente necessario determinare il range dei valori della forza di contatto perlina-disco lapideo e della velocità relativa di taglio, che potessero, nel contesto di un preciso piano di sperimentazione, far sì che i risultati ottenuti fossero correlabili in modo effettivo alle reali lavorazioni di taglio.

In quest'ottica si è condotto uno studio teorico per determinare l'andamento delle tensioni sul filo diamantato e la conseguente forza risultante agente sulla singola perlina durante le operazioni di taglio.

Affinché il filo possa asportare materiale, deve essere teso e portato in rotazione ad alta velocità dal volano della tagliatrice.

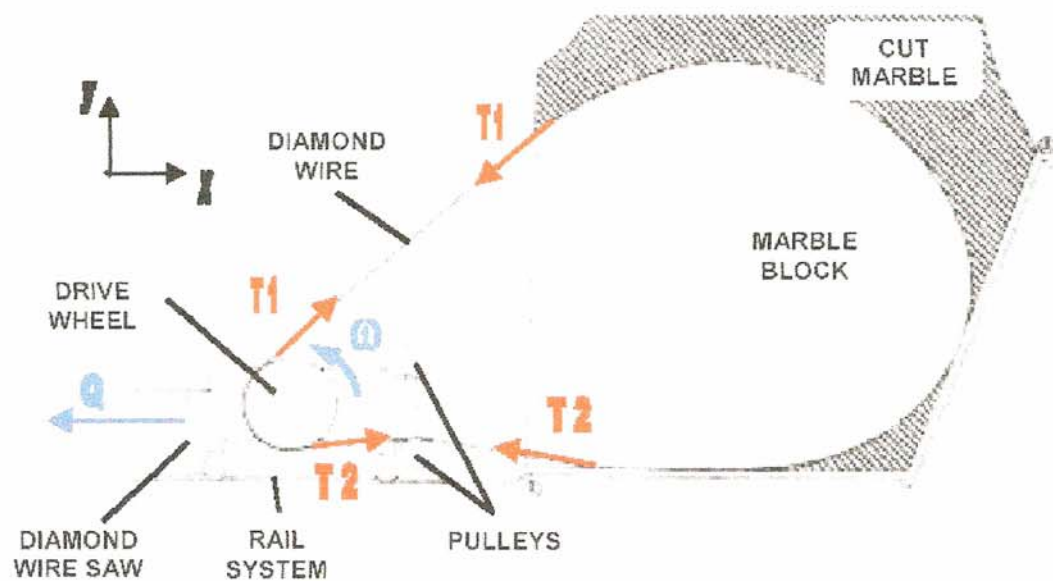
Il tensionamento del filo diamantato è ottenuto grazie al motovariariduttore presente sulla tagliatrice, il quale consente, durante il taglio, tramite un meccanismo pignone-cremagliera, lo scorrimento della macchina su appositi binari. Ciò fa sì che il "tiro"  $Q$  (vedi fig. 4.1) sia mantenuto costante fino al termine dell'operazione.

Il meccanismo di trasmissione del moto dalla puleggia, sulla cui scanalatura circonferenziale (rivestita in gomma vulkollan) è fatto passare il filo diamantato, al filo stesso, è assimilabile alla trasmissione a cinghia (anche se in questo caso non è un secondo volano ad usufruire di questa trasmissione).



Infatti, affinché si possa trasferire potenza (necessaria per il taglio del materiale lapideo), è necessario che nei due rami del filo diamantato, così come in quelli di una cinghia, si sviluppino forze di trazione diverse.

Nei due rami del filo possono nascere due forze diverse solo se si sviluppano azioni tangenziali di attrito; infatti, nel passaggio da un ramo all'altro un generico tratto di filo diamantato si allunga e si accorcia determinando così le forze di attrito tra di esso e la puleggia (o meglio il rivestimento della sua gola)



**Figura 4.1: schema delle forze agenti sul filo diamantato duante il taglio**

Il momento motore può essere calcolato scrivendo l'equilibrio alla rotazione della puleggia conduttrice:

$$M_m = (T_1 - T_2) \cdot r_p$$

dove  $M_m$  è appunto il momento motore,  $T_1$  e  $T_2$  sono, come visibile in fig. 4.1, le tensioni rispettivamente su ramo superiore ed inferiore del filo, ed  $r_p$  è il raggio del volano della tagliatrice.

Le stesse  $T_1$  e  $T_2$  mettono in tensione il filo in ingresso ed uscita del blocco da tagliare e per l'equilibrio devono rispettare la seguente relazione:

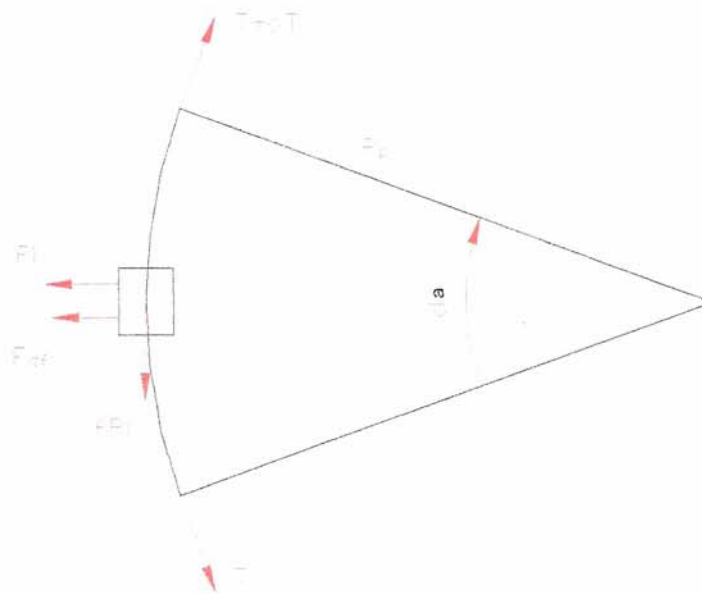
$$M_r = (T_1 - T_2) \cdot r_b$$

dove  $M_r$  è il momento resistente dovuto allo sforzo di taglio e allo sforzo di attrito, mentre  $r_b$  è il raggio di curvatura del filo avvolto sul blocco (si adotterà un

valor medio non avendo una circonferenza perfetta, il cui valore varia chiaramente andando avanti col taglio).

Tutta la trattazione di seguito riportata si basa sull'ipotesi forte e di fondamentale importanza che la legge di variazione della tensione del filo dal ramo superiore a quello inferiore sia, perlomeno in prima approssimazione, dello stesso tipo sia lungo l'arco in presa sulla puleggia che su quello in presa sulla roccia.

Consideriamo un tratto di filo sull'arco di aderenza con il volano, e prendiamone un elemento infinitesimo  $d\alpha$ ; su di esso agiranno le forze riportate nella seguente figura.



**Figura 4.2: forze agenti su un tratto infinitesimo di filo diamantato portato in rotazione dal volano della tagliatrice**

Dove si è indicato con:

- $T$  e  $T+dT$  sono le forze trasmesse all'elemento dai tratti ad esso adiacenti
- $F_{cf}$  è la forza centrifuga sull'elemento; sarà  $F_{cf} = m \cdot v^2 \cdot d\alpha$  dove  $m$  è la massa per unità di lunghezza e  $v$  è la velocità del filo
- $R_i$  è la reazione del volano sul filo; sarà  $R_i = p \cdot r_p \cdot d\alpha$  dove  $p$  è la componente normale della forza per unità di lunghezza. Questa reazione

genera, a causa dell'attrito (indichiamo con  $f$  il coefficiente di attrito), una componente tangenziale al filo che varrà  $f \cdot p \cdot r_p \cdot d\alpha$ .

La condizione di equilibrio dell'elemento alla traslazione radiale è:

$$T \sin(d\alpha/2) + (T+dT) \sin(d\alpha/2) = p \cdot r_p \cdot d\alpha + m \cdot v^2 \cdot d\alpha.$$

Per l'equilibrio alla traslazione secondo la direzione perpendicolare alla precedente si ha poi:

$$-T \cos(d\alpha/2) + (T+dT) \cos(d\alpha/2) = f \cdot p \cdot r_p \cdot d\alpha.$$

Eliminando gli infinitesimi di ordine superiore al primo, le equazioni precedenti divengono:

$$T = p \cdot r_p + m \cdot v^2$$

$$dT = f \cdot p \cdot r_p \cdot d\alpha.$$

Si ha cioè:

$$dT = f \cdot (T - m \cdot v^2) \cdot d\alpha \quad (*)$$

equazione differenziale che permette di trovare l'andamento della forza di trazione lungo l'arco di contatto fra filo e puleggia.

Separando le variabili la (\*) diviene:

$$\frac{dT}{T - m \cdot v^2} = f d\alpha.$$

Da questa integrando si ottiene:

$$T - m \cdot v^2 = C \cdot e^{f\alpha} \quad (**)$$

dove  $C$  è una costante.

Ipotizziamo che la (\*\*) valga su tutto l'arco di contatto, anche se non sarebbe del tutto vera nei brevi tratti in cui si ha aderenza e non strisciamento.

Possiamo calcolare la costante  $C$  ponendo che per  $\alpha = 0$  sia  $T = T_2$ . Allora si ha:

$$T_2 - m \cdot v^2 = C,$$

ossia

$$T - m \cdot v^2 = (T_2 - m \cdot v^2) \cdot e^{f\alpha}.$$

Se indichiamo con  $\alpha_2$  l'angolo di avvolgimento del filo sul volano si ha:

$$T_1 - m \cdot v^2 = (T_2 - m \cdot v^2) \cdot e^{f\alpha_2},$$

e finalmente otteniamo la relazione cercata.

L'andamento ottenuto è esponenziale decrescente da  $T_1$  a  $T_2$  (si tenga presente che nella realtà dei fatti  $T_1$  è molto maggiore di  $T_2$ , che al limite può essere considerata nulla).

Imponiamo ora, come già detto, che la legge di variazione della tensione tra ingresso uscita dal blocco sia, approssimativamente, un'esponenziale decrescente analoga a quella sopra trovata.

E' possibile quindi determinare la forza specifica con cui una singola perlina preme sulla roccia.

Prendiamo in considerazione un tratto di filo che contenga una sola perlina (la  $i$ -esima); riprendendo l'equazione di equilibrio radiale, se si approssima  $\sin \alpha$  con  $\alpha$  dato il suo valore molto piccolo e si trascurano gli infinitesimi di ordine superiore al primo, si ottiene:

$$2T_i \cdot (\alpha/2) - F_{cf} = R_i.$$

La forza specifica  $P_i$  esercitata dalla singola perlina sul materiale avrà medesimo modulo e stessa direzione di  $R_i$ , ma verso opposto, quindi:

$$P_i = 2T_i \cdot (\alpha/2) - F_{cf},$$

oppure in altra forma:

$$P_i = T_i \cdot (S/r_{bi}) - F_{cf},$$

dove  $S$  è il passo tra due perline.

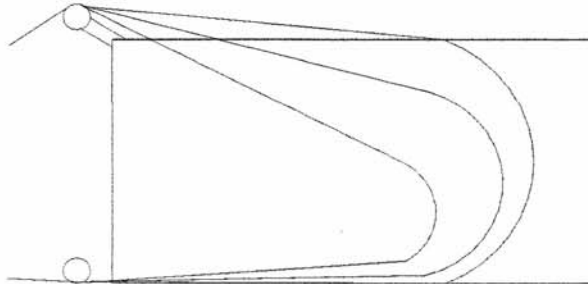
Ipotizzando di trascurare le variazioni di forma del filo durante il taglio (presenti nella realtà), dipendendo  $P_i$  direttamente da  $T_i$ , si può assumere anche per essa un andamento esponenziale decrescente dall'ingresso all'uscita del filo. Si deve notare che per l'arco di filo in presa sul blocco, la forza localmente tangenziale ad esso, proporzionale alla  $P_i$ , è la risultante di una forza d'attrito e dello sforzo di taglio esercitato dal diamante sul materiale.

Durante l'asportazione il filo tende a scaricarsi, quindi la  $P_i$  cala, con essa diminuisce  $M_r$  e così la potenza elettrica assorbita dalla tagliatrice. Al di sotto di un certo valore interviene il meccanismo di arretramento della macchina, il che permette di ripristinare la tensione iniziale del filo  $Q$ ; la  $P_i$  aumenta e di conseguenza anche la potenza assorbita fino ad un valore massimo impostato.

Dalle relazioni sopra trovate, si possono trarre alcune significative considerazioni: nella parte alta del blocco le perline diamantate presentano una



forza specifica di contatto  $P_i$  superiore a quella che hanno quando si trovano nella parte bassa, quindi si assiste ad un'asportazione del materiale maggiore nella zona più alta del blocco. Questo provoca una forma asimmetrica del taglio.



**Figura 4.3: avanzamento asimmetrico del taglio con filo diamantato**

Come abbiamo detto, la forza tangenziale resistente è composta dalla reazione allo sforzo di taglio e dalla forza di attrito; per una perline (elettrodeposta) nuova, i grani diamantati presentano superfici di taglio ben affilate e protrusioni sufficientemente grandi, quindi la forza di taglio sarà piuttosto rilevante e di conseguenza anche la velocità di asportazione sarà alta. Al momento in cui il grano, a causa dell'usura, inizia a presentare forme tondeggianti e dimensioni della protrusione ridotte, la forza di taglio diminuisce, mentre si fa sempre più rilevante la componente dovuta all'attrito. A parità di potenza assorbita e numero di perline in presa, è proprio la quantità di materiale asportato nell'unità di tempo che ci rivela lo stato di usura dell'utensile.

Per aumentare la forza  $P_i$  sarebbe opportuno ridurre il numero di perle per metro di filo, ma ciò comporterebbe evidentemente una loro usura più rapida.

## 4.2 Dalla cava al laboratorio: determinazione delle forze di contatto perlina-campione lapideo e delle velocità relative di taglio con cui eseguire i test sull'apparecchiatura di prova

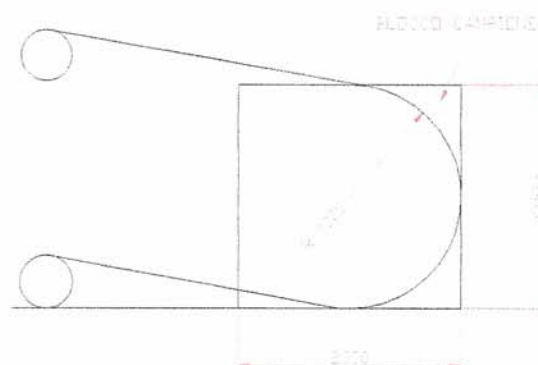
Una volta trovata la legge teorica che regola l'andamento delle tensioni nel filo diamantato in fase di asportazione e la conseguente espressione della forza specifica di contatto tra la singola perlina ed il materiale, è ora necessario determinare numericamente un range di valori della stessa forza che potesse essere implementato sull'apparecchiatura di prova per una veritiera simulazione delle operazioni di taglio.

Ricordiamo che la formula per la forza specifica di contatto è:

$$P_i = 2T_i \cdot (\alpha/2) - F_{cf}$$

Considerando che mediamente per un metro di filo si hanno 30 perline diamantate (30 ÷ 40 per fili usati nel taglio dei marmi, 20 ÷ 30 per quelli usati nel taglio dei graniti), si avrà una perlina ogni 1/30 di metro ovvero ogni circa 3,3 cm (passo S)

Nell'ipotesi di dover lavorare un blocco con sezione 2 × 2 metri (dimensioni più o meno standard) e che l'arco dei contatti filo-materiale sia, in un determinato istante, all'incirca una semicirconferenza (che avrà di conseguenza raggio R = 1 m e lunghezza L = π R = 3,14 m), si va a calcolare l'entità della forza centrifuga agente su un tratto di filo della lunghezza del passo, la cui risultante è ritenuta applicata alla perlina.



**Figura 4.4: dimensioni adottate per il blocco campione**

$$\text{Sarà : } F_{cf} = (\rho \cdot \pi r^2 \cdot S) \cdot (v^2/R)$$

dove si assume :

$$\rho = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3;$$

$r = 5 \text{ mm}$ ;  $r$  è un valor medio che tiene conto sia del fatto che il diametro del cavo d'acciaio su cui sono infilate perline, molle e distanziali è di 5 mm, sia delle dimensioni radiali di questi tre stessi componenti;

$v = 40 \text{ m/s}$ ; quella scelta per il nostro calcolo è la massima velocità di taglio consentita dalle norme di sicurezza adottate in Italia (generalmente si adottano velocità del filo comprese tra 30 e 40 m/s per il taglio dei marmi e tra 20 e 30 m/s per il taglio di granito);

$S$  ed  $R$  sono quelli riportati in precedenza.

Con questi valori risulta la seguente forza centrifuga:

$$F_{cf} = (7,8 \cdot 10^{-6} \cdot \pi 5^2 \cdot 33,3) \cdot ((40 \cdot 10^3)^2 / 10^3) = 32640 \text{ kg(mm/s}^2) \approx 32,5 \text{ N}$$

Le tensioni imposte al filo diamantato dalla tagliatrice possono di norma variare in un range compreso tra 0 e 300 kg.

Volendo valutare la massima forza specifica di contatto, si deve considerare la prima perlina nella parte alta del blocco, sulla quale agisce appunto la tensione del filo più elevata.

Calcoliamo l'angolo  $\alpha$  con la seguente proporzione:

$$S : \alpha = \pi r : 180^\circ, \text{ quindi}$$

$$\alpha = (180^\circ \cdot S) / \pi r = (180 \cdot 0,033) / (3,14) \approx 1,9^\circ$$

$$\alpha(\text{rad}) = (\pi/180^\circ) \cdot 1,9^\circ = 0,033 \text{ rad}$$

Ora sono noti tutti i dati per il calcolo della  $P_i(\text{max})$  per una velocità di taglio di 40 m/s, che risulterà:

$$P_i = 2T_i \cdot (\alpha/2) - F_{cf} = 2 \cdot 3000 \cdot (0,033/2) - 32,5 = 66,5 \text{ N} = 6,65 \text{ kg}$$

Si deve considerare che nel reale funzionamento la  $P_i$  agisce su un arco di perlina di  $180^\circ$ ; quindi, sapendo che lo spessore "utile" (ovvero quello su cui sono depositati i grani diamantati) della perlina stessa è  $t = 4,5 \text{ mm}$ , si può calcolare la pressione specifica di taglio che risulterà essere:

$$\text{Press spec} = \frac{P_i}{\phi_{\text{perlina}} \cdot t} = \frac{6,65}{10 \cdot 4,5} = 0,147 \text{ kg/mm}^2$$

Durante il funzionamento sull'apparecchiatura di prova, la meccanica imposta per la modalità di asportazione del materiale è tale che la forza di contatto tra

perlina e provino lapideo si scarica su una arco decisamente minore dei 180° delle effettive operazioni di taglio.

Si è preventivamente stimato il valore di questo arco in presa come variabile tra un minimo di 10° per le forze più basse ed un massimo di 35°-40° per le più alte, così è stato possibile calcolare il range cercato nel modo che sarà ora descritto.

Mantenendo lo stesso valore trovato della pressione specifica presente sulla singola perlina nella realtà, il calcolo delle forze  $F_m$  con le quali il cilindro differenziale oleopneumatico avrebbe dovuto spingere la perla sul campione (per maggiori approfondimenti si veda il paragrafo seguente) è stato eseguito tramite l'integrale di seguito riportato:

$$F_m = \int_0^{\beta} t \cdot r_{perlina} \cdot Press\ spec \cdot \cos\beta \, d\beta$$

dove  $\beta$  è di volta in volta uno dei valori degli angoli sopra citati, mentre tutte le altre variabili sono già state definite. I valori ottenuti sono i seguenti:

per  $\beta = 40^\circ$ ,  $F_m = 2,12$  kg;

per  $\beta = 35^\circ$ ,  $F_m = 1,89$  kg;

per  $\beta = 10^\circ$ ,  $F_m = 0,57$  kg;

In base ai dati ottenuti, si è finalmente scelto di adottare per il nostro piano di sperimentazione un range delle forze di contatto che andasse da un valore minimo di 0,5 kg, ad uno massimo di 2 kg.

Si vuole precisare che sebbene il nostro calcolo sia iniziato considerando la perlina nelle condizioni più gravose di carico, anche se non si fossero scelte quelle, per esempio analizzando, a parità di tesionamento del filo, una perlina non posta sulla parte alta del blocco (per la quale la  $P_i$  sarebbe risultata inferiore ai 6,65 kg assunti), oppure, ancora, considerando la medesima perlina ma impostando una tensione per il filo minore dei 300 kg adottati, comunque si sarebbero ottenuti dei valori di  $F_m$  compresi nel range stabilito in quanto sempre minori od uguali al valore massimo di 2 kg.

Per quanto riguarda invece la determinazione della gamma di velocità di taglio che l'elettromandrino ad alta frequenza avrebbe dovuto conferire alla perlina (fissata con Loctite n°64830 su un apposito alberino) perché essa potesse simulare fedelmente quelle del filo in lavorazione, l'analisi è stata molto meno laboriosa.



Ricordiamo ancora che anche se la modalità di asportazione del materiale è diversa nelle reali operazioni di taglio rispetto a quella assunta nell'apparecchiatura di prova (la prima prevalentemente "assiale", la seconda circonferenziale, vedi paragrafo 1.3), ciò non comporta nessun bisogno di adattamenti o modifiche del nostro modello data la distribuzione casuale dei grani sulla matrice e l'anisotropia del materiale.

In considerazione anche di questo, si è effettuata una semplice conversione da m/s a giri/min (giri della perlina ovviamente) delle velocità conferite al filo diamantato dalla macchina tagliatrice.

La massima velocità adottabile risulta essere  $40 \text{ m/s} = 40000 \text{ mm/s}$  ovvero:

$$40000 / (2\pi r_{\text{perlina}}) = 40000 / (2\pi \cdot 5) = 1273,24 \text{ giri/sec} \approx 76000 \text{ giri/min},$$

che è un valore compreso nel range ( $0 \div 90$  mila giri/min) consentito dall'elettromandrino.

Quindi stabilito il tetto massimo per le velocità di taglio nel piano di sperimentazione, considerando gli intervalli effettivamente assunti da questa variabile (come detto  $30 \div 40 \text{ m/s}$  per il taglio di marmi e  $20 \div 30 \text{ m/s}$  per i graniti), si sono determinate le altre velocità da assumere per i test, ovvero:

$$70000 \text{ giri/min} = 36,6 \text{ m/s}$$

$$60000 \text{ giri/min} = 31,4 \text{ m/s}$$

$$50000 \text{ giri/min} = 26,2 \text{ m/s}$$

$$40000 \text{ giri/min} = 20,9 \text{ m/s}$$

$$30000 \text{ giri/min} = 15,7 \text{ m/s}$$

oltre ai 76000 giri/min già citati.

### 4.3 Approfondimento inerente la dinamica delle operazioni di taglio condotte sulla macchina di prova

Per una migliore comprensione della modalità con cui avviene l'asportazione del materiale lapideo dal disco campione sulla "nostra" apparecchiatura di prova, si riporta in questo paragrafo una descrizione più dettagliata della dinamica con cui essa avviene.

La peculiarità della meccanica del taglio ottenuta, sta nel particolare modo di avanzamento della perlina durante la fase di asportazione: non si ha, come era lecito prevedere, una traiettoria di taglio "elicoidale", ma piuttosto la perlina è fatta avanzare radialmente (rispetto al disco lapideo) dalla slitta porta-elettromandrino, solo nel momento in cui si conclude il giro del provino. Vediamo il perché.

La perlina diamantata è spinta verso il campione lapideo da una forza  $F_m$  (vedi paragrafo precedente per i valori da essa assunti) preimpostata e costante, fornita dal cilindro differenziale oleopneumatico.

Nell'attimo iniziale di contatto con il materiale, che avverrà in teoria lungo una generatrice della superficie cilindrica della perlina, certamente ad una  $F_m$  più elevata corrisponderà una maggiore penetrazione del singolo grano nel campione.

Si tenga presente che nei primi istanti la pressione specifica esercitata dall'utensile sul pezzo assume valori molto grandi (per la piccolezza dell'area di contatto).

$F_m$  e la forte velocità di taglio fanno sì che la perlina inizi ad asportare materiale e che, data la concomitanza della rotazione del disco lapideo, il contatto avvenga su una superficie la cui proiezione su un piano ortogonale all'asse del provino è un arco di ampiezza  $\beta$ .

Da principio questo arco in presa aumenta il suo valore (la perlina lavorando avanza) e sempre un maggior numero di grani si trova in fase di asportazione. Conseguenza di ciò è una diminuzione della pressione specifica di taglio.

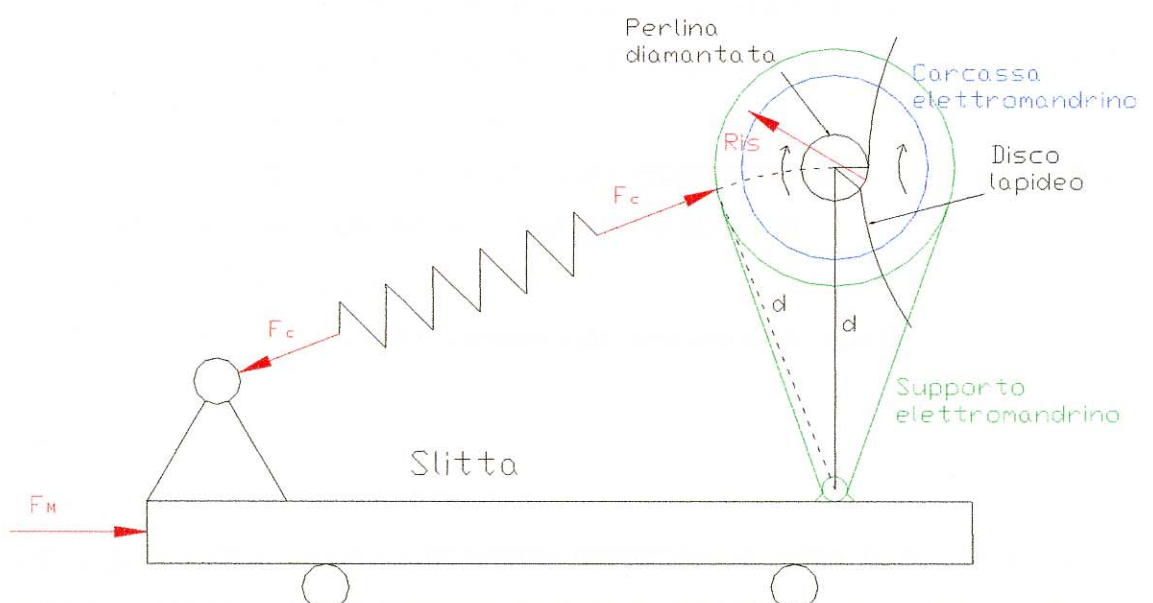
Il valore dell'arco  $\beta$  continuerà a salire (senza mai comunque arrivare a valori prossimi a  $90^\circ$ , per i quali la perlina "entrerebbe" nel disco) fintantoché l'effetto

“positivo” (per l’asportazione) dell’aumento dei grani contemporaneamente in presa e quello “negativo” della diminuzione della pressione specifica, non si compenseranno nel momento in cui il tasso di asportazione risulta massimo per quei parametri taglio. Si instaura in questo modo una situazione di equilibrio per cui l’avanzamento si annulla.

Un ulteriore ipotetico aumento dell’angolo  $\beta$  comporterebbe una diminuzione di volume di materiale asportato, dovuta alla diminuzione della pressione specifica, che risulterebbe in valore assoluto superiore all’aumento dello stesso provocato dal maggior numero di grani in presa.

E’ chiaro che a  $F_m$  più elevate corrispondono maggiori  $\beta$ .

In questa fase, in cui diremo che la perlina è “a regime”, la perlina asporta materiale in modo esclusivamente circonferenziale. ed è presente sia un equilibrio globale esterno per il gruppo slitta-elettromandrino, sia un equilibrio interno sullo stesso elettromandrino (che ricordiamo è sostenuto da un supporto basculante).



**Figura 4.5: schema semplificato delle forze agenti all’equilibrio sul gruppo elettromandrino**

La perlina è soggetta ad una forza ( $R_{is}$  in fig.4.5) generata da diverse componenti agenti sull'arco dei contatti: reazione orizzontale derivante dal suo contatto con la pietra, reazione verticale causata dalla rotazione del disco, forze tangenziali di taglio e di attrito.

Questa risultante si considera applicata in un punto prossimo alla metà dell'arco in presa.

Si avrà un avanzamento nullo per il gruppo quando:

$$F_m = R_{is_0}$$

dove  $R_{is_0}$  è la componente orizzontale della risultante suddetta.

Nell'equazione sopra si sono volutamente trascurati gli attriti sulla slitta in quanto bassissimi.

Per l'equilibrio a momento del supporto-mandrino si ha:

$$F_c \cdot d = R_{is} \cdot d_1 \quad (*)$$

dove  $F_c$  è la reazione della cella di carico (schematizzabile come una molla) alla forza da essa sentita (uguale in modulo e direzione, contraria nel verso);  $d$  è la distanza perlina-punto di cerniera e, per apposita costruzione geometrica, anche la distanza che ha la direzione di  $F_c$  rispetto al medesimo punto;  $d_1$  è il braccio di  $R_{is}$  rispetto alla cerniera.

Se si trascura il fatto che  $R_{is}$  sia applicata leggermente più in basso rispetto al centro della perlina, l'equazione (\*) può anche scriversi:

$$F_c \cdot d \approx R_{is_0} \cdot d + R_{is_v} \cdot r_{perlina}$$

Considerando che  $r_{perlina}$  è decisamente più piccolo di  $d$ , risulta:

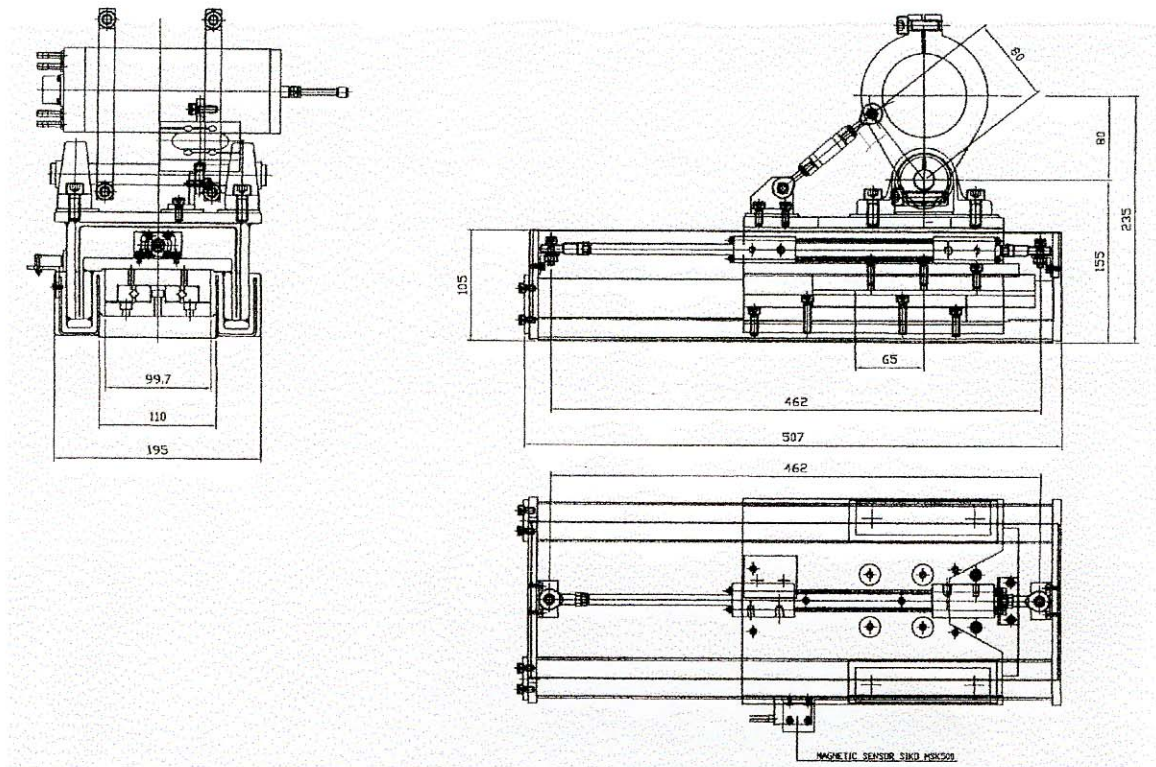
$$F_c \approx R_{is_0}$$

e quindi:

$$F_m \approx F_c$$

Ciò significa che l'errore nell'anello retroattivo è nullo e quindi in questa condizione la slitta è realmente in condizioni di equilibrio.





**Figura 4.6: disegno del gruppo elettromandrino**

Riprendiamo l'analisi del processo di taglio, descrivendo cosa accade al momento in cui il disco lapideo ha compiuto un'intera rotazione.

In quell'istante l'arco in presa si riduce notevolmente (non si annulla totalmente perché comunque la virgola lasciata durante il transitorio d'ingresso non consente l'asportazione di una "buccia" del disco lapideo perfettamente cilindrica) e quindi non si riesce ad avere una reazione sulla perlina che possa equilibrare la forza costante imposta dall'esterno.

La differenza tra  $F_m$  e questa  $R_{tr} < R_{is}$  che la cella di carico sente, è la forza che causa l'avanzamento della perlina.

L'utensile continua ad asportare materiale avanzando fin quando l'arco dei contatti non torna ad essere delle dimensioni tali da garantire il ripristino di una reazione orizzontale che annulli  $F_m$ , esattamente come accadeva nel transitorio d'ingresso.

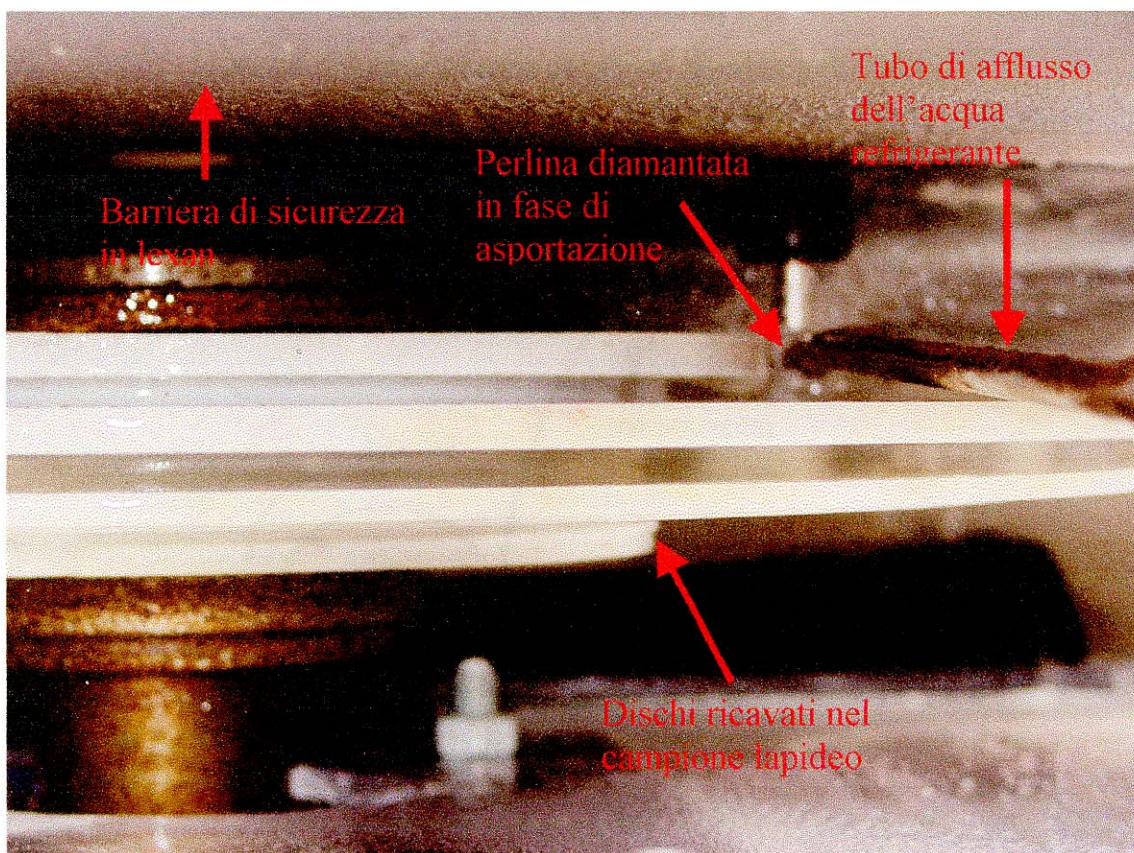
E' chiaro come per  $F_m$  elevate la forza di avanzamento nel transitorio sia anch'essa elevata, il che significa avere una variazione di raggio del disco



lapideo relativamente grande, ovvero una maggiore quantità di materiale asportato nell'unità di tempo.

Inoltre è importante sottolineare anche l'importanza della velocità relativa di taglio in questa fase transitoria; elevate velocità di rotazione della perlina conducono, facendo passare i grani sul materiale con una frequenza elevatissima, ad un tasso di asportazione notevole.

Ovviamente  $F_m$  e velocità di taglio elevate conducono ad una più rapida usura dell'utensile diamantato.



**Figura 4.7: perlina in fase di asportazione**

#### 4.4 Definizioni geometrico-cinematiche e parametri di usura

Riportiamo ora una serie di grandezze e di parametri che sono stati di fondamentale importanza per l'interpretazione dei dati rilevati durante i test di taglio.

Definiamo innanzitutto:

- $R_t$  : raggio perlina diamantata(tool) [mm]
- $R_w$  : raggio del disco di materiale lapideo(workpiece) [mm]
- $V_t$  : velocità di usura dell'utensile [ $\text{mm}^3/\text{s}$ ]
- $V_w$  : velocità di asportazione del disco lapideo [ $\text{mm}^3/\text{s}$ ].

Con la modalità di lavoro ampiamente descritta nei paragrafi precedenti, la cinematica di taglio può essere ben rappresentata dalla figura seguente.

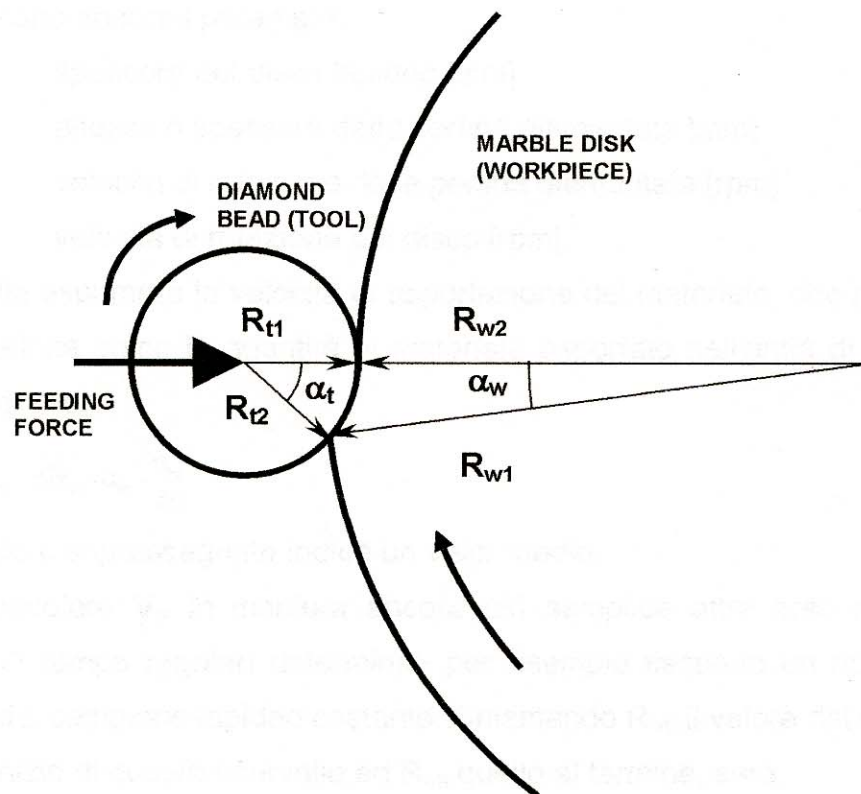


Figura 4.8: cinematica di taglio nella macchina di prova



La diminuzione in fase di taglio del raggio del provino lapideo e di quello della perlina possono essere semplicemente scritte come:

$$\Delta R_t = R_{t1} - R_{t2}$$

$$\Delta R_w = R_{w1} - R_{w2}$$

Si vuole precisare che essendo  $\Delta R_t$  dovuto a fenomeni di usura, a meno che non si considerino tempi di utilizzo piuttosto lunghi, il suo valore è quasi del tutto trascurabile rispetto a  $\Delta R_w$ .

Tramite semplici considerazioni geometriche, la dipendenza di  $\Delta R_w$  dai parametri geometrici di taglio può essere espressa come:

$$\Delta R_w = R_{t2}(1 - \cos\alpha_t) + R_{w1}(1 - \cos\alpha_w) + \Delta R_t$$

L'ultimo termine di questa equazione per le ragioni suddette può essere trascurato

$\Delta R_w$  può essere direttamente misurato e registrato grazie ad un apposito contatore digitale collegato al trasduttore magnetico di posizione che misura gli spostamenti della slitta porta del gruppo elettromandrino.

Si definiscono ancora i parametri:

$d_w$  : spessore del disco lapideo [mm]

$b_w$  : altezza o spessore della perlina diamantata [mm]

$n_t$  : velocità di rotazione della perlina diamantata [rpm]

$n_w$  : velocità di rotazione del disco [rpm].

E' possibile esprimere la velocità di asportazione del materiale, che può anche essere definita come la quantità di materiale asportato nell'unità di tempo, in funzione di  $\Delta R_w$ :

$$V_w = 2\pi \cdot \bar{R}_w \cdot \Delta R_w \cdot d_w \cdot \frac{n_w}{60}$$

dove il valore soprassegnato indica un valor medio.

Si può calcolare  $V_w$  in maniera ancora più semplice attraverso misure ad intervalli di tempo regolari determinati per esempio fissando un numero  $i$  di rotazioni del campione lapideo costante. Chiamando  $R_{wb}$  il valore del raggio del disco all'inizio di questo intervallo ed  $R_{wa}$  quello al termine, sarà:

$$V_w = \pi(R_{wb}^2 - R_{wa}^2) \cdot d_w \cdot \frac{n_w}{60 \cdot i}$$

La velocità relativa di taglio  $S$  è data da:



$$S = 2\pi \left( \bar{R}_t \cdot \frac{n_t}{60} - \bar{R}_w \cdot \frac{n_w}{60} \right)$$

Il segno meno nasce dal fatto che il taglio è eseguito in concordanza.

Con approssimazione molto buona S può essere considerata costante durante tutto il processo di taglio, in quanto il termine a sottrarre è molto inferiore al minuendo.

E' possibile esprimere anche la velocità di usura della perlina diamantata valutando al termine di un intervallo di tempo  $\Delta t$  di riferimento la diminuzione di  $R_t$ .

$$V_t = 2\pi \cdot \bar{R}_t \cdot \frac{\Delta R_t}{\Delta t} \cdot d_w$$

Le perline diamantate hanno nei riguardi dell'usura un comportamento simile a tutti gli altri utensili diamantati, quindi per valutare la bontà del loro stato superficiale e la loro capacità di asportazione, possono essere adottati i medesimi parametri descritti al paragrafo 3.2.

$W_r$  : Wear rate [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]

$G$  : Grinding ratio

$W_p$  : Wear performance [ $\text{m}^2/\mu\text{m}$ ]

dove sarà specificamente:

$$W_r = \frac{\Delta R_t}{\Delta t} \cdot 10^3;$$

$$G = \frac{\text{removed\_material\_Vol.}}{\text{wear\_Volume}} = \frac{V_w}{V_t};$$

$$W_p = \frac{\bar{V}_w}{W_r \cdot d_w} \cdot 10^{-6}$$

in cui  $\bar{V}_w$  è il valor medio della velocità di asportazione nell'intervallo di tempo  $\Delta t$

La durata T di una perlina diamantata (che dovrà essere stabilita in base ad opportuni criteri di usura; per esempio una perlina si può considerare usurata quando la sua capacità di asportazione si riduce ad 1/n della capacità massima, con n da stabilire conformemente alla pratica industriale) e la quantità di materiale asportato Q ad un determinato istante della sua vita, possono essere valutati in funzione dei principali parametri di processo

$$T = f(F, V_{\text{rel}})$$

$$Q = f(F, V_{rel}).$$

Di conseguenza anche tutti i parametri sopra citati ( $W_r$ ,  $G$  e  $W_p$ ), relazionati alla diminuzione del raggio della perlina e del tasso di asportazione, potranno in conclusione essere espressi in funzione del tempo.

## PARA LA PARTE DI SPERIMENTAZIONE E CONSEQUENTI RISULTATI

### 3.1.1.1. Caratterizzazione del tipo di perlina e qualità del solvente

Le perlina, fatte di stirene polimerizzato in laboratorio, sono di tipo "soft" e si sono prodotte in un numero molto ridotto per quantità.

Di conseguenza l'attività di ricerca è stata svolta con un numero limitato di perlina, con un solo campo di variazione, in modo da ottenere in un solo esperimento il progetto stesso. Bianco di Carbonio con un alto tasso di asportazione di solvente.

Si è proceduto ad un trattamento fatto in prova con perline "soft", con un tasso medio di Carbonio che ha una qualità di granuli, sul quale si dividono in due parti, per la parte di perlina "soft".

La perlina "soft" è stata utilizzata in modo da ottenere una perlina "soft" di tipo "soft" con un tasso medio di Carbonio che ha una qualità di granuli, sul quale si dividono in due parti, per la parte di perlina "soft".

Il tipo di perlina "soft" è stato utilizzato in modo da ottenere una perlina "soft" di tipo "soft" con un tasso medio di Carbonio che ha una qualità di granuli, sul quale si dividono in due parti, per la parte di perlina "soft".

Il tipo di perlina "soft" è stato utilizzato in modo da ottenere una perlina "soft" di tipo "soft" con un tasso medio di Carbonio che ha una qualità di granuli, sul quale si dividono in due parti, per la parte di perlina "soft".

Il tipo di perlina "soft" è stato utilizzato in modo da ottenere una perlina "soft" di tipo "soft" con un tasso medio di Carbonio che ha una qualità di granuli, sul quale si dividono in due parti, per la parte di perlina "soft".

## CAPITOLO 5

### PRIMA SERIE DI SPERIMENTAZIONI E CONSEGUENTI RISULTATI

#### 5.1 Descrizione dei test effettuati e grafici ottenuti

Una volta risolti gli iniziali problemi di funzionamento di cui al Capitolo 2, le prime prove di taglio hanno potuto aver principio.

Si è deciso di testare per prime perline con grani elettrodepositati e, per quanto riguarda i campioni di materiale lapideo, si sono adottati dischi del piuttosto pregiato marmo Bianco di Carrara ( $\Phi = 300$  mm e spessore 50 mm).

Si rimandano ad un immediato futuro prove con perline sinterizzate, sia sullo stesso marmo di Carrara che su una qualità di granito, sul quale si dovranno anche condurre i test con la perlina elettrodeposta.

L'acquisizione di dati eseguita è stata essenzialmente una misurazione della variazione del raggio del campione di marmo ad intervalli di tempo regolari, ogni minuto per la precisione (specifichiamo che comunque si è preferito, per le successive elaborazioni, utilizzare come unità di tempo il secondo).

E' stato possibile quantificare tale variazione grazie ad un piccolo contatore digitale collegato al trasduttore di posizione magnetico della slitta porta-elettromandrino.

L'intero processo di asportazione poteva essere tenuto sotto controllo grazie al software Labview di cui è dotato il PC della macchina.

Questo programma è capace di graficare istante per istante (in ascissa presenta il tempo che progredisce) l'andamento del valore effettivo della forza di contatto perlina-pezzo sentito dalla cella di carico e, contemporaneamente, la retta rappresentante la forza costante impostata dall'esterno ad inizio test.



**Figura 5.1: Labview in funzione**

Quanto detto è verificabile osservando fig. 5.1.

Il gap tra la retta gialla (forza costante impostata) e la linea verde frastagliata (a causa delle microoscillazioni) è un parametro in base al quale verificare la correttezza dell'operazione di taglio corrente; se molto ridotto, è segno che tutto sta procedendo per il meglio, mentre nel momento in cui si presenta una divergenza, significa che qualcosa non va come dovrebbe (per esempio nel caso di un principio di ovalizzazione del disco oppure se è venuto a crearsi un indesiderato "solco" nel materiale). In quest'ultimo caso i dati rilevati non saranno più molto significativi.

Tramite la formula :

$$V_w = \pi(R_{wb}^2 - R_{wa}^2) \cdot \frac{d_w}{60}$$

dove  $R_{wb}$  e  $R_{wa}$  sono i raggi del disco alla distanza di un minuto di tempo e  $d_w$  è lo spessore del disco medesimo, si è calcolato il volume di materiale asportato al secondo.

Si è pensato che la diminuzione di questo valore con il procedere dei test, potesse dare un'idea immediata della perdita di capacità di asportazione della perlina nel tempo e, di conseguenza, del livello di usura da essa raggiunto.



Ovviamente si è iniziato col testare una perlina nuova ed i risultati ottenuti per tutte le differenti combinazioni velocità di taglio - forza di contatto sono riportate nei grafici 1 e 2.

Ogni nodo di queste curve è un valore che deriva dalla media di almeno 5 acquisizioni (ciò è in generale valido per tutti i grafici di seguito riportati); sono stati eliminati dal calcolo di tale media dati palesemente non significativi sia per eccesso che per difetto.

In particolare gli andamenti ottenuti per la perlina nuova, sono un'ulteriore media dei risultati delle medesime prove ripetute per due utensili distinti.

La prima perlina ha continuato a lavorare asportando il materiale di 30 dischi lapidei, dopodiché è stata sostituita.

Per essa si sono adottate, in sequenza random, tutte le combinazioni dei parametri di taglio possibili per un range di forza compreso tra 0,5 daN e 2 daN (assumendo intervalli di 0,5 daN) e per 6 differenti velocità di taglio (30,40,50,60,70 e 76 mila giri/min).

Considerando che l'acquisizione dati mediamente inizia da un raggio di 146 mm del campione e termina ad un raggio di 80 mm, si può dire che il volume di materiale asportato per un singolo disco sia:

$$\pi \cdot (146^2 - 80^2) \cdot 4,5 = 210870 \text{ mm}^3.$$

Al trentesimo disco si sarà lavorato complessivamente un volume di  $210870 \cdot 30 \approx 6300000 \text{ mm}^3 = 6300 \text{ cm}^3$ .

Tenendo presente la modalità di taglio, più volte citata in questo lavoro di tesi, che assume la perlina ( $\Phi=10 \text{ mm}$ ) nelle reali operazioni, la superficie del volume appena calcolato sarà:

$$6300/1 = 6300 \text{ cm}^2 = 0,63 \text{ m}^2$$

Se in un metro di filo sono presenti 30 perline (il che è più che probabile) ed ognuna di esse ha asportato ad un determinato momento  $0,63 \text{ m}^2$  di materiale, globalmente si ha una resa del filo di  $0,63 \cdot 30 = 19 \text{ m}^2/\text{m}$

I costruttori forniscono per questo indice (che rappresenta la superficie che un metro di filo riesce al massimo ad asportare prima di essere sostituito) un range di  $50 \div 60 \text{ m}^2/\text{m}$  per il taglio di marmi, al variare dei parametri di taglio.

Un rapido confronto fa sì che si possa affermare che lavorando 30 dischi si è giunti all'incirca ad  $1/3$  della vita utile (in termini di resa) della perlina



Grafico 1: andamento del volume di materiale asportato nell'u.d.t. con perlina nuova al variare della velocità di taglio per diverse forze di contatto

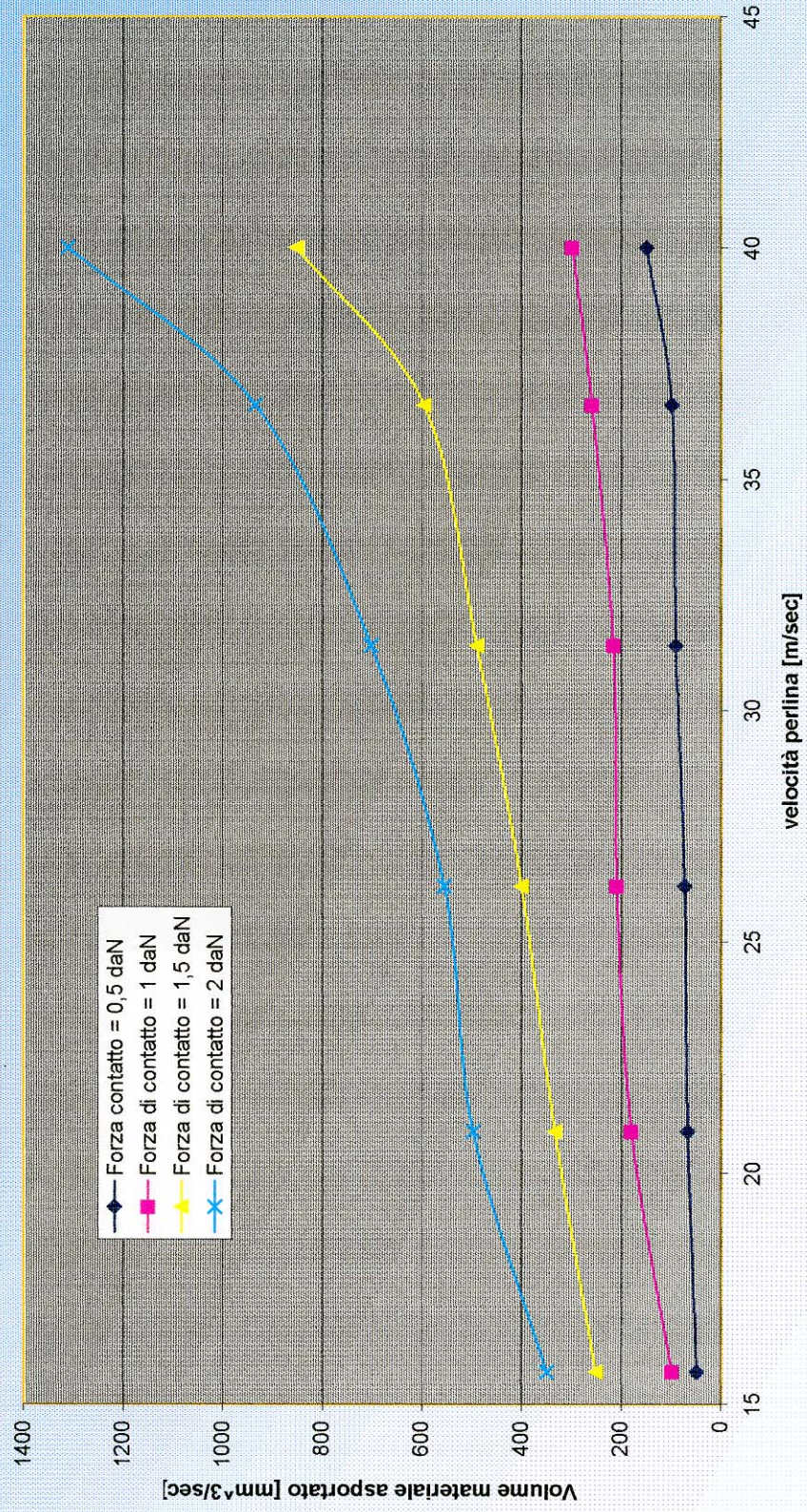
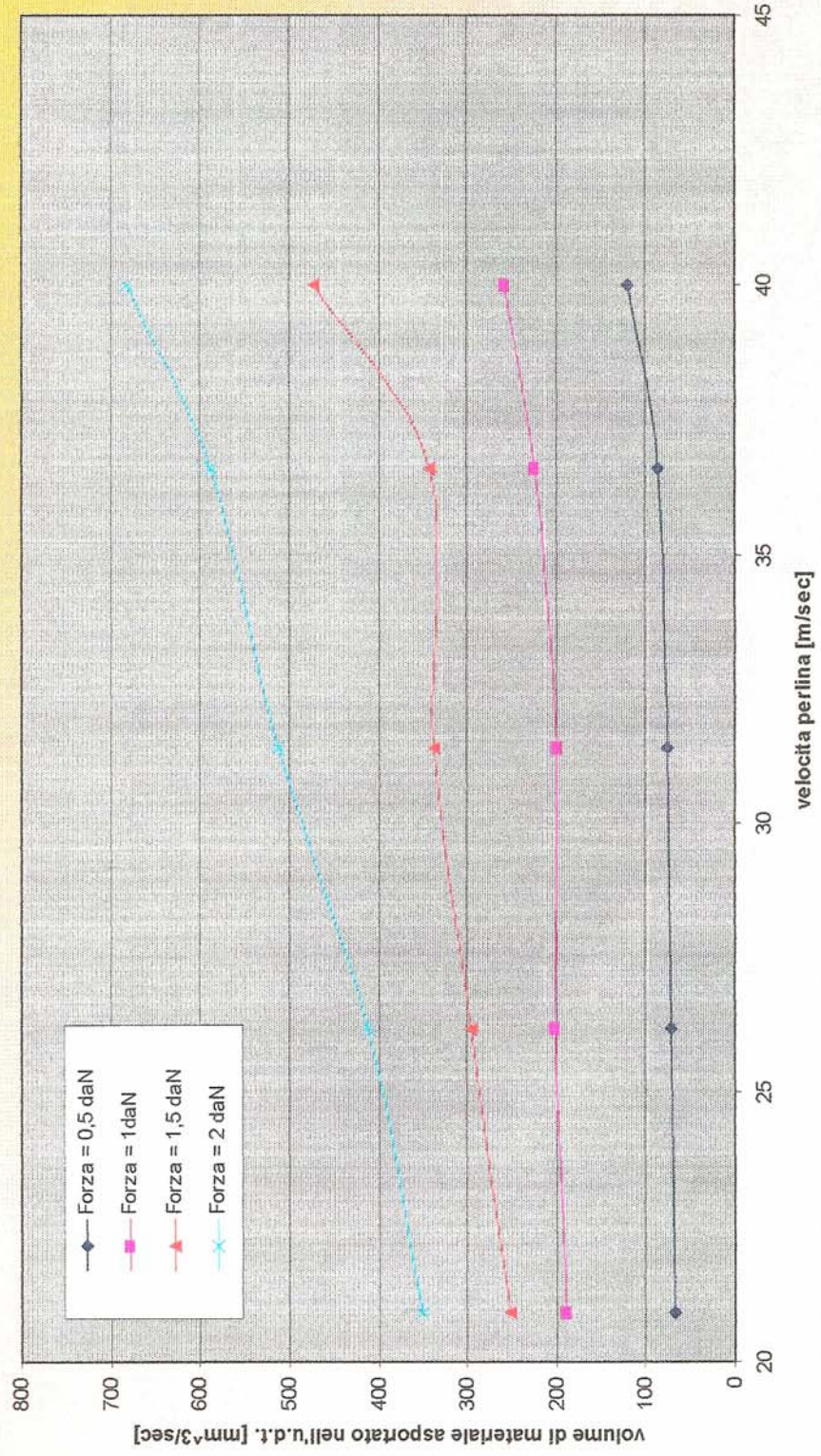






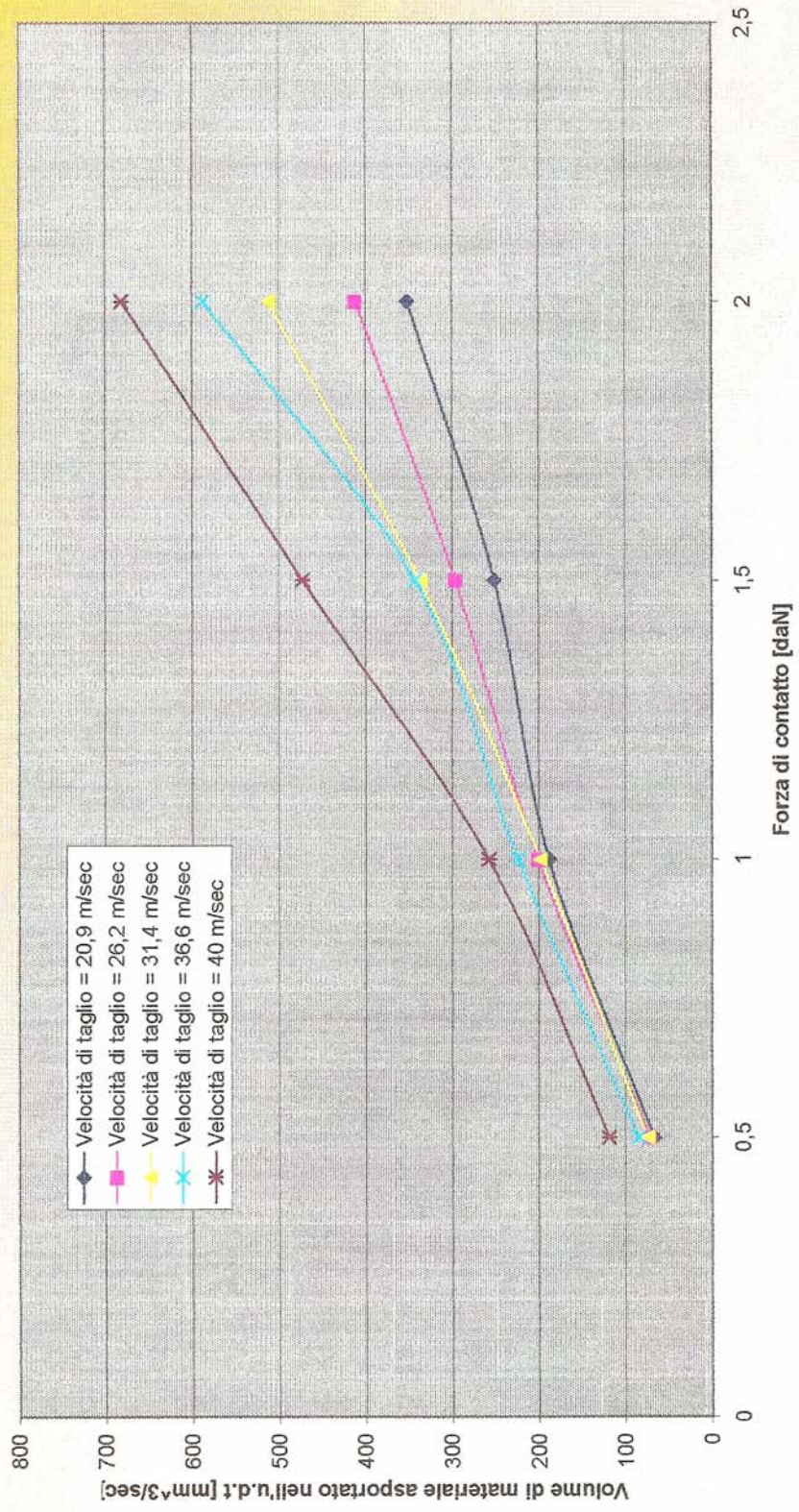


Grafico 3: volume di materiale asportato nell'u.d.t. da perlina usata (giunta ad 1/3 della vita lavorando con parametri di taglio variabili) in funzione della velocità di taglio per diverse forze di contatto



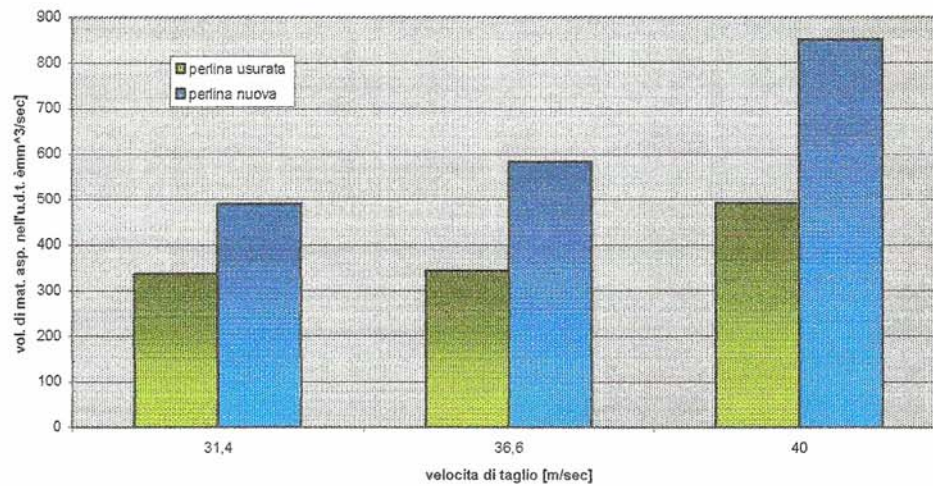


**Grafico 4: andamento del volume asportato nell'u.d.t. da perlina usata (giunta ad 1/3 della vita lavorando con parametri di taglio variabili) in funzione della forza di contatto al variare della velocità**

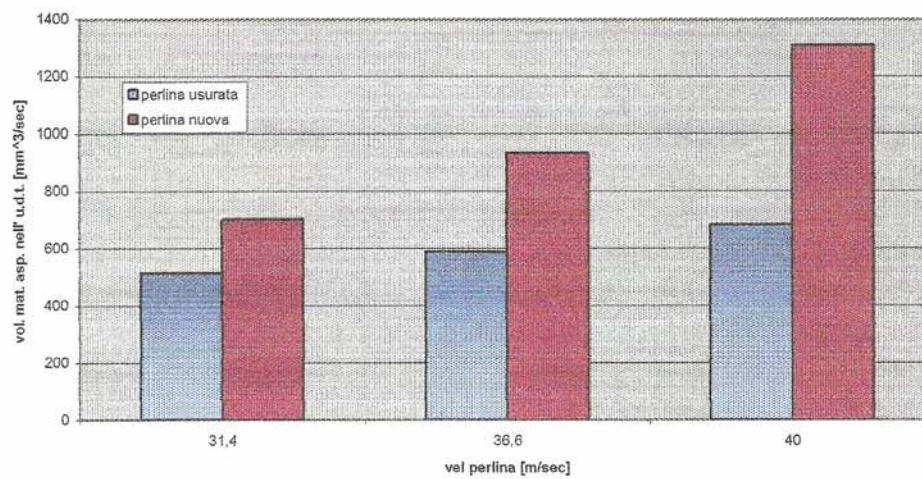




**Grafico 5: differenza del vol. di materiale asportato nell'u.d.t. con perlina usurata (funzionando in cond. variabili per l'asportazione di 30 dischi) e con perlina nuova, imponendo una forza di contatto di 1,5 daN per 3 differenti velocità di taglio**



**Grafico 6: differenza di vol. di materiale asportato nell'u.d.t. con perlina usurata (funzionando in cond. variabili per l'asportazione di 30 dischi) e nuova, per una forza di contatto pari a 2 daN , per tre diverse vel. di taglio**



Giunti a questo momento, si sono ripetute le prove per tutte le combinazioni dei parametri di taglio come già effettuato per perlina nuova.

I risultati ottenuti sono riportati nei grafici 3 e 4

Si nota un notevole decremento, in principal modo per forze di contatto e velocità più elevate, del tasso di asportazione; addirittura, per una forza di 2 daN impostata ad una velocità di taglio di 40 m/s, si ha praticamente un dimezzamento del valore del volume asportato nell'unità di tempo.

Per parametri di taglio meno spinti invece non si notano queste significative differenze, in particolare l'influenza della velocità per forze di 0,5 daN e di 1 daN è molto poco sentita, se non quasi nulla per la perlina usurata.

La seconda perlina è stata testata con una diversa metodologia di prova: per tutti i dischi lavorati si sono adottati parametri di taglio costanti, tra i più elevati nei range da noi assunti: 2daN e 36,6 m/s ovvero 70 mila giri/min.

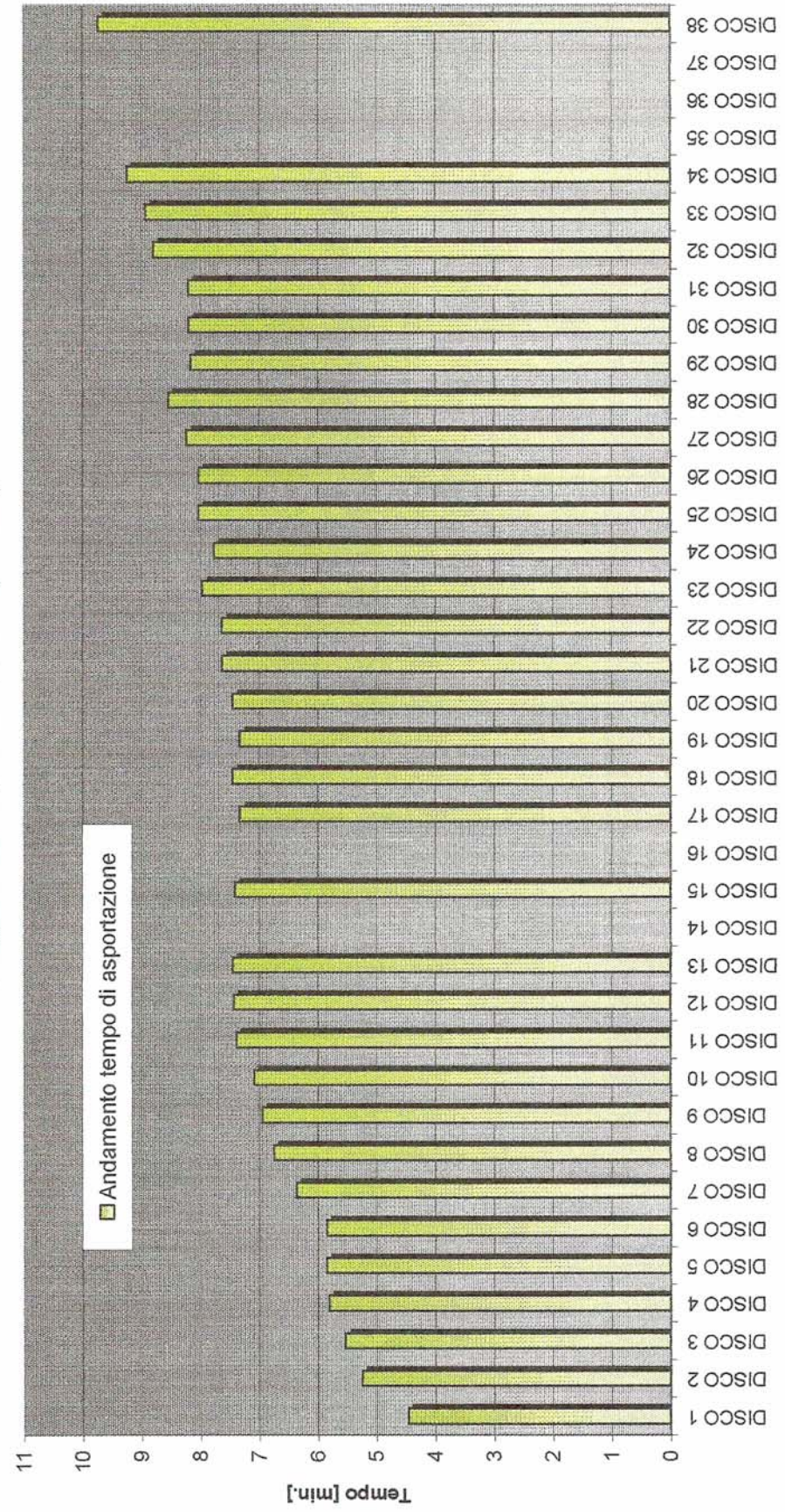
Con essa si sono lavorati 38 campioni lapidei e per ciascuno di essi si è rilevato il tempo necessario ad un'asportazione completa; si è deciso di non proseguire oltre in quanto, come visibile dal grafico 7, il tempo effettivo per completare il taglio dell'ultimo disco era ormai più del doppio rispetto a quello impiegato per la stessa operazione effettuata con la perlina nuova.

Sempre dallo stesso grafico, è evidente come il breve tempo necessario per la lavorazione dei primi provini vada aumentando piuttosto rapidamente, per poi stabilizzarsi nella zona centrale attorno a valori oscillanti tra i 7 e gli 8 minuti.

Dal 24<sup>esimo</sup> disco in poi si ha un nuovo progressivo decadimento del tempo a causa dei fenomeni di usura, che, da quel momento, iniziano a far sentire più marcatamente il proprio peso (l'assenza di alcuni dati è dovuta al fatto che, per problemi di ordine tecnico, le lavorazioni di quei dischi sono state effettuate con velocità leggermente inferiori, per cui si è preferito non riportare i relativi dati di asportazione).

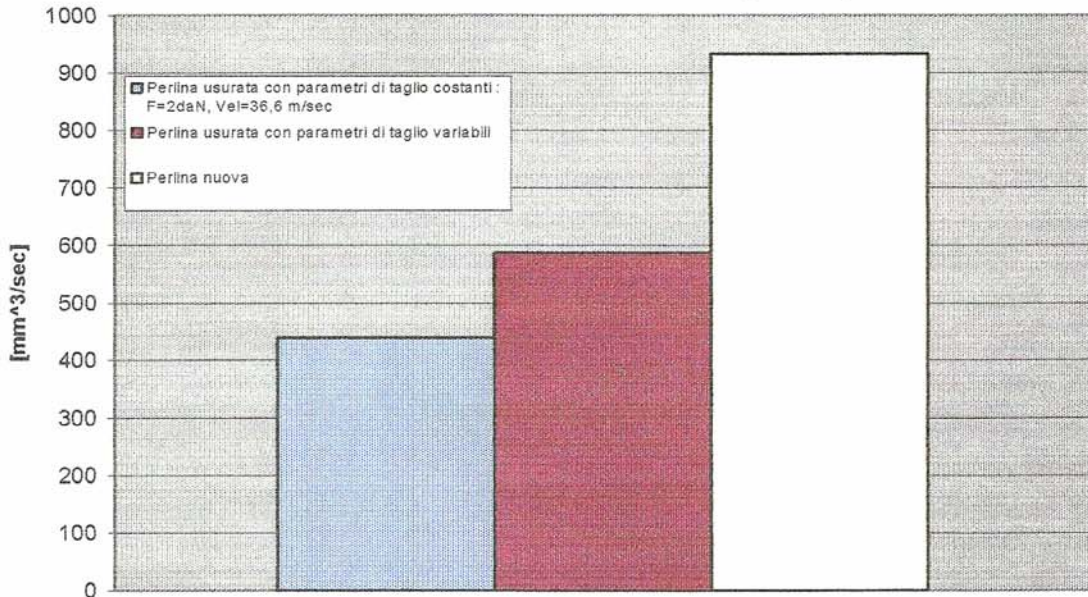


Grafico 7: progressivo aumento del tempo di asportazione di un disco campione [146-80 mm] con parametri di taglio costanti [F=2 daN ; Vel.=36,6 m/sec]





**Grafico 8: confronto tra i valori di volume asportato nell'u.d.t. da perlina nuova e da perlina usurata (dopo l'asportazione di 30 dischi campione) in due diversi modi, per una forza di contatto di 2 daN ed una velocità di taglio di 36,6 m/sec**



Dal grafico 8 è molto interessante constatare quale sia la differenza tra le quantità di volume di marmo asportato nell'unità di tempo dalle due perline usurate con modalità di taglio differenti, quando esse sono a circa 1/3 della loro vita utile.

Il confronto è stato eseguito per una velocità di 36,6 m/s con una forza di contatto di 2 daN; da notare il forte gap con il valore ottenuto con i medesimi parametri per la perlina nuova.

Eseguendo la sommatoria dei tempi impiegati per l'asportazione dei soliti 30 dischi, effettuata sia per la perlina usurata con parametri di taglio variabili con sequenza casuale, sia per la perlina usurata con parametri di taglio spinti, si è ottenuto un risultato piuttosto sorprendente.

La prima asportava la quantità di materiale in questione in circa 3 ore (2 ore e 58 minuti per la precisione), mentre la seconda nel tempo di 3 ore e 34 minuti.

Inoltre il 30<sup>esimo</sup> disco veniva ultimato, a parità di velocità (36,6 m/s) e forza (2 daN), dalla prima in un tempo di 6' e 30" e dalla seconda in 8' e 10" (come verificabile dal grafico 7).

Se quest'ultimo raffronto era a priori prevedibile (si poteva già immaginare che la perlina che fino a quel momento aveva lavorato con parametri elevati "mangiasse" di meno a causa dell'usura maggiore), la stessa cosa non si può dire per quello inerente i tempi globali.

Il fatto che ad asportare 6300 cm<sup>3</sup> di marmo con una singola perlina diamantata, si impieghi meno tempo se non si adottano costantemente parametri di lavorazione molto spinti, è un riscontro significativo.

Nonostante nelle prime fasi si abbia indiscutibilmente un vantaggio, da un determinato momento in avanti, per forti velocità ed elevate forze, il fattore usura ha un effetto predominante, con conseguente dilatazione dei tempi.

Il problema su cui si sta tutt'oggi lavorando è stabilire quale sia questo momento; fissarlo vorrebbe dire indicare una soglia molto importante per chi lavora nel settore lapideo, in quanto grazie ad esso si potrebbero coniugare esigenze di produttività e costi.

## **5.2 Rielaborazione dei dati sperimentali e creazione di un primo modello**

Il numero di acquisizioni effettuate durante questi mesi iniziali di funzionamento dell'apparecchiatura di prova, hanno consentito l'elaborazione di un primo modello sperimentale dell'andamento della quantità di materiale asportato nell'unità di tempo in funzione delle variabili di taglio, sia per la perlina nuova che per quella usurata (parzialmente) con parametri non costanti da test a test. Tali modelli, dei quali, probabilmente, ha più interesse quello per la perlina usata, dovranno in futuro essere, se possibile, perfezionati, ma soprattutto validati per il maggior numero di esperienze possibili.

Tramite l'ausilio di software quali SSPS (un programma di rielaborazione statistica) e Matlab, si è potuto condurre una ricerca della funzione numerica che legasse il volume asportato nell'unità di tempo ai parametri di taglio.

La procedura era quella di ipotizzare un modello che in primis potesse sembrare plausibile (per esempio una dipendenza quadratica dalla forza, lineare dalla velocità, la presenza di un termine misto dei due parametri etc., e così, su questa falsariga, tutti gli altri) e fornire poi come input ad SSPS una matrice le cui n colonne erano costituite dai valori delle variabili indipendenti assunte, più la colonna dei 24 valori empirici corrispondenti del volume stesso.

Scrivendo l'equazione di legame supposta, ed eseguendo una regressione non lineare, si ottenevano i valori delle incognite, ovvero dei coefficienti moltiplicativi dei parametri indipendenti.; grazie a Matlab era successivamente possibile avere una visualizzazione 3D della funzione conseguita.

Tra i tanti modelli analizzati, quello che senza dubbio meglio approssimava l'andamento sperimentale per entrambe le condizioni della perlina, era il seguente:

$$\text{Vol.Aspt.} = A_1 \cdot S + A_2 \cdot S^2 + B_1 \cdot F + B_2 \cdot F^2 + B_3 \cdot F^3 + AB \cdot S \cdot F;$$

con  $S = \text{speed [m/s]}$ ,  $F = \text{force [daN]}$  e  $\text{Vol.Aspt [mm}^3/\text{s]}$  è il volume di materiale asportato nell'unità di tempo.

Questa funzione per la perlina nuova diventava:

$$\text{Vol.Aspt.} = -19,25 \cdot S + 0,25 \cdot S^2 + 517 \cdot F - 647,7 \cdot F^2 + 197,75 \cdot F^3 + 18,5 \cdot S \cdot F;$$

mentre per la perlina usurata (dopo l'asportazione di  $6300 \text{ cm}^3$  di materiale con parametri di taglio variabili) risultava essere:

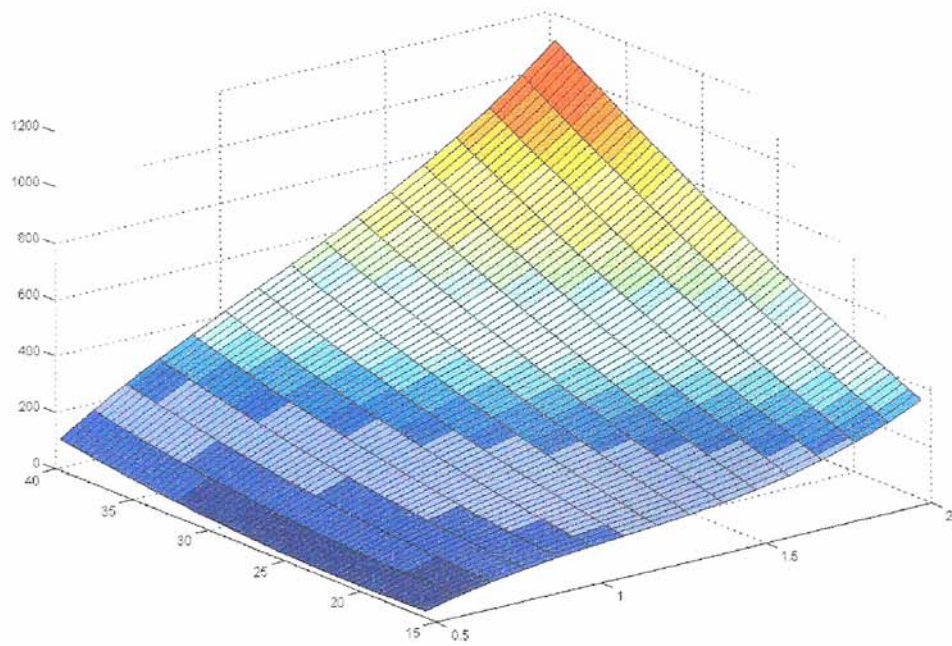
$$\text{Vol.Aspt.} = -9,3 \cdot S + 0,1 \cdot S^2 + 432 \cdot F + 434 \cdot F^2 + 124 \cdot F^3 + 9,3 \cdot S \cdot F;$$

di tutti i coefficienti riportati, erano significativi con percentuale inferiore al 95% solo  $B_1$  e  $B_2$  per ambedue le perline.

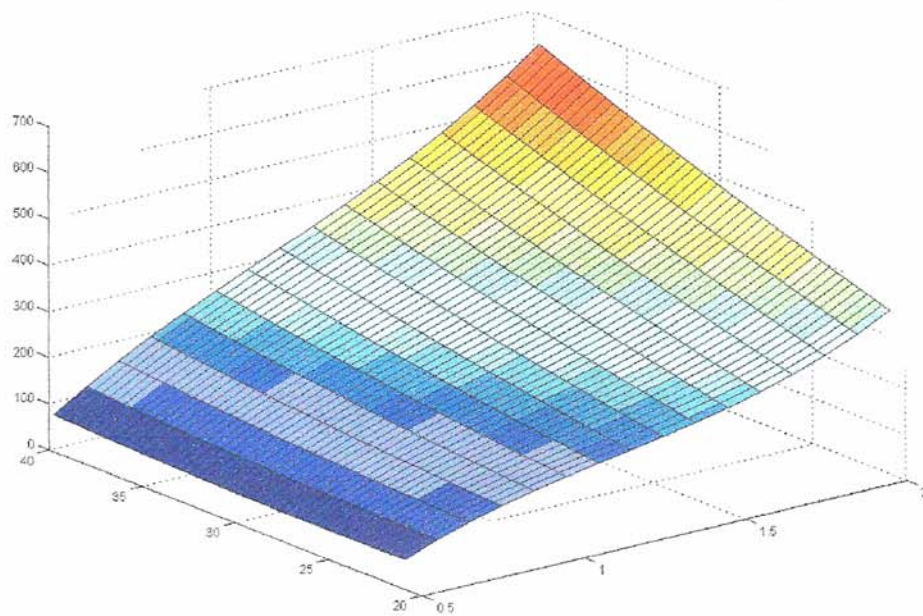
Si osserva una dipendenza debole dal quadrato della velocità per i due casi; al contrario risulta piuttosto elevata quella dal cubo della forza di contatto, la cui influenza, come poteva prevedersi, diminuisce con l'usura. E' interessante notare la presenza di un'interazione tra i due parametri di processo, anch'essa di importanza calante all'aumentare dell'usura.

In figura 5.1 e 5.2 sono riportati gli andamenti dei due modelli sperimentali.





**Figura 5.1: modello sperimentale per perlina nuova**



**Figura 5.2: modello sperimentale per perlina usurata (30 dischi asportati) con parametri di taglio variabili**



Grafico 9: valori registrati e forniti dal modello sperimentale del vol. di materiale asportato nell' u.d.t. da perlina nuova, in funzione della vel. di taglio e per diverse forze di contatto

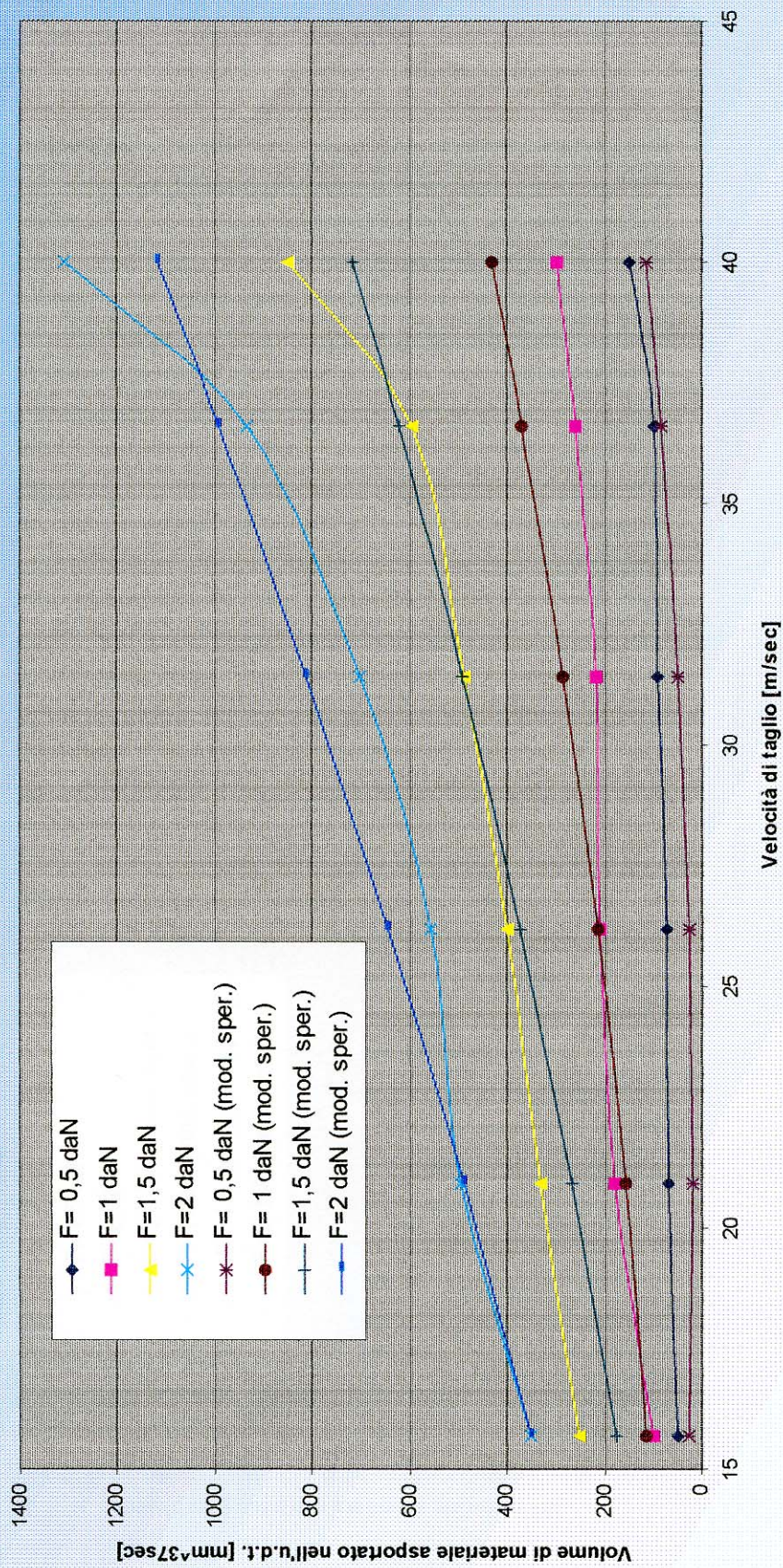




Grafico 10: valori registrati e forniti dal modello sperimentale del vol. di materiale asportato nell'u.d.t. da perlina usurata a parametri di taglio variabili (dati rilevati dopo 30 dischi lavorati)

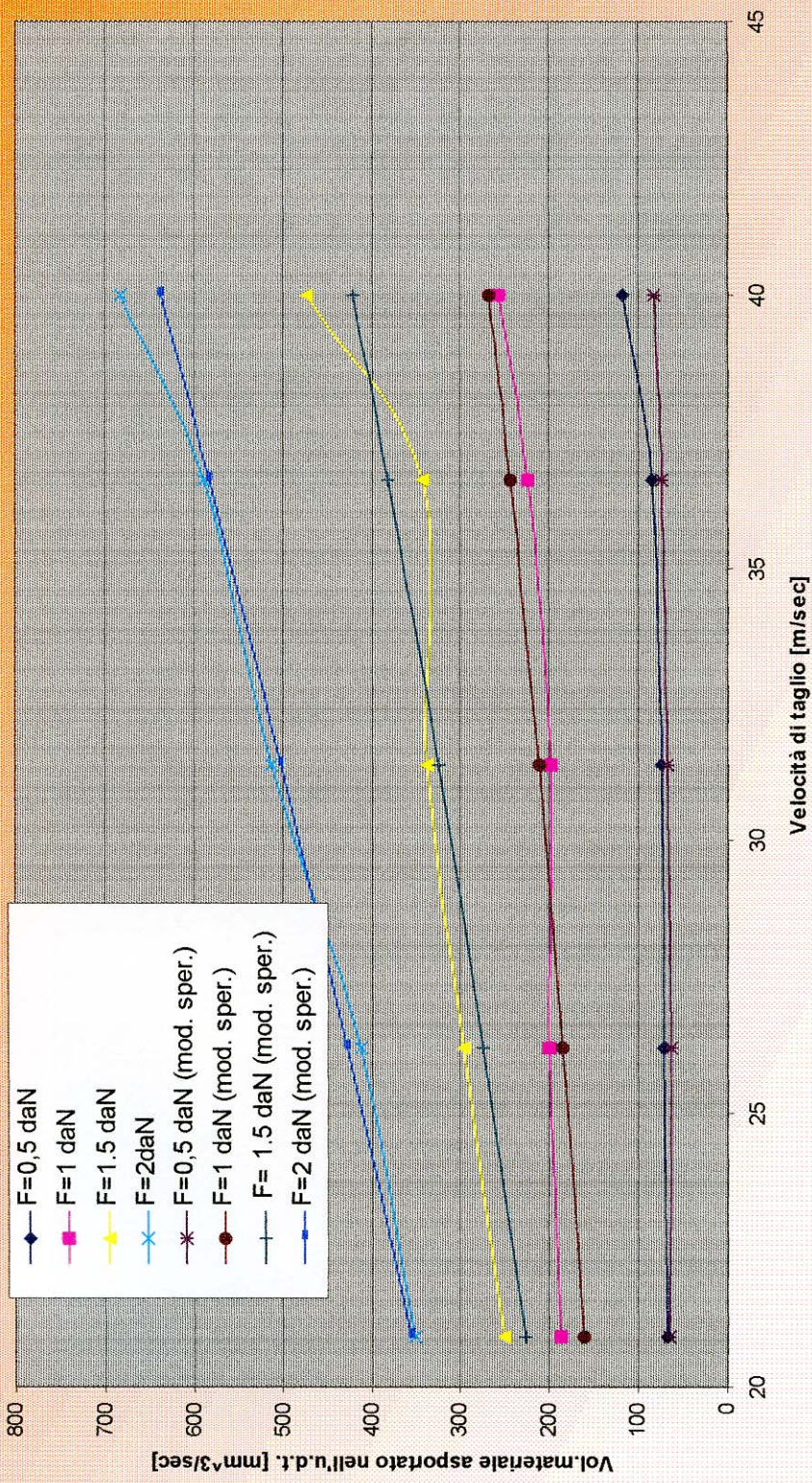
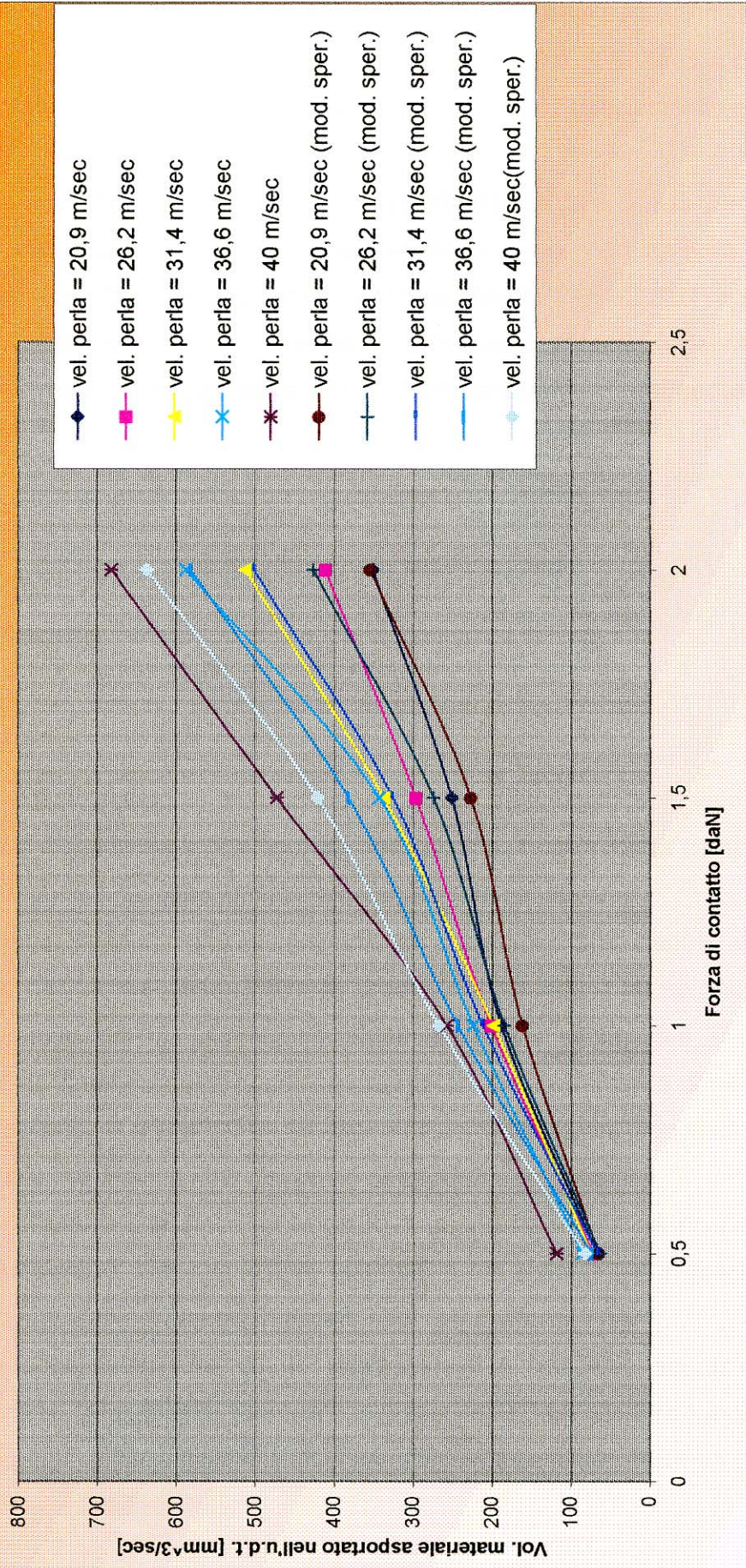




Grafico 11: valori registrati e forniti dal modello sperimentale del vol. di materiale di asportato nell'u.d.t. per perlina usurata lavorando in condizioni variabili (dati rilevati dopo 30 dischi lavorati)





I grafici 9,10 e 11 propongono un confronto tra le curve ottenute dai modelli mediante una loro sezione sia con piani a forza costante (9 e 10) che con piani a velocità costante (11), e le interpolazioni dei dati acquisiti direttamente dalla macchina.

L'approssimazione è decisamente buona per la perlina usurata e si può ritenere soddisfacente anche per la nuova; in quest'ultimo caso, l'andamento del modello sperimentale non è molto preciso per forze elevate (1,5 e2 daN) agenti alla velocità massima (40 m/s) in quanto non riesce a seguire fedelmente l'impennata che i valori di volume asportato nell'u.d.t presentano realmente per quei parametri.

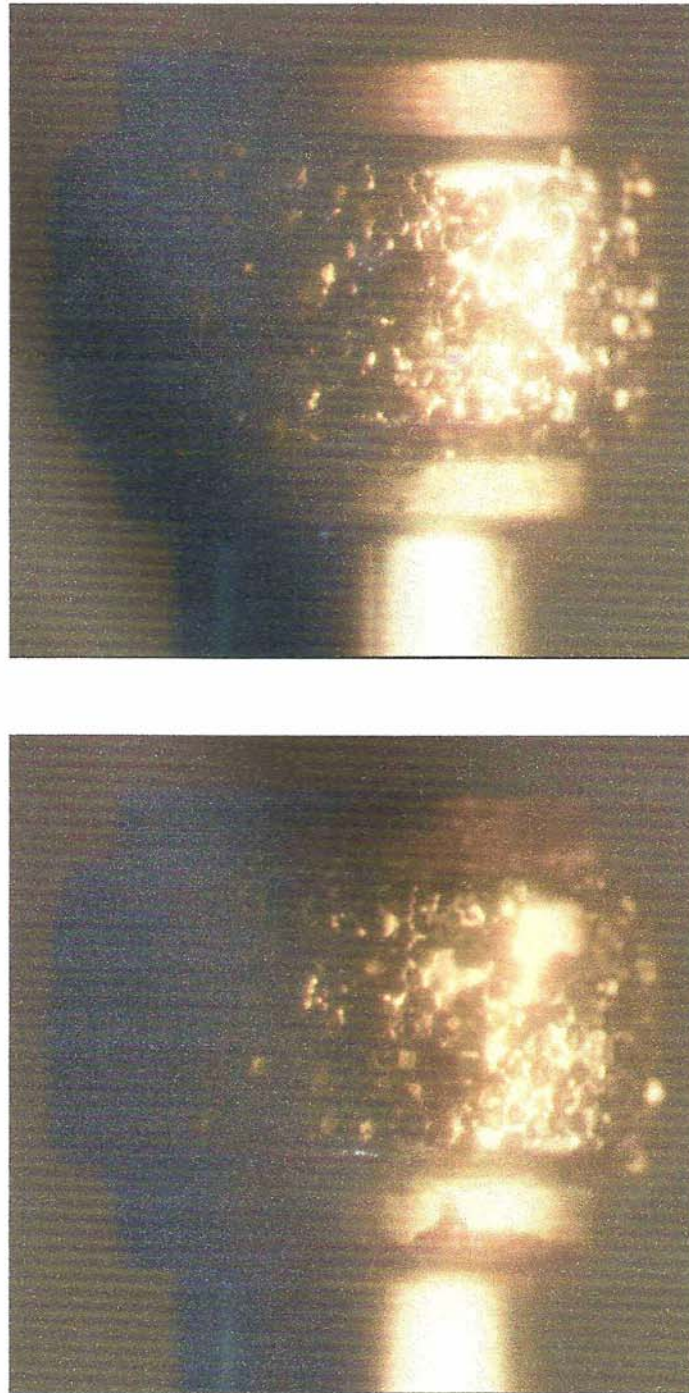
### **5.3 Osservazione microscopica dello stato dei grani diamantati**

Le figure 5.3 e 5.4 mostrano un immediato confronto tra lo stato dei grani per una perlina nuova e per una perlina usurata dall'asportazione di trenta campioni di marmo con parametri di taglio variabili con sequenza random.

Sono evidenti per l'utensile usato le zone in cui i grani sono stati espulsi dalla matrice legante, così come sono chiare le protrusioni elevate e gli spigoli vivi che essi presentano da nuovi. Dall'immagine di destra di fig. 5.4 si può osservare come la dimensione di suddette protrusioni sia nettamente diminuita ed i taglienti abbiano assunto forme in prevalenza tondeggianti, ad ulteriore conferma della decisa diminuzione del tasso di asportazione rilevata.

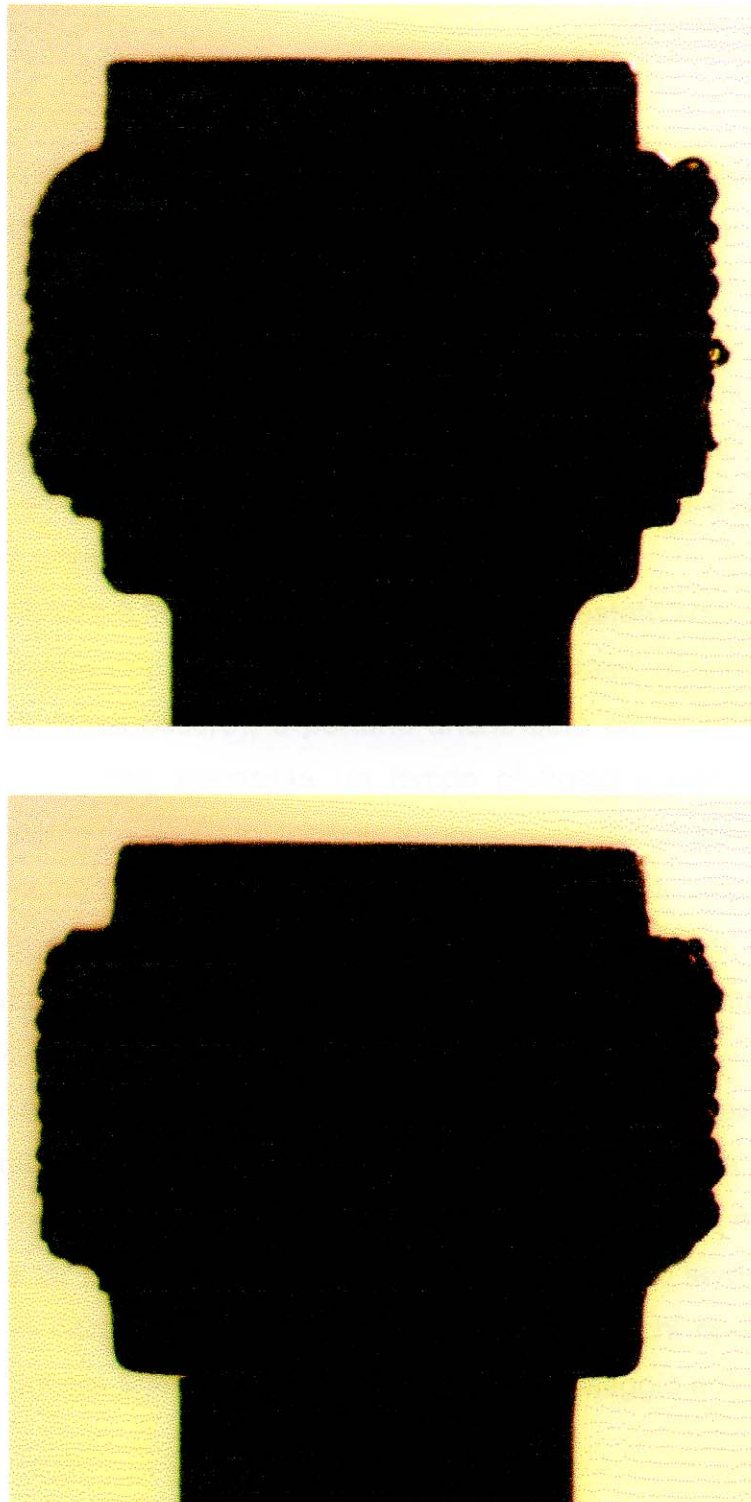
Attualmente è in fase di completamento un mini-supporto per l'alberino porta-perlina, che, attraverso il piccolo motore elettrico di cui è dotato, è in grado di far ruotare stelo e quindi perlina ad intervalli angolari costanti.

Posizionandolo opportunamente su un profilometro, è possibile acquisire il profilo della perlina, in qualsiasi momento dei test si voglia, sempre lungo le solite generatrici, in modo da ottenere un confronto realmente significativo dello stato d'usura dei grani diamantati.



**Figura 5.3:** osservazione al microscopio di una perlina nuova (sopra) e della medesima usurata (sotto) dopo aver asportato  $6300 \text{ cm}^3$  di marmo con parametri di taglio variabili all'interno dei range impostati per il piano di sperimentazione





**Figura 5.4 : osservazione al microscopio con illuminazione in controluce della medesima perlina di fig. 5.3**

## CONCLUSIONI

La validazione del modello sperimentale elaborato per il maggior numero di situazioni possibili che prevedano ancora l'abrasione di marmo Bianco di Carrara con perline elettrodeposte, è l'obbiettivo principale dell'immediato futuro.

Per un tempo leggermente più lontano il desiderio è quello di poter estendere la conoscenza della modalità d'usura e la determinazione dei parametri di taglio necessari ad un'ottimizzazione del processo in funzione di essa, anche per l'uso di perline sinterizzate e per la lavorazione di graniti.

Non deve ingannare il fatto che ad oggi siano state testate solo due perline (la terza è attualmente in prova); questi utensili hanno tassi di usura molto bassi (come del resto deve essere), e portarle anche solo ad un terzo o alla metà della propria vita utile, necessita un tempo piuttosto elevato per qualsiasi parametro tecnologico adottato. Inoltre i tempi di esecuzione della prova stessa sono intrinsecamente lunghi, non tanto per la fase di asportazione ma, soprattutto, per quella di preparazione dei solchi di scarico sul disco lapideo, data la lentezza dell'avanzamento dell'apposita fresa diamantata e del suo ritorno a vuoto.

Aggiungendo a ciò il fatto che sempre in fase di sperimentazione possono capitare piccoli inconvenienti che ne rallentano il corso, è facile capire come il raggiungimento di risultati significativi non sia possibile in tempi molto brevi.

Si vuole infine far presente che i risultati riportati in questo lavoro di tesi sono stati esposti in occasione di due importanti ritrovi per chi opera nel settore lapideo quali la fiera *Marmi & Macchine* a Carrara in Maggio e quella di Verona in Ottobre.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] **D. Pandolfi, O. Pandolfi** : *La Cava* – Belfiore grafica – Carrara , gennaio 1989.
- [2] **P. Primavori** : *Pianeta pietra* – Giorgio Suzi editore – Verona, maggio1999.
- [3] **A Di Ilio** : *Sviluppo di un modello di usura per utensili diamantati impiegati nel taglio di materiali lapidei* – Atti secondari, riunione progetto di ricerca “Tecnologie di lavorazione delle pietre naturali”. Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione, Pisa, Novembre 2002.
- [4] **G. Tantussi** : Prima relazione su “*Sviluppo e realizzazione di una macchina di prova per l’ottimizzazione del taglio di pietre naturali con perline diamantate*” – Atti seconda riunione progetto di ricerca “Tecnologie di lavorazione delle pietre naturali”. Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione, Pisa, Novembre 2002.
- [5] **F. P. Loperfido** : *Completamento e impiego di una apparecchiatura di prova per lavorazioni su materiali lapidei* – Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università degli studi di Pisa, Marzo 2003.
- [6] **Gianneschi C.** - *Analisi delle problematiche connesse al taglio di materiali lapidei con il filo diamantato* – Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università degli studi di Pisa, 1998.
- [7] **Funaioli, Maggiore, Meneghetti** - *Lezioni di meccanica applicata alle macchine* - Bologna, 1991, Patron Editore, Cap.11.



- [8] **Tantussi, G.; Lanzetta, M.**, - *GR4: Macchina innovativa per il taglio di materiali lapidei mediante filo diamantato* – Relazione finale relativa alla ricerca svolta in collaborazione tra la ditta Lochtmans s.r.l. e l'Università degli studi di Pisa, Settembre 97, Atti del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università degli Studi di Pisa, n. 27 (2001).
- [9] **Bortolussi A., Ciccu R., Manca P.P., Massacci G., Cabiddu P.** – *Valutazione delle prestazioni del filo diamantato mediante prove di laboratorio* – Atti convegno Internazionale ANIM su situazione e prospettive industria lapidea, Cagliari, 3-5 Aprile 89.
- [10] **Lochtmans s.r.l.** – *Tagliatrice a filo diamantato* – Manuale d'uso e manutenzione, Gennaio 95.
- [11] **La Posta A., Loperfido F.P., Menichetti S.** – *Macchina di prova per lo studio di procedimenti di taglio di materiali lapidei con filo diamantato* – Progetto didattico di Costruzione di Macchine, corso di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Pisa, 1999.
- [12] **Carluccio S.E.C., Giacobbe A.** – *Apparecchiatura di prova per lavorazioni su materiali lapidei* – Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università degli studi di Pisa, 2002.
- [13] **Carrino L., Di Ilio A.M., Monno M., Tantussi G., Turchetta S.** *Manufacturing technologies of ornamental stones, A.I.Te.M VI*, Atti della sesta Conferenza dell'Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica, Ed. L. Carrino, Gaeta (LT), Italia, 8-10 Settembre 2003.
- [14] **Biasco G.** - *La tecnologia del diamante nelle cave di granito - ACIMM for marble.*

- [15] **Wright D.N.** - *La predizione dell'usura del diamante nella segazione della pietra* - Marmo Macchine.
- [16] **Carrino L., Polini W., Turchetta S.** – *Wear progression of diamond mills: a microgeometric study* – Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Cassino, 2002.
- [17] **Asche J.** – *Gli utensili diamantati nella lavorazione della pietra naturale – Il diamante: applicazioni e tecnologia*, G&M Associated S.n.c. Editore, Milano, Dicembre 1999.
- [18] **Carmignani C.** – *Dinamica Strutturale – Edizioni ETS, 2001.*
- [19] **Malkin S.** – *Grinding technology* – Ellis Horwood Limited, Chichester, England, 1989.
- [20] **Frederick Bradley** – *Marble Quarring – L'escavazione del marmo*, Pacini Editore, Aprile 1999.

## RINGRAZIAMENTI

*Desidero esprimere la mia profonda gratitudine al Prof. Ing. Giovanni Tantussi per il suo costante aiuto, la sua disponibilità, e la capacità di mettere a mia disposizione tante delle sue conoscenze durante lo svolgimento di questo lavoro.*

*Vorrei altresì ringraziare il Dott. Ing. Michele Lanzetta per i preziosi consigli forniti in campo informatico ed il Dott. Ing. Valter Romoli per l'appoggio dato, grazie alla sua esperienza nel settore tecnico, in modo semplice nonché molto utile.*

*La mia riconoscenza è rivolta anche a tutti i tecnici del Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione con i quali ho avuto modo di collaborare: il sig. G. Moretti, il sig E. Peroni, il sig F. Antonelli e soprattutto il sig. M. Giuri addetto alla macchina di prova. Tutti sono stati amici e competenti colleghi per tutta la durata del mio lavoro.*



*Desidero esprimere il ringraziamento più sentito alla mia famiglia, che, sostenendomi moralmente ed economicamente, ha permesso che giungessi al termine di quest'avventura.*