

Dottorato di ricerca in  
Meccanica e scienze avanzate dell'ingegneria (DIMSAI)  
Progetto n°4 – Meccanica dei materiali e processi tecnologici  
CICLO XXIV

Settore Concorsuale di afferenza: 09/A3 PROGETTAZIONE INDUSTRIALE,  
COSTRUZIONI MECCANICHE E METALLURGIA

Settore Scientifico-Disciplinare: ING IND 14 PROGETTAZIONE MECCANICA E  
COSTRUZIONE DI MACCHINE

**Studio e sperimentazione di leghe ad elevata  
deformazione per applicazioni nel settore della  
prima lavorazione di materiali lapidei**

Coordinatore:  
Chiar.mo Prof. Ing. Vincenzo Parenti Castelli

Relatore:  
Chiar.mo Prof. Ing. Giangiacomo Minak

Tesi di Dottorato di:  
Ing. Giuseppe Lucisano



2012

Dottorato di ricerca in Meccanica e  
scienze avanzate dell'ingegneria  
CICLO XXIV

Settore Concorsuale di afferenza: 09/A3 PROGETTAZIONE  
INDUSTRIALE, COSTRUZIONI MECCANICHE E METALLURGIA

Settore Scientifico-Disciplinare: ING IND 14 PROGETTAZIONE  
MECCANICA E COSTRUZIONE DI MACCHINE

Studio e sperimentazione di  
leghe ad elevata  
deformazione per  
applicazioni nel settore della  
prima lavorazione di  
materiali lapidei

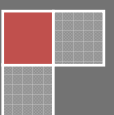
Coordinatore Dottorato

Prof. Vincenzo Parenti Castelli

Relatore

Prof. Giangiacomo Minak

Ing. Giuseppe Lucisano  
Alma Mater Studiorum Università di Bologna  
15/03/2012



# 1. SOMMARIO

---

<b>1. SOMMARIO</b> .....	<b>4</b>
<b>2. ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>3. IL CONTESTO LAPIDEO</b> .....	<b>7</b>
3.1. IL MERCATO LAPIDEO .....	7
3.2. I SISTEMI DI PRODUZIONE E GLI UTENSILI ALLO STATO DELL'ARTE .....	10
<b>4. I LIMITI DELLE TECNOLOGIE ALLO STATO DELL'ARTE</b> .....	<b>16</b>
4.1. L'UTENSILE (CAVO DIAMANTATO) .....	16
4.2. IMPLICAZIONI SUI SISTEMI DI PRODUZIONE.....	18
<b>5. STUDIO E MODELLAZIONE DI LEGHE AD ELEVATA DEFORMAZIONE PER APPLICAZIONI NEL SETTORE DELLA PRIMA LAVORAZIONE DI MATERIALI LAPIDEI</b> .....	<b>19</b>
5.1. ANALISI CONCETTUALE DELLE CONDIZIONI DI TAGLIO A FILO E IDENTIFICAZIONE DI PROCEDURE DI MODELLAZIONE E SPERIMENTAZIONE,.....	19
5.2. STUDIO E QUALIFICAZIONE DI LEGHE SMA PER APPLICAZIONE SU CAVO UTENSILE NEL PROCESSO DI TAGLIO DI MATERIALI LAPIDEI,.....	24
5.3. SVILUPPO DI NUOVI CAVI UTILIZZANDO SMA IN ALTERNATIVA AL TRADIZIONALE TREFOLO IN ACCIAIO. ....	29
5.4. SIMULAZIONE STATICA E DINAMICA DEL COMPORTAMENTO DEI MATERIALI IN ANALISI .....	31
<b>6. PROTOTIPAZIONE DI CAVI UTENSILE IN LEGHE AD ELEVATA DEFORMAZIONE</b> .....	<b>34</b>
6.1. REALIZZAZIONE E TEST/CARATTERIZZAZIONE DEI CAVI PROTOTIPALI IN LEGA NITI SECONDO LE SPECIFICHE DEFINITE NEL PROGETTO HI-CUT; .....	34
6.2 STUDIO DELLA PROCEDURA DI SPERIMENTAZIONE IN MERITO AI PARAMETRI DI PROCESSO DI TAGLIO LAPIDEO .....	47
<b>7. VALIDAZIONE INDUSTRIALE DI CAVI NITI</b> .....	<b>55</b>
7.1. SPERIMENTAZIONE SUI PARAMETRI DEL PROCESSO DI TAGLIO LAPIDEO E DELLE PRESTAZIONI DEI CAVI IN CONDIZIONI INDUSTRIALI. ....	55
7.2. CONCLUSIONI: L'APPLICAZIONE INDUSTRIALE DEL CAVO IN SHAPE MEMORY ALLOY .....	60
7.3. PROBLEMATICHE APERTE E ULTERIORI SVILUPPI PREVISTI PER L'APPLICAZIONE INDUSTRIALE DEL CAVO IN SHAPE MEMORY ALLOY .....	64
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>66</b>
<b>9. PUBBLICAZIONI</b> .....	<b>68</b>

## 2. ABSTRACT

---

Nel settore della estrazione e prima lavorazione di materiali lapidei graniti, marmi, ecc. (taglio di lastre), la tecnologia allo stato dell'arte prevede l'impiego di "utensili in cavo" ossia di un utensile composto da un cavo in trefolo di acciaio sul quale sono collocate, opportunamente distanziate, delle "perline" sinterizzate/elettrodeposte costituite da un legante e da diamante industriale.

I limiti attuali degli utensili in cavo, e del processo di lavorazione nel suo insieme, sono intrinseci alla geometria propria dei componenti, il trefolo metallico e la "perlina", e alla necessità di personalizzazione in base ai diversi materiali in lavorazione.

La tecnologia dell'utensile in cavo attuale comporta, inoltre come ricaduta, una notevole complessità del sistema di produzione "macchina" e in particolare limitata affidabilità.

Il superamento delle problematiche di processo attuali può essere realizzato grazie a una innovazione sull'utensile e sulla tecnologia di lavorazione.

Nel corso del triennio di dottorato l'attività si è svolta affrontando, congiuntamente alla Co.Fi.Plast Srl (azienda piemontese leader nella produzione di utensili in cavo diamantato per taglio di materiali lapidei e promotrice dell'attività nell'ambito del programma di R&S Manunet Hi-CUT), i diversi aspetti necessari dapprima a modellare, poi a realizzare e testare in laboratorio e infine a validare in condizioni di produzione effettive, una nuova generazione di "cavi utensile" per il taglio di materiali lapidei.

La ricerca è iniziata dall'analisi delle problematiche legate alle tecnologie allo stato dell'arte, che prevede, per il taglio delle lastre di materiali lapidei quali graniti, marmi, ecc., l'impiego di utensili in cavo ossia di un utensile composto da un cavo in trefolo di acciaio di svariati metri di lunghezza sul quale sono collocate, opportunamente distanziate e bloccate mediante materiali polimerici, delle "perline" sinterizzate/elettrodeposte. Tali "perline" abrasive (elementi metallici cilindrici infilati lungo il cavo) sono ricoperte da una matrice nella quale sono legati frammenti di diamante industriale.

Lo studio ha identificato i limiti degli utensili in cavo e le problematiche/complexità conseguenti in termini di sistemi e processo di lavorazione.

L'analisi ha poi portato alla "Modellazione concettuale delle condizioni di taglio a filo" considerando in particolare la geometria, dimensioni e proprietà dei materiali dei componenti del filo, i parametri del processo di taglio e le caratteristiche microscopiche e meccaniche dei materiali lapidei.

Successivamente è stato affrontato lo "Studio e la qualificazione delle leghe a memoria di forma (Shape Memory Alloys - SMA) per applicazione su cavo utensile nel processo di taglio di materiali lapidei". Lo studio ha portato a un risultato teorico-concettuale relativo alla analisi statica e dinamica non lineare della SMA e a dettagliate risultanze sperimentali in termini di test/caratterizzazione dei cavi prototipali realizzati in lega NiTi.

I campioni di cavo, con sezioni di 2,5, 3, 3,5 mm, sono stati caratterizzati mediante analisi meccanica a trazione e torsione, analisi calorimetrica DSC al fine di verificare che il processo di montaggio delle "perline" sul cavo non alterasse la microstruttura del cavo NiTi. È stata infine effettuata una analisi tramite microscopia ottica al fine di valutare l'effettiva tenuta della connessione tra il cavo e la "perlina" abrasiva su di esso riportato e fornire ulteriori elementi utili alla preparazione del cavo diamantato per le prove sperimentali di validazione.

La validazione sperimentale è stata effettuata a valle di una caratterizzazione del materiale lapideo di riferimento (Diorite) mediante misura della micro durezza e rilevazione della componente tangenziale  $F$  della forza resistente del materiale mediante penetratore appositamente realizzato.

La validazione è stata realizzata mediante una macchina di taglio monoutensile opportunamente strumentata per rilevare i parametri di lavoro e le condizioni di sollecitazione del cavo utensile realizzato in SMA nelle condizioni taglio della Diorite.

Il risultato ottenuto, in primis in termini di applicazione industriale della ricerca, è da considerare estremamente significativo in quanto la Co.Fi.Plast, leader nazionale nella produzione di cavi utensile e macchinari per taglio di materiali lapidei, implementerà innovazioni radicali sulle macchine di lavorazione multiutensile come ricaduta della presente ricerca.

## 3. IL CONTESTO LAPIDEO

---

### 3.1. IL MERCATO LAPIDEO

---

L'ambito di riferimento è il settore della lavorazione dei materiali lapidei e in particolare il taglio di semilavorati in lastre. La tecnologia di lavorazione prevede l'impiego di sistemi di produzione automatizzati basati su macchine di taglio a filo.



Il contesto dello scenario globale evidenzia la estrema dinamicità del mercato Lapideo, stimato crescere ad un tasso annuo di circa il 6-7% nel primo decennio del XXI secolo.

Nell'ultimo triennio il rallentamento ha portato a un consolidamento dei mercati maturi con una crescita nell'ordine del 5% annuo e una stima del 6% annuo medio fino al 2015. Il settore porterà le proprie dimensioni fino a circa 160 milioni di tonnellate annue estratte nel 2015.

Lo sviluppo previsto per i prossimi anno sarà concentrato prevalentemente in Asia, ma anche in altri importanti paesi quali Brasile e Turchia che continueranno a crescere a fronte di un ruolo sempre minore per i principali produttori e consumatori Europei.

La costante crescita dei consumi sottolinea un bisogno continuo di miglioramento nell'efficienza produttiva, con particolare riferimento alla necessità di ridurre i grandi volumi di scarto che caratterizzano il settore. In questo contesto, le prospettive applicative del filo diamantato risultano estremamente attraenti.

Si è avuto un rapido incremento nell'uso del filo diamantato che comunque ad oggi rimane confinato a meno del 20% delle lavorazioni estrattive in cava, ed a meno del

5% della prima lavorazione per la produzione di lastre. Relativamente a pochi anni fa, la crescita di domanda del filo diamantato è stata comunque eccezionale, attestandosi a oltre il 20% l'anno nel periodo 2001-2010.

Intorno al 50% del consumo mondiale di filo diamantato, stimato in circa 3000 km lineari, al 2010 è assunto essere nei paesi più sviluppati, principalmente in Europa, dove la penetrazione in cava si attesta intorno al 30%, ed in prima lavorazione oltre il 5%.

A seguito delle evoluzioni più recenti, le maggiori opportunità per il filo diamantato appaiono nel settore di cava, tradizionalmente l'applicazione più importante. Nonostante ciò la lavorazione in laboratorio (taglio di lastre) è particolarmente interessata all'evoluzione della tecnologia del filo.

In prima istanza, una accelerata sensibilità verso la sostituzione dei metodi "tradizionali" (esplosivi, roto percussione, etc.) con la tecnologia più efficiente ed eco-compatibile del filo diamantato è stata particolarmente evidente nelle operazioni di cava dei paesi maggiormente sviluppati. Inoltre, la tendenza verso una maggiore integrazione in cava di una parte della lavorazione, a monte della produzione di lastre, al fine di ottimizzare le problematiche ed i costi di trasporto del settore lapideo, appare sempre più importante.

Le previsioni assumono uno share di cava gradualmente ridotto in futuro, ma le implicazioni in termini assoluti sono per una domanda incrementale al 2015 di 3400 km di filo diamantato in cava (estrazione), verso quasi 1900 km in taglio delle lastre.

La fattibilità di questa eccezionale espansione, e quindi la reale dimensione del mercato futuro, saranno evidentemente influenzate dalla capacità del filo diamantato di penetrare i due segmenti applicativi di cava e lavorazione primaria. L'accesso ai nuovi mercati potenziali richiederà quindi un continuo miglioramento della tecnologia del filo diamantato, particolarmente in aspetti quali costo, produttività ed affidabilità. Miglioramento della durata filo e velocità di taglio sono percepiti come meccanismi abilitanti la crescente penetrazione del filo in cava.

Un altro fattore tecnologico di rilevanza sarà la capacità di ridurre lo spessore del filo, al fine di minimizzare lo scarto, particolarmente nel settore di prima lavorazione.



Infine, la effettiva disponibilità di macchine multifilo capaci di operare con oltre 60-70 fili contemporaneamente, sarà sicuramente una tecnologia abilitante necessaria per incrementare ulteriormente la penetrazione del filo diamantato nel settore di prima lavorazione.

### 3.2. I SISTEMI DI PRODUZIONE E GLI UTENSILI ALLO STATO DELL'ARTE

---

Tecnologie allo stato dell'arte:

Sono di seguito riassunte le principali tecnologie oggi esistenti suddivise per processi di Estrazione (estrazione da cava di bancate e blocchi di materiale lapideo) e Trasformazione (taglio in lastre di diversi spessori per successive lavorazioni/utilizzi).

Ciascuno dei due processi vede oggi tecnologie alternative qui classificate come:

Nuove Tecnologie esistenti" (quelle legate al filo) e Tecnologie classiche (le altre).

#### Tecnologie classiche per Estrazione:

Per la fase di estrazione di bancate e blocchi lapidei, la tecnologia prevalente è ancora oggi quella della rotopercussione più esplosivi o plastici espandenti. Questi sistemi di lavorazione sono caratterizzati da un elevato livello di impatto ambientale, la polverosità, l'inquinamento acustico e la scarsa ottimizzazione delle risorse non rinnovabili, scarti di materia prima elevati, inquadrano l'attuale processo di estrazione come non sostenibile, cioè con inefficienze gravi in relazione all'eco-compatibilità.

Aspetto da non trascurare è inoltre il basso livello di sicurezza per gli operatori, che in relazione alla configurazione di tali processi genera dei rischi non calcolabili, per i quali gli enti normativi stanno definendo normative particolarmente restrittive.

L'applicazione di queste tecniche, introduce notevoli costi legati alla difettosità dei risultati e alla labile sicurezza d'esecuzione del processo.

In realtà le tecnologie basate su materiali plastici espandenti "espansione/esplosione controllata" hanno, soprattutto negli ultimi 10-15 anni consentito una riduzione significativa dei rischi per gli operatori e dell'impatto ambientale del processo. Tali tecnologie però non consentono, a differenza di quelle basate sul filo con boccole sinterizzate in diamante, di realizzare miniere sotterranee con relativo bassissimo impatto ambientale e senza effetti evidenti sul territorio.

### Tecnologie classiche per Trasformazione:

La maggior parte dei lapidei (graniti, marmi, ecc.) viene impiegata sotto forma di lastre, la fase centrale della lavorazione dei lapidei è proprio la trasformazione dei blocchi in lastre (primo taglio), che avviene in impianti di segagione denominati "segherie"/"laboratori".

Per la fase di trasformazione e segagione di blocchi in lastre (semilavorati), si utilizzano prevalentemente telai alternativi a lame multiple, che per gli altissimi costi di installazione e il conseguente lungo ammortamento industriale sono di difficile sostituzione. Tali soluzioni sono inoltre molto poco performanti, come si evidenzia in tabella seguente ed hanno inoltre un elevato impatto sull'ambiente a causa dell'impiego di materiali abrasivi mono-uso e relativa produzione di notevoli scarti inquinanti.



La struttura tipica è costituita tutt'ora dal telaio orizzontale, un sistema a biella-manovella.

Tale tecnologia prevede una struttura a portale costituita da due colonne unite alla sommità da una traversa. Lungo le due colonne scorrono verticalmente delle slitte che fungono da guida orizzontale per il movimento della lama, man mano che il blocco viene tagliato la lama e quindi le slitte vengono abbassate, permettendo così il taglio completo del blocco. La lama viene tesa mediante tenditori oleodinamici.

Per la movimentazione del blocco la macchina è munita di un carro portablocco che può essere motorizzato. L'utensile a lama deve essere opportunamente raffreddato e lubrificato grazie ad un impianto idrico per la distribuzione di acqua. Per ridurre il

consumo l'acqua viene riutilizzata e posta in ricircolo attraverso un sistema di filtraggio che la ripulisce da residui derivanti dall'operazione di taglio.

Sono state realizzate anche se in numero limitato installazioni con telai verticali che però presentano problematiche reali che ne hanno limitato la diffusione.

#### Nuove Tecnologie esistenti per Estrazione:

Per la fase di estrazione dei blocchi lapidei sono state sviluppate, grazie alla tecnologia del filo diamantato applicazioni a basso impatto ambientale e ad elevata sicurezza verso gli operatori. Tale tecnologia, vede le principali problematiche nel "sistema filo" in quanto, come accennato in precedenza, tale strumento non ha raggiunto un sufficiente sviluppo tecnologico legato alla specifica applicazione.

Si evidenziano infatti problemi relativi alla rigidità, resistenza statica ed a fatica del cavo, ed in particolare si rilevano notevoli criticità nelle zone di giunzione di cavi che, dovendo in molti casi essere ripristinati in seguito a rotture, costituiscono punti di debolezza. Tale limite è legato alla differenza sostanziale tra le giunzioni iniziali, realizzate in condizioni ottimali e quelle effettuate in cava dove, nonostante le attrezzature fornite

all'operatore, il procedimento non è adeguatamente standardizzato.



### Nuove Tecnologie esistenti per Trasformazione:

La tecnologia del filo ha applicazioni molteplici, dalla riduzione e riquadratura dei blocchi lapidei, dal taglio delle lastre alla lavorazione di manufatti ecc.



Per quanto riguarda l'applicazione primaria, riquadratura di blocchi dopo l'estrazione ed il taglio delle lastre, sono state realizzate negli ultimi anni applicazioni diverse e soluzioni multifilo che vedono limitazioni notevoli a causa dell'affidabilità del supporto in acciaio (filo a trefolo) oggi in uso.

Le applicazioni allo stato dell'arte, anche se ancora migliorabili, consentono di effettuare lavorazioni in tempi notevolmente minori rispetto alle tecnologie tradizionali, con costi ridotti sia di installazione sia di esercizio e con impatto ambientale notevolmente ridotto grazie all'assenza di materiali di consumo inquinanti.



Si riporta di seguito un elenco di sintesi degli elementi distintivi delle "Nuove Tecnologie esistenti" rispetto alle "Tecnologie Classiche"

#### Estrazione:

- granito: produttività competitiva rispetto alle tecnologie distruttive (esplosivo, flame-jet),
- l'operatore può dedicarsi ad altre attività durante il taglio,

- ottimizzazione del recupero nell'estrazione dei blocchi,
- spessore limitato del taglio,
- è il metodo migliore per materiali fragili,
- limitatissime vibrazioni,
- è l'unico sistema utilizzabile in rocce altamente fratturate o sui graniti dove il flame-jet non è efficace,
- versatilità nel caso di tagli in zone impervie,
- livello di impatto ambientale minimo (possibilità di estrarre materiali da miniere non visibili,
- miglioramento della resa nelle cave inteso come rapporto tra materiale utilizzabile e materiale asportato al sito.

### Trasformazione:

- elevata produttività,
- elevata flessibilità nei lotti produttivi,
- spessori di taglio più sottili,
- elevato livello di finitura delle superfici, per le successive lavorazioni,
- impatto acustico ridotto,
- assenza di fanghi speciali inquinanti,
- tempi ridotti di approntamento dei tagli,
- limitatezza delle emissioni di polveri,
- insostituibilità in alcune realizzazioni nello spazio (superfici curve, superfici di ogni tipo),

Con particolare riferimento alle applicazioni di Trasformazione, e come sarà meglio illustrato nel seguito, si evidenzia che gli attuali limiti sono dovuti ad aspetti affidabilistici e di durata del cavo utensile.

In particolare è estremamente frequente che la durata del cavo di supporto non sia adeguatamente tarata rispetto alla durata della componente abrasiva dell'utensile. Questo comporta danni dovuti all'interruzione della produzione e al calo della qualità del manufatto (rottura del cavo) con elevato dispendio economico dovuto al mancato completo utilizzo della componente abrasiva.

Ulteriore elemento di criticità dei sistemi di taglio per Trasformazione allo stato dell'arte è la complessità di alcune unità funzionali deputate al controllo del pensionamento del cavo in-process. Tal aspetto, estremamente critico e complesso soprattutto per macchine multifilo è alla base delle numerose attività di studio e innovazione del settore in particolare sul fronte "sistema di macchina".

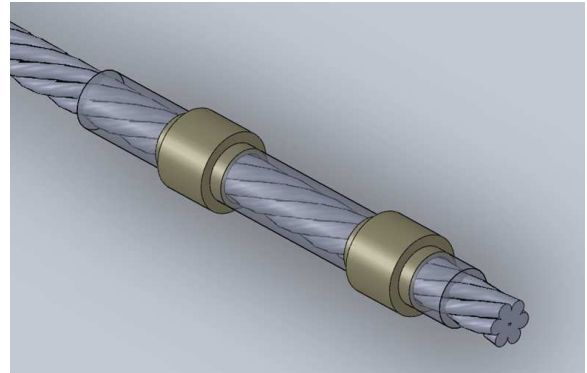
## 4. I LIMITI DELLE TECNOLOGIE ALLO STATO DELL'ARTE

---

### 4.1. L'UTENSILE (CAVO DIAMANTATO)

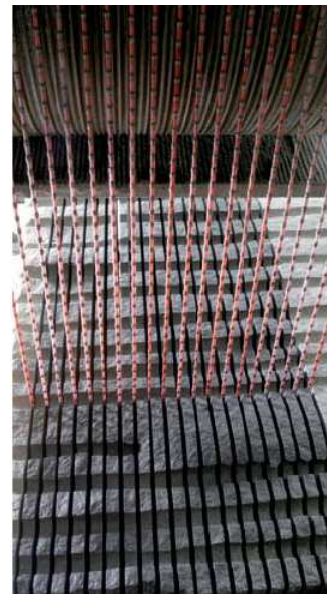
---

Con riferimento alla tecnologia del cavo diamantato oggi disponibile, che rappresenta già un notevole avanzamento tecnologico rispetto alla tecnologia del telaio alternativo, si evidenziano di seguito alcuni dei principali limiti e problematiche.



Questi rappresentano di fatto un freno alla diffusione di una tecnologia (quella del filo diamantato appunto) che potrebbe in pochi anni consentire enormi benefici in termini di riduzione di sprechi di materia prima e di inquinamento legato al processo di trasformazione di materiali lapidei.

Uno dei principali limiti è, come detto, la difficoltà di ottimizzare durata del cavo di supporto e dell'elemento abrasivo in modo congiunto. Questa problematica è spesso legata alla difficoltà di prevedere la vita a fatica del cavo soprattutto considerando le variazioni di geometria del materiale in lavorazione e, conseguentemente, il livello di flessione subito dal cavo.





La tipologia di cavo oggi impiegata (trefolo di acciaio normalmente impiegato per sollevamento o movimentazioni di limitata dinamica) subisce una sollecitazione ad alta velocità che, nonostante gli accorgimenti impiegati ne altera la geometria (anche con effetti di svolgimento torsionale) in modo significativo.

In ultimo la applicazione delle “perline” con matrice ed elementi abrasivi sinterizzati rappresentano degli elementi di discontinuità e punto di innesco di sollecitazioni estremamente elevate. La gestione di tale aspetto è reso ulteriormente critico dal calare delle dimensioni dei cavi di supporto che, proporzionalmente, hanno, negli ultimi anni, ridotto la sezione più della perlina abrasiva.

## 4.2. IMPLICAZIONI SUI SISTEMI DI PRODUZIONE

---

I sistemi di taglio multifilo oggi disponibili evidenziano alcune problematiche legate alle modalità di montaggio/smontaggio rapido dei cavi utensili che comportano elevati tempi di fermo macchina con conseguenti costi. I principali elementi oggetto di sviluppo degli ultimi anni sono stati legati allo studio di nuove geometrie di macchina e adozione di materiali plastici per ridurre



gli attriti in fase di impiego (cavo-puleggia) e per ridurre le potenze in gioco e quindi facilità di attrezzaggio.

Notevoli sono stati anche gli sforzi per sviluppare dispositivi di tensionamento per il recupero della differente lunghezza dei fili durante la lavorazione di taglio lastre.

Questi dispositivi di tensionamento sono particolarmente complessi e essenzialmente legati alla necessità di gestire i diversi cavi utensile operanti in parallelo.

L'impiego di cavi utensile tradizionali comporta, a causa dei notevoli carichi di trazioni imposti in sede di montaggio, elevati rischi in caso di difettosità o rottura del cavo stesso con la conseguenza di dover effettuare adeguati interventi in fase di design degli impianti.

Le conseguenze di casi di eiezione o di "esplosione" del cavo utensile sono tali da dover essere considerate con interventi estremamente onerosi onde ridurre il rischio residuo.

Le tecnologie e le soluzioni che sono state oggetto del presente lavoro intendono porre le basi per superare anche tali problematiche di affidabilità e sicurezza grazie alla possibilità di ridurre considerevolmente i carichi e in gioco e la complessità mecatronica dei sistemi di produzione.

## 5. STUDIO E MODELLAZIONE DI LEGHE AD ELEVATA DEFORMAZIONE PER APPLICAZIONI NEL SETTORE DELLA PRIMA LAVORAZIONE DI MATERIALI LAPIDEI

---

### 5.1. ANALISI CONCETTUALE DELLE CONDIZIONI DI TAGLIO A FILO E IDENTIFICAZIONE DI PROCEDURE DI MODELLAZIONE E SPERIMENTAZIONE,

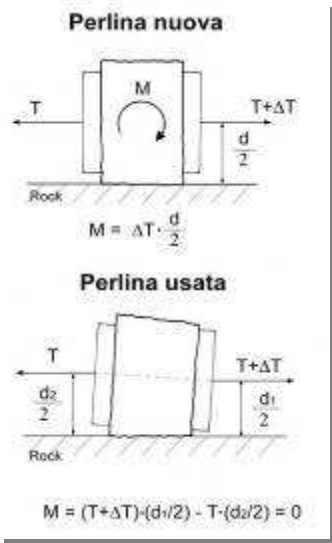
---

L'attività di studio è stata focalizzata alla identificazione e raccolta dei parametri necessari a modellare e simulare il processo di taglio mediante cavo con perline diamantate.

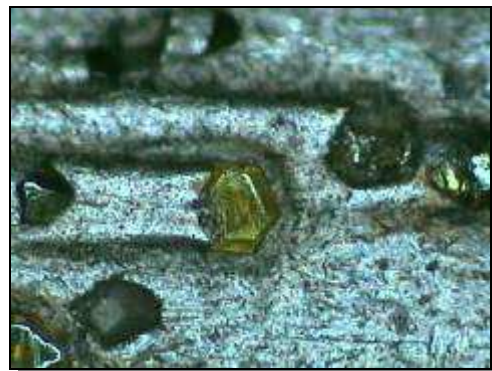
Sono stati affrontati e studiati gli aspetti relativi a:

#### Geometria e dimensioni tipiche dei componenti

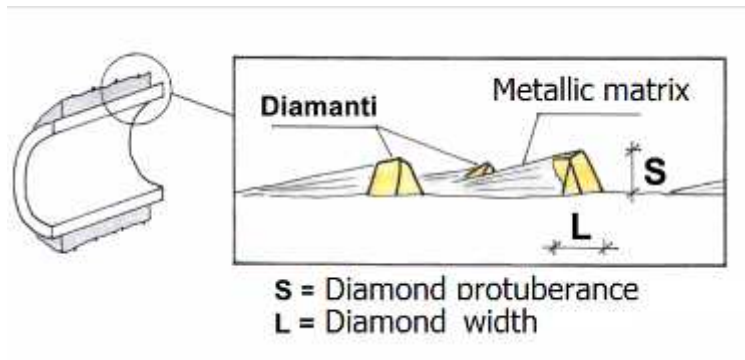
1. cavo, perline abrasive con diversi livelli di usura, granulometria del diamante inserita nella matrice,
2. pulegge motrici e condotte (su cui si involupa il cavo diamantato) sul sistema di lavorazione,
3. materiali polimerici a contatto con il cavo (lungo le pulegge) e relativo profilo,
4. dimensioni del blocco lapideo,
5. caratteristiche superficiali delle perline abrasive e del materiale lapideo,



*Geometrie perline diamantate*

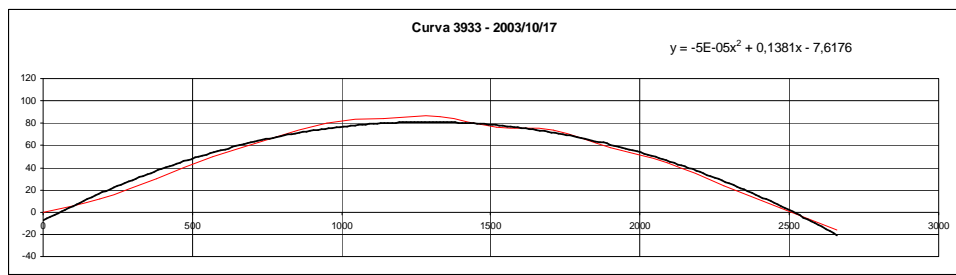


*Immagini di perline diamantate*



## Parametri di processo

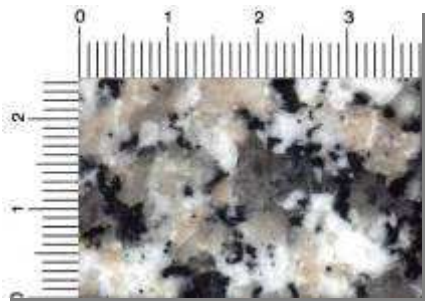
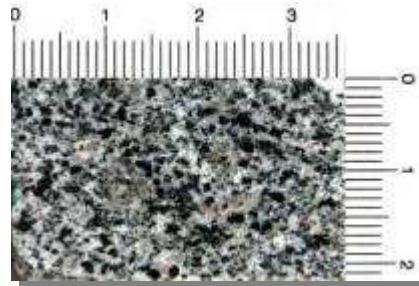
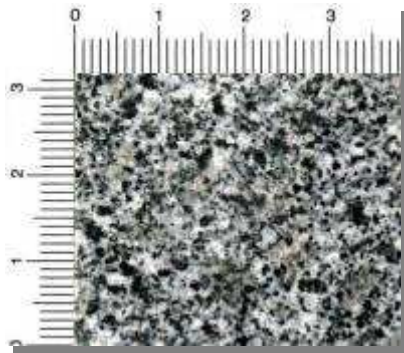
1. Velocità del cavo
2. Forze e coppie in gioco sul sistema di lavorazione
3. Curvatura del cavo durante il taglio / profilo misurato mediante laser
4. Quantitativo di acqua somministrata e asportazione di calore (input/output)



Forma tipica del cavo in lavorazione  $y = -ax^2 + bx + c$

Proprietà dei materiali (modulo elastico, coeff. di Poisons ratio, viscosità, proprietà termiche)

1. Cavo
2. Poliuretano
3. Perline abrasive
4. Diamante
5. Polimeri di ricoprimento del cavo
6. Materiale lapideo in lavorazione



*Alcune microstrutture di materiale lapideo*

### Caratteristiche microscopiche / abrasione /risultati dei test di frattura

1. Diagramma forza-spostamento per materiali lapidei tipici
2. Parametri di frattura derivanti da test di compressione
3. Risultati di altri test indicanti parametri di frattura e resistenza all'abrasione del lapideo

Le attività hanno consentito di implementare il modello del taglio integrando le competenze apportate, nell'ambito del progetto di ricerca Hi-CUT, dal partner C3M che ha sviluppato una piattaforma di simulazione multifisica. La piattaforma è stata oggetto di approfondite verifiche concettuali e sperimentali attuate da insieme alla CoFiPlast.

## 5.2. STUDIO E QUALIFICAZIONE DI LEGHE SMA PER APPLICAZIONE SU CAVO UTENSILE NEL PROCESSO DI TAGLIO DI MATERIALI LAPIDEI,

---

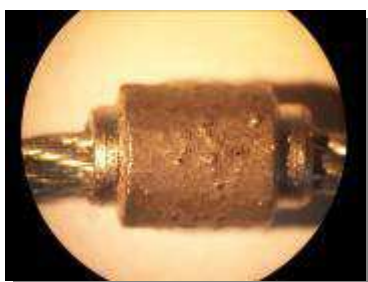
Lo studio ha visto il coinvolgimento del CNR-IENI di Lecco presso il quale sono stati effettuati diversi rilievi e analisi preliminari.

La prima fase del lavoro ha visto la partecipazione di specialisti del settore lapideo a livello nazionale e internazionale nell'ambito del progetto Hi-CUT e ha consentito di razionalizzare e analizzare:

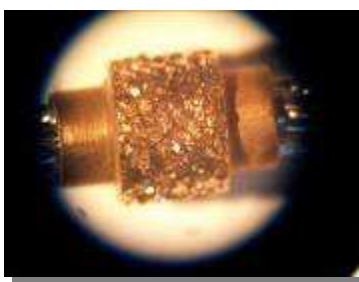
- Le caratteristiche della tecnologia oggi impiegata (cavo, suoi componenti, criticità esistenti),
- Lo stato dell'arte delle prestazioni dei cavi utensili e la definizione dei parametri di processo (velocità di taglio, in base alle caratteristiche macro dei materiali in lavorazione),
- Le problematiche meccaniche e fisiche del cavo utensile considerato quale elemento "stand-alone" e quale parte di un sistema cavo-puleggia-lapideo.

In tale ambito di attività sono state studiate le soluzioni realizzative del cavo diamantato (impiegato per applicazioni di taglio a filo utensile).

Di seguito alcune immagini caratteristiche dell'elemento "perlina" e cavo.



*Tipica "perlina" elemento abrasivo sinterizzato (applicazione tipica su granito e lapidei assimilabili)*



*Tipica "perlina" elemento abrasivo elettrodeposto (applicazione tipica su marmo e lapidei assimilabili)*



*Sezione di un trefolo in acciaio utilizzabile per la realizzazione del cavo di supporto*





*Segmento di cavo diamantato con perline sinterizzate applicate e distanziate elastomero vulcanizzato*



*Tipica superficie della "perlina" sinterizzata*

Al fine di ottenere ulteriori informazioni sul comportamento del cavo in trefolo con particolare riferimento alla condizione del processo di lavorazione di materiali lapidei è stato analizzato il modello FEM semplificato di trefolo sollecitato in condizioni di funzionamento standard di taglio lapidei.

Il filo (o fune) è rappresentato quale struttura di supporto di un insieme di perline diamantate, equamente distanziate e rigidamente fissate al filo stesso. Lo stesso è stato modellato considerando che i carichi principali che agiscono sul filo:

- Trazione: Intrinseca
- Torsione: Imposta in sede di costruzione e montaggio per consentire una rotazione alle perline durante il processo di taglio (condizione necessaria ad un consumo corretto e uniforme)

L'analisi FEM, svolta parallelamente nell'ambito progetto di ricerca Hi-CUT, ha consentito di definire alcuni elementi salienti nell'ambito delle seguenti condizioni al contorno:

- Lo sforzo di trazione varia da perlina a perlina. La sezione di "presa" della perlina nel materiale non è costante e pertanto lo sforzo di taglio, durante il taglio è differente da perlina a perlina;
- Le vibrazioni del filo durante il taglio provocano variazioni del carico verticale del filo sul materiale lapideo e conseguentemente variazioni dello sforzo di trazione lungo tutto il settore interessato al taglio;

- La presenza di pulegge provoca continue piegature del filo, ossia variazioni della direzione dell'asse del filo.

È emerso difatti che:

- In campo elastico la zona maggiormente sollecitata risulta essere la superficie esterna del trefolo centrale;
- Al crescere del passo di avvolgimento lo stato di sforzo è meno intenso, a parità di sollecitazione;
- L'unico caso a presentare zone di snervamento è il cavo con passo 20 mm e DL 3mm
- I trefoli tendono a svolgersi.

Parallelamente l'attività sperimentale ha evidenziato che la fune, a causa della sua elasticità, durante il funzionamento subisce allungamenti e accorciamenti periodici, i quali originano piccoli slittamenti sulle pulegge con criticità notevoli di gestione e stabilità del processo di taglio.

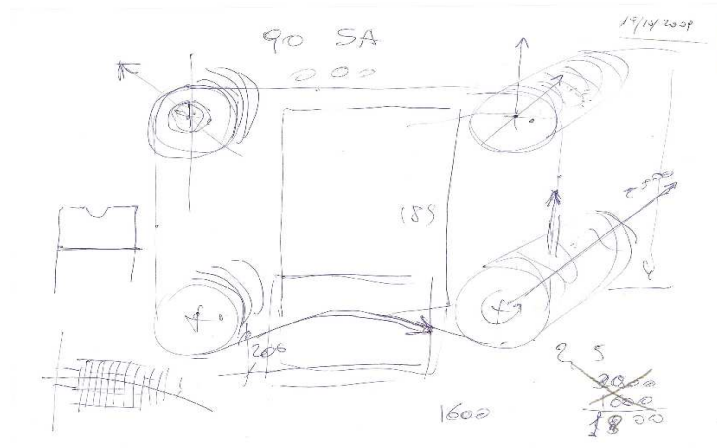
Successivamente sono stati identificati ulteriori parametri meccanico fisici necessari ad avviare la modellazione del cavo (Definizione di Modelli e simulazione del comportamento termico e meccanico dei materiali in analisi) e del sistema (macchina) di in modo da porre le basi metodologiche per valutare soluzioni "SMA-based" e nuove modalità costruttive del cavo utensile.



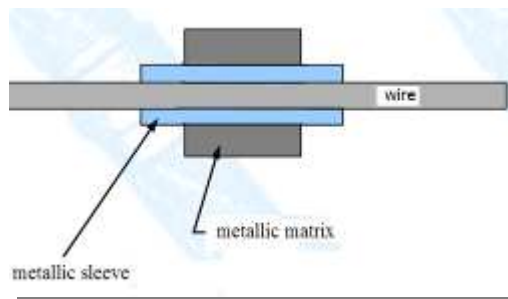
*Il cavo e il modello geometrico preliminare(monofilo)*

I parametri di riferimento per la definizione del modello sono:

1. Cavo con trefolo a tre fili (partendo da alcune esperienze svolte su cavi SMA monofilo).
2. Geometria reale di macchina di taglio con 4 pulegge D=800 mm (1 motrice e tre condotte).



3. Cavo con diametro di riferimento di 3 mm.



4. L'analisi, in una prima fase, non ha preso in considerazione gli effetti di fatica sui quali è stata valutata la possibilità di una adeguata caratterizzazione da parte della Co.Fi.Plast,
5. Variabilità della geometria delle perline, per agevolare l'impatto col materiale,
6. Dati definiti per il taglio della Diorite:
  - Resistenza a compressione 215 MPa
  - Densità 2.814 kg/m<sup>3</sup>
  - Resistenza a trazione 21,1 MPa

- Resistenza all'impatto 71,3 cm
  - Durezza Knoop 4.115 MPa
  - Coefficiente di espansione termica  $8,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
7. Condizioni tipiche di lavoro/durata del cavo utensile allo stato dell'arte:
- *Durata del filo:*
    - granito: 25-28 m<sup>2</sup>/m
    - marmo: 90-150 m<sup>2</sup>/m
  - *Durata rapporto (cavo/perlina): 2/3(gomma o plastica)*
  - *Velocità max di taglio*
    - granito: 4-5 m<sup>2</sup>/h
    - marmo: 19-22 m<sup>2</sup>/h
8. Allungamento dell'ordine dello 0.7-1% e tensione dell'ordine dei 200 daN

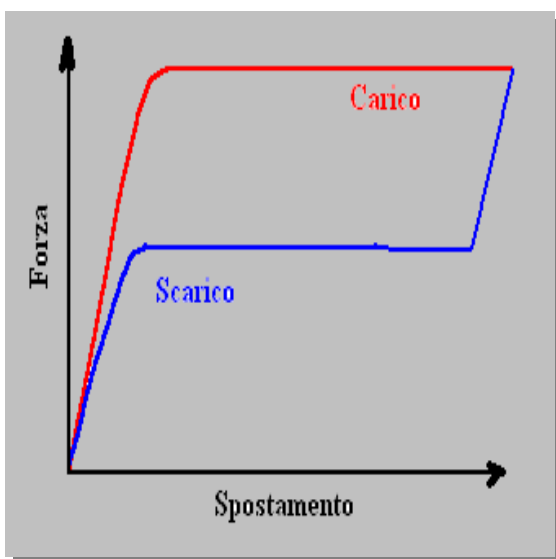
L'analisi delle condizioni di processo allo stato dell'arte e le considerazioni emerse nel corso delle simulazioni hanno permesso di definire alcune misure sperimentali necessarie alla corretta modellazione del materiale SMA e in particolare:

- Importantissima la temperatura di lavoro del cavo e della perlina.
- Importante la temperatura ambiente a cui potrà lavorare il cavo sia in cava che in laboratorio.
- Importante la conoscenza della forza sulle pulegge e in particolare l'effetto del rivestimento poliuretano delle stesse. ( definita una procedura sperimentale che confronti la forza su pulegge senza rivestimento e con rivestimento poliuretano sarebbe molto utile.

### 5.3. SVILUPPO DI NUOVI CAVI UTILIZZANDO SMA IN ALTERNATIVA AL TRADIZIONALE TREFOLO IN ACCIAIO.

---

Lo studio alla base dello sviluppo di nuovi cavi di supporto è partito dall'analisi di differenti materiali con caratteristiche di elevata deformazione elastica.



Rappresentazione schematica del comportamento di un materiale pseudoelastico. Nella fase di carico si osserva un punto di pseudosnervamento coincidente con l'inizio della trasformazione martensitica, che all'aumentare della deformazione giustifica il tratto a sforzo costante. L'ampia deformazione imposta viene recuperata immediatamente nella fase di scarico, in cui si osserva un'ulteriore regione di deformazione a sforzo costante associata con la trasformazione inversa da martensite ad austenite.

La lega di acciaio legato al NiTi è risultata essere quella con le migliori attitudini per l'applicazione industriale.

La sperimentazione preliminare, fatta presso CNR-IENI, sulla lega indicata che intorno all'8% di allungamento non si raggiunge il migliaio di cicli per arrivare a rottura. La condizione da ricercare per una durata a fatica illimitata suggerisce che l'allungamento debba restare al disotto del 2,5% - 3% e pertanto collocando il valore obiettivo all'1%.

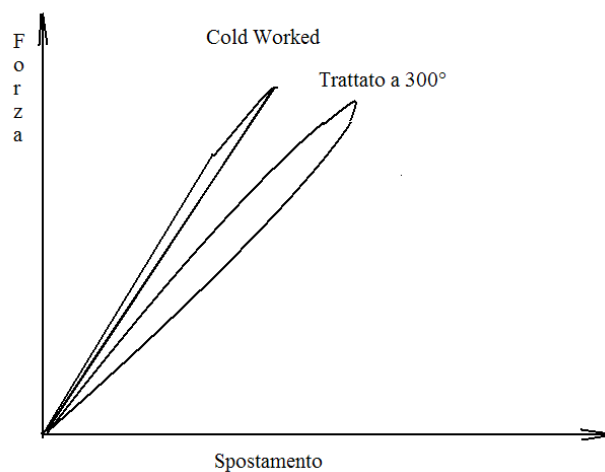
Sulla base delle considerazioni relative ai carichi durante la lavorazione il diametro del filo è stato realizzato pari a 3,5, 3 e 2,5 mm con una precisione sul valore del diametro come vuole lo standard normale di costruzione che rimane nell'intorno del 1/100 di millimetro.

Successivamente sono stati realizzate due distinte campionature. Le prove di laboratorio (descritte in specifica sezione) hanno confermato il mantenimento della struttura e delle caratteristiche operative dopo il ciclo di lavoro a cui sarà sottoposto per il montaggio delle perline.

Le due campionature predisposte sono:

1. Cold worked – cioè il materiale così come viene prodotto
2. Temperatura di trasformazione intorno ai 300°C

A questi campioni di materiale è stato poi applicato un decapaggio per eliminare gli ossidi superficiali propri del titanio, che sono altamente lubrificanti e quindi non desiderati ai fini del grimpaggio dei manicotti (perline diamantate) sul filo. I cicli di isteresi qualitativi sono riportati di seguito.



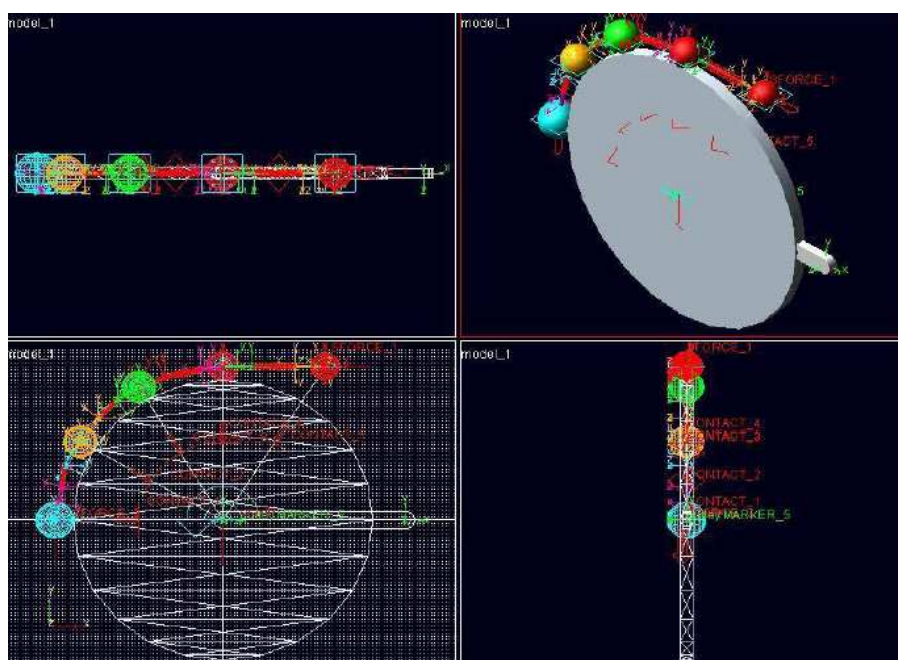
## 5.4. SIMULAZIONE STATICA E DINAMICA DEL COMPORTAMENTO DEI MATERIALI IN ANALISI

---

La modellazione dinamica del comportamento dei cavi in fase di lavorazione è stata approfondita con la verifica delle condizioni di allungamento e della tensione del cavo durante il taglio.

Le attività sono state sviluppate con il supporto del DIMEC dell'Università di Genova nell'ambito di due diverse condizioni di simulazione delle condizioni di interfaccia tra il cavo diamantato e il materiale lapideo.

L'obiettivo dell'attività è stato focalizzato sull'analisi non lineare di cavi superelastici comprendente analisi statica, analisi di flessione, analisi del cambiamento di fase e simulazione dinamica al fine di effettuare un confronto tra soluzioni di cavo tradizionale e superelastico.



*Schema del modello di simulazione dinamica (fase 1)*

In una prima fase è stata effettuata una modellazione semplificata, e successivamente il modello è stato implementato in modo tale da permettere un controllo fine dei parametri di processo.

Le due fasi hanno previsto le seguenti ipotesi:

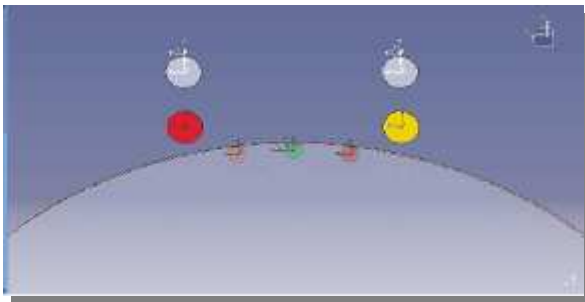
1. Forza di taglio generata dall'attrito, Modello "puleggia" singola

In questo caso il materiale lapideo è stato modellato come una superficie di una "puleggia" fissa avente la forma della linea elastica

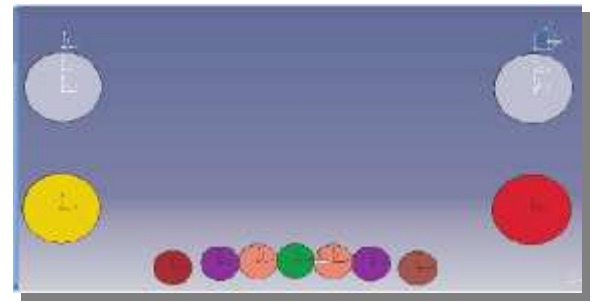
2. Forza di taglio generata dall'avvio e arresto delle pulegge, Modello "puleggia" multipla.

In questo caso l'interfaccia cavo-lapideo è stata modellata mediante numerose (fino a 7) "pulegge" con gestione della loro posizione e della loro coppia frenante.

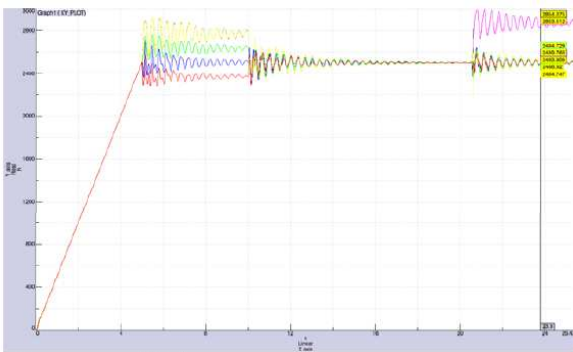
Di seguito sono riportati alcuni elementi dei modelli implementati e delle simulazioni ottenute.



Modello "puleggia" singola (Caso 1)

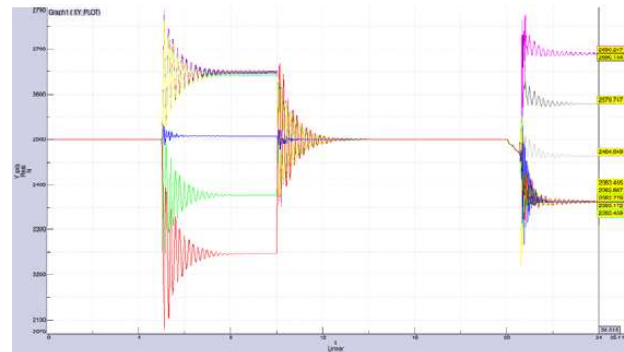


Modello "puleggia" multipla (Caso 2)



Oscillazione della tensione lungo il cavo

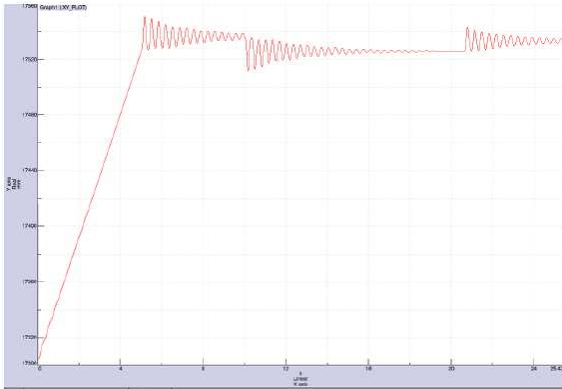
Caso 1



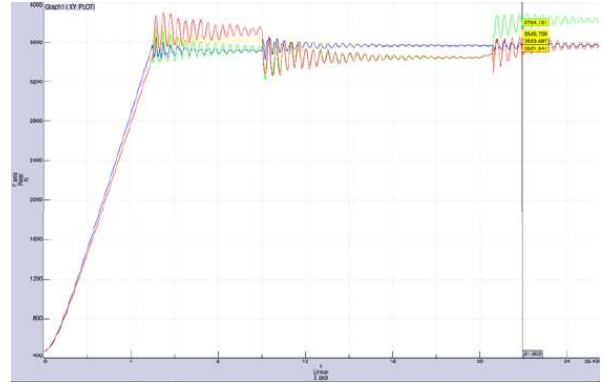
Oscillazione della tensione lungo il cavo

Caso 2

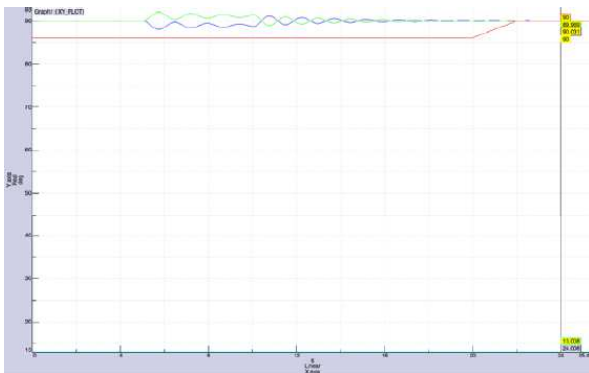




*Lunghezza del cavo  
Caso 1*



*Reazioni ai cuscinetti della puleggia  
Caso 2*



*Angolo di avvolgimento del cavo sulla puleggia  
Caso 1*



*Angolo di avvolgimento del cavo sulla puleggia  
Caso 2*

La modellazione dinamica del comportamento dei cavi in fase di lavorazione ha interessato la verifica delle condizioni di allungamento e della tensione del cavo durante il taglio.

## 6. PROTOTIPAZIONE DI CAVI UTENSILE IN LEGHE AD ELEVATA DEFORMAZIONE

### 6.1. REALIZZAZIONE E TEST/CARATTERIZZAZIONE DEI CAVI PROTOTIPALI IN LEGA NITI SECONDO LE SPECIFICHE DEFINITE NEL PROGETTO HI-CUT;

Come detto le analisi condotte sono confluite in una intensa fase sperimentale per la definizione della specifica applicativa ed hanno portato alla scelta della lega NiTi essenzialmente per il maggior valore di deformazione recuperabile oltre che per aspetti di industrializzabilità e costi prevedibili in caso di utilizzi in quantitativi significativi.

Le leghe valutate preliminarmente sono indicate in tabella.

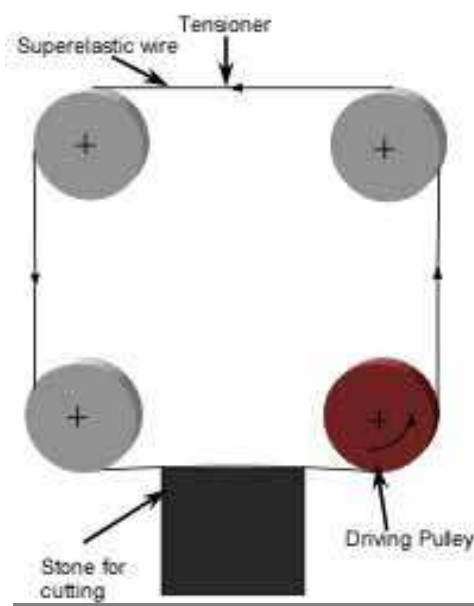
<b>Proprietà</b>	<b>NiTi</b>	<b>CuZnAl</b>	<b>CuAlNi</b>
Massima temperatura di recupero di forma	100 °C	120 °C	200 °C
Massima deformazione recuperabile.	8 %	6%	5%
Isteresi	12-50 °C	10-25 °C	15-20 °C
Sforzo di snervamento in fase austenitica	415 MPa	350 MPa	400 MPa
Sforzo di snervamento in fase martensitica	70 Mpa	80 Mpa	130 Mpa
Sforzo a rottura	700 Mpa	600 Mpa	500-800 Mpa
Densità (g/cm <sup>3</sup> )	6.5	7.6-8.0	7.2
Resistività (micro-ohm-cm)	80-90	8.5-9.7	11-13
Capacità termica (J/Kg °K)	837	400	373-574

- Identificata la lega NiTi è stato effettuato (con il supporto di DIMEC) il test simulato in condizioni statiche e dinamiche del cavo monofilo in SMA. Sono stati modellati il passaggio di fase da martensite (presente tra 70-200MPa) ad austenite (presente tra 200-650MPa) attuato in presenza di una tensione di 200MPa ed effettuati test di sollecitazione a flessione e a carico di punta, che

hanno evidenziato la notevole elasticità del materiale in analisi (fattore da 8 a 10 rispetto all'acciaio per cavi).

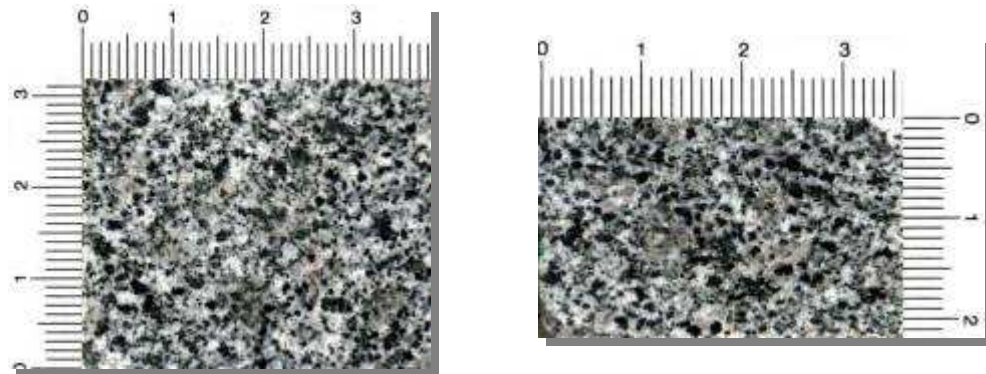
- Il test di simulazione dinamica è stato effettuato confrontando due differenti modelli. Il primo basato sulla modellazione FEA del cavo e successiva importazione in ambiente multibody e il secondo utilizzando il modello a parametri concentrati del cavo (rappresentato da molle e sfere) e il solo andamento delle forze agenti su di esso su base FEA. Il primo approccio, che ha portato a risultati realistici, è notevole in termini di onere computazionale.

- La simulazione ha previsto una condizione molto simile al reale con la disposizione di 4 pulegge e di un cavo scelto con un diametro di 3 mm (successivamente sono state effettuate anche prove con campioni di diametro inferiore). La modellazione ha interessato inoltre:



- l'analisi tensionale del cavo nelle differenti parti del circuito,
  - l'effetto della velocità di rotazione delle pulegge,
  - le forze agenti sui cuscinetti delle pulegge (motrice e condotte),
  - l'angolo di avvolgimento sulle pulegge,
  - lo slittamento relativo cavo-pulegge.
- Sono stati analizzati i parametri geometrici (ad esempio imbocco conico) delle perline abrasive per investigare sull'effetto dell'impatto col materiale per il

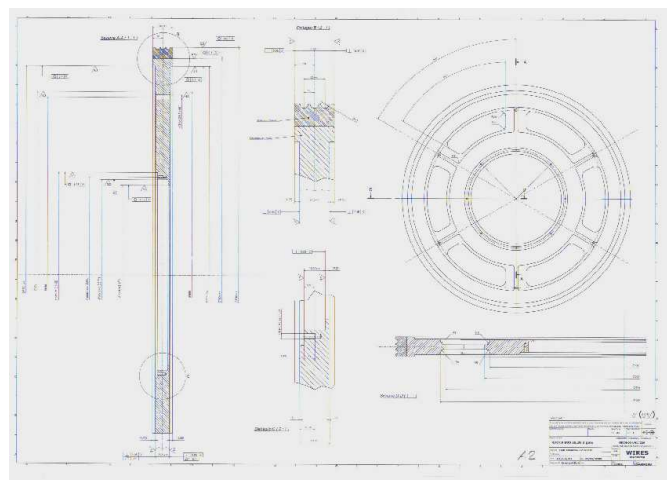
quale è stata scelta una specifica classe di Diorite specificatamente caratterizzata.



*Microstruttura della Diorite e tipica dimensione dei grani*

L'utilizzo di SMA ha richiesto l'analisi sperimentale delle condizioni al contorno per individuare il processo termico più idoneo per il trattamento del materiale e soprattutto della temperatura di lavoro del filo/cavo e della perlina in fase di taglio. Anche il range di temperature a cui lavora il cavo in fase di taglio è stato fra i parametri fondamentali analizzati.

Altra informazione molto utile alla simulazione, è stata la conoscenza della forza centrifuga e centripeta esercitata sulle pulegge dal filo diamantato e misurata con una serie di prove effettuate sulle pulegge con e senza rivestimento poliuretano.



*Schema della puleggia*

In merito alla realizzazione e test/caratterizzazione dei cavi prototipali in lega NiTi secondo le specifiche definite nel progetto Hi-CUT l'attività ha interessato, come

precedentemente indicato, la caratterizzazione di cavi monofilo in NiTi superelastici di differenti diametri sia in stato “cold-worked” sia trattati termicamente.

I cavi sono stati caratterizzati dopo aver subito la lavorazione di inserimento e bloccaggio delle perline diamantate al fine di valutarne le prestazioni.

Come è possibile osservare in figura seguente è stato inserito tra le “perline” abrasive anche un tubo in plastica trasparente al fine di stabilizzare ulteriormente le perline stesse.



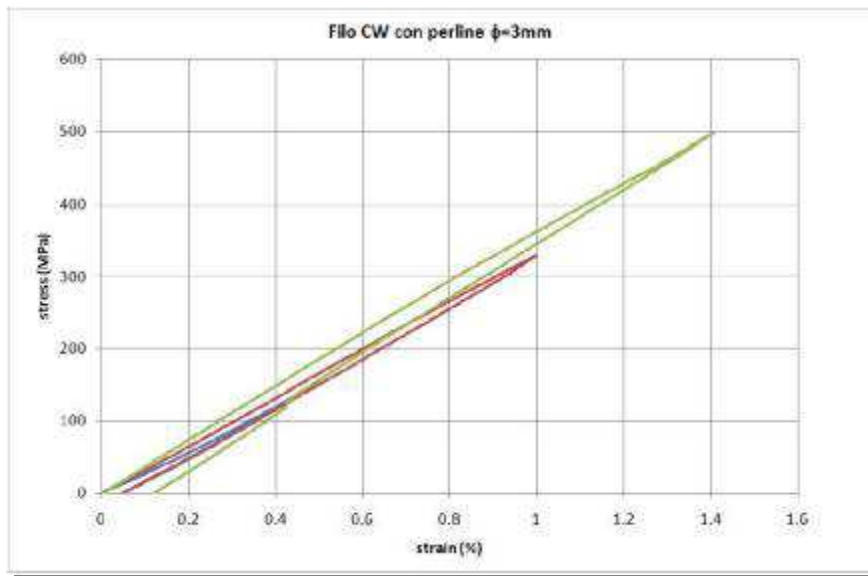
*Filo prototipo in NiTi con perline diamantate*

La prima fase della sperimentazione ha avuto lo scopo di verificare che il processo di inserimento delle perline diamantate non alterasse le caratteristiche microstrutturali del cavo monofilo in NiTi e che durante l'utilizzo del cavo monofilo le perline rimanessero stabili e bloccate nel punto di fissaggio.

Le misure sperimentali, effettuate su un cavo monofilo di 3mm di diametro, hanno evidenziato i seguenti stress meccanici: allungamenti al di sotto dell'1% e effetti di torsione.

Sono state eseguite a temperatura ambiente (T compresa tra 23 e 25 °C) prove di trazione con deformazioni crescenti a partire da 0.45% fino all'1.40%.

La sperimentazione ha confermato la caratteristica del NiTi “cold-worked”, che è tipicamente ricco di difetti di lavorazione, con l’assenza del caratteristico plateau ma comunque con elasticità superiori ai comuni materiali metallici.



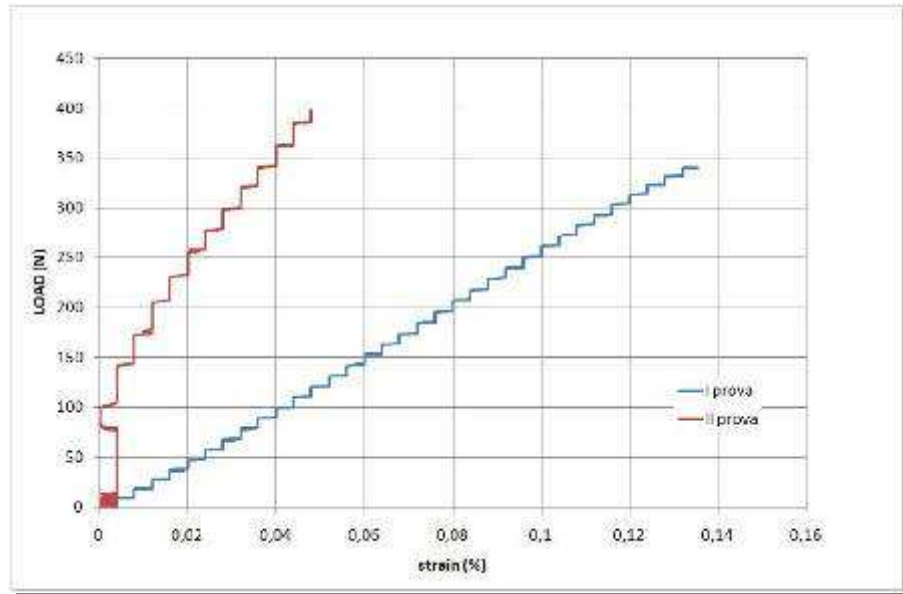
*Test meccanici a trazione a temperatura ambiente*

La deformazione residua è trascurabile (inferiore allo 0.06% per deformazioni fino all’1% e aumenta a valori pari a 0.13% dopo deformazioni fino all’1.40%).

Dopo i test meccanici è stata verificata la stabilità delle perline abrasive e l’assenza di spostamento delle stesse.

Sono state inoltre testate le forze necessarie all’estrazione di una perlina.

Le curve registrate fino all’inizio dello scorrimento della perlina sono rappresentate nella figura successiva.



*Test meccanici di estrazione delle perline*

Le curve presentate, nonostante le incertezze dovute alla presa diretta su una perlina abrasiva, mostrano un cedimento tra i 350-400N valore che corrisponde al distacco della perlina dal cavo monofilo.

È stato plausibile quindi ipotizzare un limite di 300 N come forza necessaria per rompere i legami polimerici che tengono “saldati” la perlina alla superficie del filo in NiTi. Infine sono state eseguiti test di torsione per verificare sempre la tenuta delle perline sul filo NiTi.

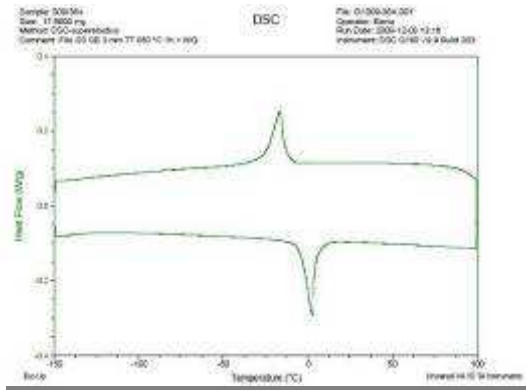
Le ipotesi suddette sono in seguito state verificate in test sul campo su macchina monofilo sensorizzata appositamente realizzata da Co.Fi.Plast.

Il processo di montaggio delle perline ha comportato un riscaldamento locale a causa dell’iniezione di un polimero che serve da “collante” tra la perlina e al superficie del filo.

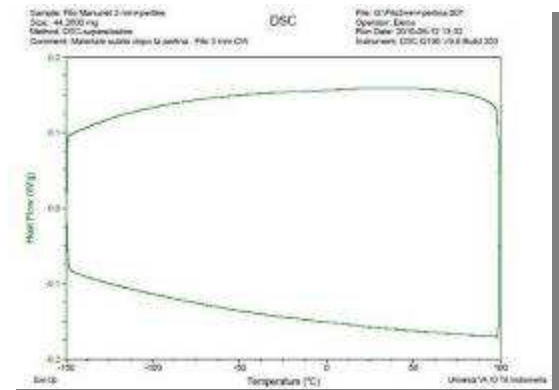
Tale riscaldamento è stato effettuato a temperature comprese tra 150 e 200 °C che si è ritenuto non abbiano avuto alcuna influenza sulla microstruttura del filo in NiTi.

Tuttavia grazie alla collaborazione con CNR-IENI sono state effettuate, tramite analisi DSC (calorimetria a scansione differenziale), verifiche in merito alla variazione della microstruttura del filo direttamente a contatto con la perlina.

Le verifiche hanno evidenziato che le temperature raggiunte nel processo di montaggio della perlina non hanno alterato la microstruttura del filo NiTi e quindi le sue proprietà meccaniche e in particolare la superelasticità.



*Termogramma registrato per il campione prelevato da filo in NiTi e trattato termicamente*



*Termogramma registrato per il campione prelevato da filo in NiTi a contatto con la perlina dopo montaggio*

Alla luce dei risultati ottenuti con le caratterizzazioni suddette si è potuto concludere che il processo di incollaggio delle perline ad un filo NiTi è pienamente fattibile e offre risultati positivi, per quanto riguarda la tenuta delle perline, anche in seguito a deformazioni meccaniche importanti del filo sia in torsione che in flessione.

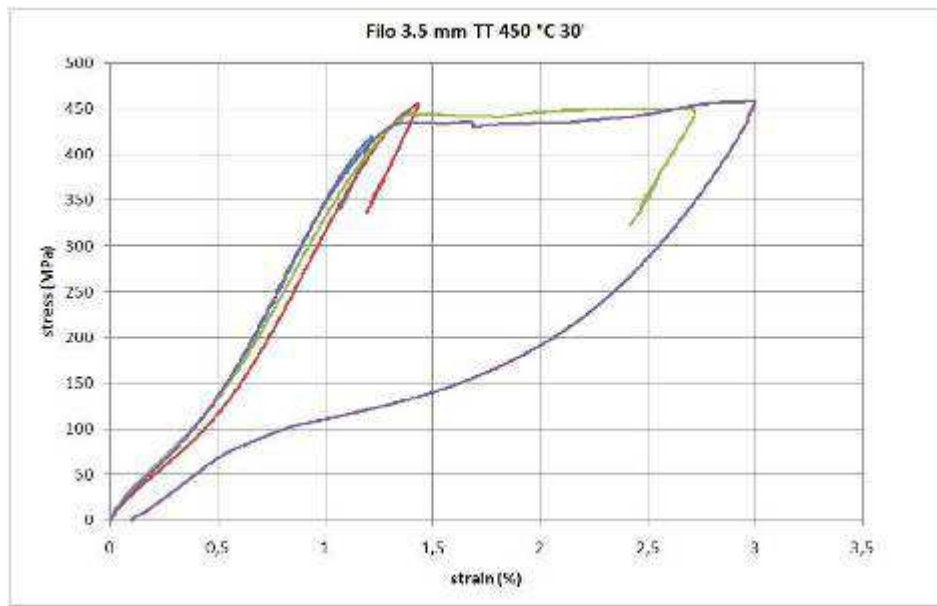
Sono quindi state realizzate le campionature di filo NiTi superelastico di più diametri (3.5 mm e 2.5 mm) per la realizzazione di lotti da testare sperimentalmente in condizioni di lavoro.

I lotti di filo sono stati trattati termicamente a 450 °C per 30' poiché nei primi test eseguiti era stato evidenziata una eccessiva rigidità del filo e per dare modo poi durante l'applicazione di poter sfruttare non solo il regime elastico del materiale ma anche quello pseudoelastico.

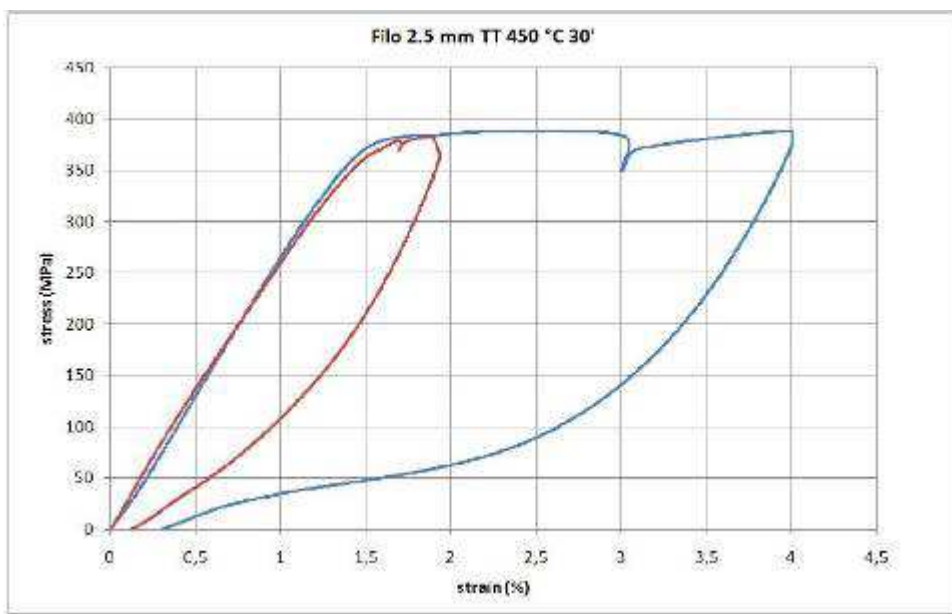


Al fine di ottenere la massima resistenza a fatica si è previsto di lavorare nel campo di allungamenti dell'ordine dell'1-1,2%, tale valore è stato poi risultato sostanzialmente corretto in fase di validazione.

Nelle figure si riporta la caratterizzazione meccanica in trazione che è stata effettuata, su entrambi i fili e unitamente alla flessione a tre punti, per fornire i parametri principali d'uso durante le fasi di taglio.



*Prove meccaniche in trazione per il filo NiTi da 3.5 mm trattato termicamente*



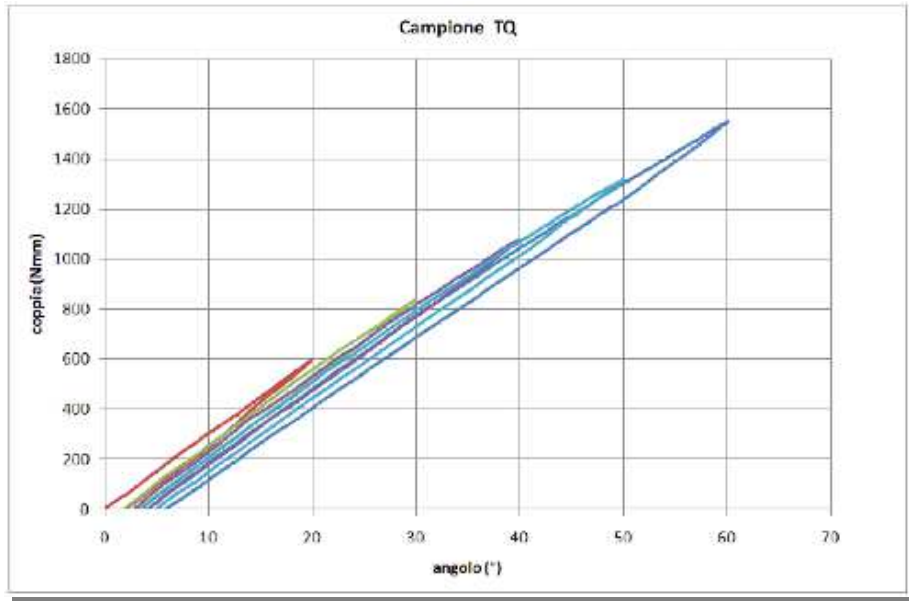
*Prove meccaniche in trazione per il filo NiTi da e 2.5 mm trattato termicamente*

Nell'ambito della realizzazione di campioni di cavi prototipali in lega NiTi sono state effettuate ulteriori caratterizzazioni sperimentali.

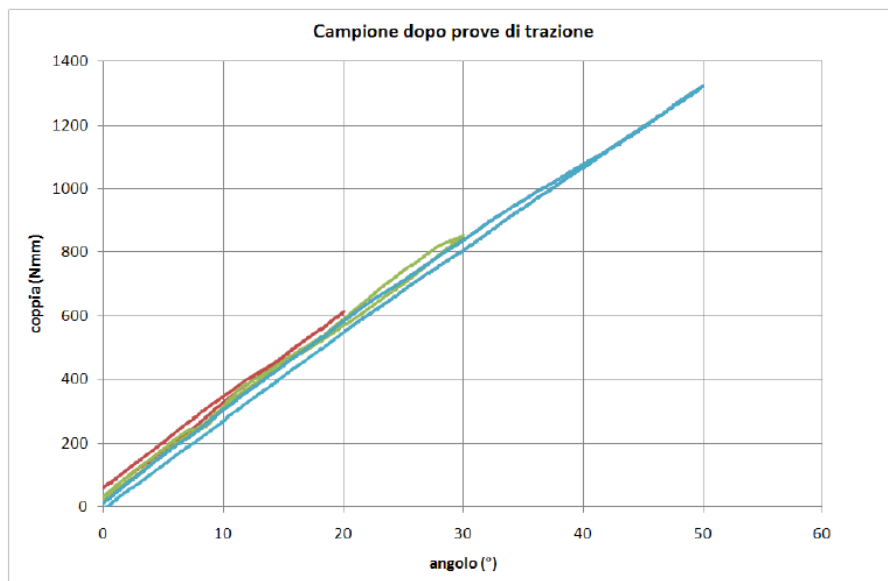
In particolare lo studio ha interessato approfondimento delle prove di distacco delle perline dal cavo.

È stato effettuato il test sia su campioni vergini sia su campioni già testati in trazione in modo da verificare la tenuta delle perline anche in seguito alla massima sollecitazione meccanica possibile.

Per ciascun campione sono stato eseguiti 5 cicli da 20° a 60° di torsione.



*Test meccanici in torsione su filo NiTi con perline montate*



*Test meccanici in torsione su filo NiTi con perline montate*

La sperimentazione ha confermato un ottimo ancoraggio delle perline al cavo in lega NiTi.

Infatti, come è possibile osservare nei grafici sopra riportati, i campioni mostrano un buon andamento a torsione con deformazioni residue trascurabili. In entrambi i campioni non è stato notato alcun distacco delle perline.

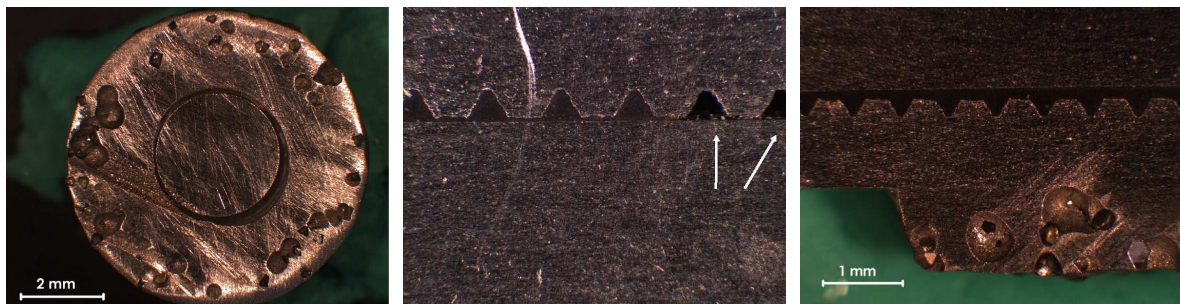
La caratterizzazione è stata ulteriormente approfondita mediante analisi di microscopia ottica sempre grazie alla collaborazione con il CNR-IENI. Questo tipo di analisi è stata condotta per valutare il processo di fissaggio delle perline al filo, verificandone direttamente la qualità dal punto di vista della presenza del polimero e della sua diffusione tra la superficie della perlina e quella del filo.

Sono stati riscontrate notevoli difficoltà nel taglio di un campione trasversale e di un campione longitudinale del sistema perlina+filo dovute alla presenza del materiale diamantato.

È stato necessario ricorrere ad un processo di taglio per elettroerosione, ma in ogni caso i campioni hanno potuto essere preparati metallograficamente solo con le carte abrasive ed evitando l'uso dei panni con pasta diamantata.

La qualità della superficie del campione analizzato non è quindi ottimale e presenta una non trascurabile rugosità. Nonostante questa difficoltà è stato comunque possibile osservare gli aspetti di interesse.

Di seguito possiamo vedere un'immagine della sezione trasversale e due immagini della sezione longitudinale.



*Sezione trasversale del sistema  
perlina+filo*

*Sezione longitudinale del sistema  
perlina+filo*

Come è possibile osservare nelle figure precedenti la perlina viene fissata al filo riempiendo le sagomature con un polimero affinato negli anni dalla Co.Fi.Plast.

Nella figura della sezione trasversale si nota come il filo non sia sempre posizionato in modo simmetrico al centro del sistema e infatti nella figura centrale (sezione

longitudinale) si può osservare (evidenziate dalle frecce bianche) come in alcuni punti il polimero non sia entrato nelle cavità e non abbia riempito in maniera corretta l'intercapedine tra filo e perlina.

Nella figura a destra invece il polimero ha ben aderito alla superficie del filo riempiendo correttamente gli spazi tra filo e perlina.

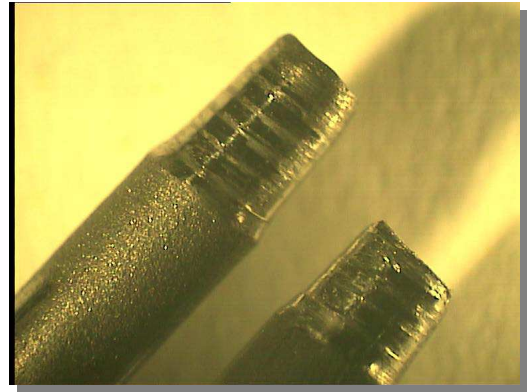
Sono inoltre state analizzate le problematiche della giunzione di testa per ottenere il cavo ad anello chiuso necessario ad effettuare i primi test di lavorazione. Questa ultima attività ha richiesto di studiare la modalità di giunzione di testa del cavo che ha comportato alcune problematiche legate alla necessità di garantire la adeguata flessibilità nella zona di giunzione.

I primi cavi giuntati sono stati testati e hanno evidenziato alcuni limiti di resistenza proprio nella zona di giunzione di testa attuata mediante laser. È stato poi testato un metodo per giuntare il cavo superelastico con giunto filettato e/o crimpatura.

Quest'ultimo metodo è stato, successivamente alle prove effettuate, quello che ha consentito il miglior risultato.



*Evidenza della superficie di frattura della saldatura a laser del filo in NiTi.*



*Tentativi di filettare il cavo SMA*



*Manicotto crimpato*

## 6.2 STUDIO DELLA PROCEDURA DI SPERIMENTAZIONE IN MERITO AI PARAMETRI DI PROCESSO DI TAGLIO LAPIDEO

---

Circa lo studio della procedura di sperimentazione in merito ai parametri di processo di taglio lapideo, è stata avviata, parallelamente all'attività sperimentale sul cavo monofilo in lega NiTi, l'analisi per definire la macchina strumentata atta ad effettuare, in condizioni di lavoro (taglio del materiale lapideo), le misure sui campioni di cavi monofilo stessi.

Il set di parametri/sensori specifici identificato per la successiva integrazione sulla macchina sperimentale è il seguente:

	<b>PARAMETRO / VARIABILE</b>	<b>SENSORE</b>
1	Coppia sull'albero motore	Torsiometro dinamico
2	Pressione aria nei cilindri tenditori	Manometro / sensore di pressione piezo
3	Luogo geometrico del filo durante il taglio	Sensore laser
4	Posizione asse z	Encoder ottico (sul motore)
5	Velocità asse z	Encoder ottico (sul motore)
6	Velocità lineare	Sensore induttivo
7	Quantità di acqua erogata	Flussometro / contatore Woltmann
8	Assorbimento del motore	Amperometro
9	Posizione dei cilindri tenditori	Trasduttore magnetostrittivo
10	Allungamento del filo	Trasduttore magnetostrittivo
11*	Tensione del filo	Potenza assorbita/velocità
12*	Numero di rivoluzioni del filo	Contagiri a altro metodo indiretto
13	Rumore	Fonometro (integratore)
14**	Analisi chimico/fisica del "truciolo"	Microscopio, attacco chimico, bilancia

\* Misure indirette    \*\*Misura in laboratorio

Di seguito i sensori utilizzati.

- Torsiometro dinamico -Carico max. 600 Nm - Tipo DATAFLEX 22/100 (1)

- Trasduttore di pressione .-mod.27P-R-08°-02-A-1-C-4-SCI. Attacco fil.  $\frac{1}{2}$  g.m.- campo di lavoro 0-25 bar – uscita 4- 20 Ma. –Alimentaz. 10/30 Vdc (2)
- Laser misuratore di distanze .classe 2 –campo di misura 300-2300 mm
- Risoluzione0,1 mm . –tipo ODS 2000 (3)
- Encoder – ELCIS Mod. LA59ZMA15-1024-5-BZ-N-CU-R-01 (4, 5)
- Misuratore portata acqua.- magnetico- EUROMAG – Mod. MUT2200 DN25PN16+MC106A – completo di convertitore elettronico.- tensione di alimentazione 110 – 220V ac – uscita 4 – 20 Ma (7)
- Scheda Telemecanique da abbinare all’inverter ALTIVAR ATV58 – scheda Mod. RS 485 MODBUS.
- Programma supervisore della D e B AUTOMATION costituito dalla CHIAVE RUNTIME MOVICON
- P.C. industriale derivato da personal computer configurato secondo specifiche CO.FI.PLAST
- Sensore magnetostrittivo MICROPULSE LINEARE BTL 5-A11-MO 200-B-S32 con DATORE BTL-P1013-4R e connettore 8 POLI BKSS32M-00. (9, 10)
- Cilindri pneumatici –diametro 80mm – corsa 200mm
- Cella di carico a compressione PR6201/23C3. Portata nominale 2000 Kg protezione IP68. + accessori PR6001/10N –PR6001/00N – PR6130/04N PR6135/G – PR 5410 (11)

Tutti i segnali dei sensori applicati per il monitoraggio delle variabili sono stati riportati ad un sistema di acquisizione dati in grado di gestire e monitorare il tutto in real-time.



La sperimentazione ha consentito di verificare gli aspetti di effettiva utilizzabilità di cavi in NiTi e in particolare la relativa durata e la ricaduta sulla semplificazione del controllo e regolazione della macchina.

I test hanno inoltre consentito di verificare la soluzione di giunzione di testa del cavo che è sostanzialmente differente da quella impiegata per i cavi tradizionali in trefolo di acciaio. Su tale aspetto, alla fine del progetto, sono in corso ulteriori sviluppi per migliorare la affidabilità e durata).

Tra le variabili output che hanno consentito di definire in modo quantitativo e/o qualitativo il processo di taglio, e sulla base delle quali sono state ulteriormente focalizzate le prove, sono state individuate:

1. Tempo totale di taglio / velocità di avanzamento del filo (velocità asse z)
2. Usura del filo diamantato
3. Quantità di materiale di scarto in relazione ai m<sup>2</sup> di superficie tagliata
4. Qualità della finitura superficiale del materiale lapideo tagliato

La sperimentazione sui parametri di processo di taglio lapideo e alle prestazioni dei cavi in condizioni industriali mediante macchina strumentata è stata avviata a valle di una analisi legata alla variabilità dei materiali lapidei trattati.

È stato necessario capire quale fosse il livello di ripetibilità dei risultati, soprattutto per decidere il numero di repliche nel piano sperimentale. Non esistendo in letteratura dati certi ed affidabili è stato necessario approcciare il problema nel modo più generale possibile.

L'obiettivo è stato quindi quello di scegliere il numero di repliche da effettuare in modo da garantire che il rischio di commettere un errore del tipo II (probabilità di accettare H<sub>0</sub> quando H<sub>0</sub> è falsa) fosse minore di un certo valore min.

Il sistema di acquisizione è stato studiato per essere in grado di filtrare i dati acquisiti, scartando, ad esempio, le letture che si dimostrano inattendibili.

Ciò è fatto utilizzando una metodologia che è tipica dell'analisi di affidabilità e di controllo di qualità: si istituisce una sorta di "carta di controllo" o "carta di accettazione" che consiste nell'individuare il valore medio del segnale acquisito, nel costruire una banda di oscillazione attendibile, funzione della varianza del segnale e del livello di confidenza target dell'analisi.

Le singole acquisizioni che risultano esterne alla carta di controllo vengono scartate in quanto considerate inattendibili con una probabilità almeno pari al livello di confidenza prescelto.

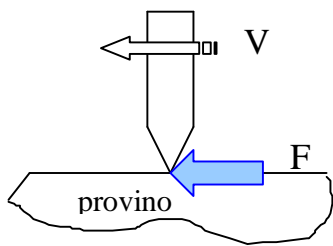
Durante le prove sperimentali, è stato necessario analizzare i dati acquisiti al fine di individuare le correlazioni tra le variabili in input al sistema (es. velocità del filo, tensione, tipo di materiale ecc.) con le variabili di output (es. velocità di taglio in direzione z, usura del filo ecc.).

Sono stati definite le caratteristiche dei singoli sensori adatti a rilevare i parametri caratteristici del processo di taglio con filo diamantato, ed è stata definita la strumentazione di misura alla quale connettere i vari sensori utilizzati.

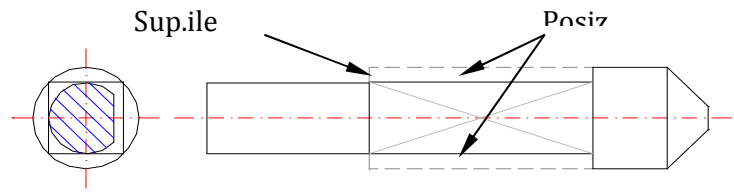
Prima dell'avvio della sperimentazione estesa è stata effettuata la verifica delle caratteristiche del materiale in lavorazione (Diorite) con la misura della componente orizzontale della forza resistente generata dal moto del penetratore sul materiale lapideo.

L'obiettivo della prova è stato la rilevazione sperimentale della componente tangenziale  $F$  della forza resistente il materiale costituente il provino esercitata sulla punta diamantata del penetratore quando questo si muove a velocità costante  $V$ .

Per eseguire tale misura si è fatto ricorso ad estensimetri, montati su di un penetratore modificato ad hoc. Le modifiche sono consistite nella spianatura di parte della superficie cilindrica, in modo tale da ottenere una zona a sezione quadrata.



Schema concettuale



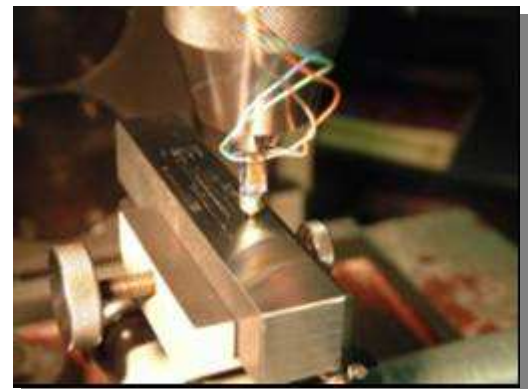
Penetratore modificato

Gli estensimetri sono quindi stati applicati su due facce opposte, le cui normali sono parallele alla direzione del moto. Collegandoli a mezzo ponte si è ottenuta la compensazione in temperatura, una doppia sensibilità ed è inoltre stato possibile rilevare il solo momento flettente prodotto dalla forza F.

Questo fatto è stato determinante perché il penetratore è caricato anche lungo il proprio asse. Essendo noto il braccio, ovvero la distanza fra la punta del penetratore e la mezzeria dell'estensimetro, si risale al valore della forza resistente. In totale sono stati strumentati cinque differenti penetratori.

#### Caratteristiche estensimetri

	Penetrat. 1	Penetrat. 2	Penetrat. 3	Penetrat. 4	Penetrat. 5
Resistenza [ $\Omega$ ]	120	120	120	350	350
Gauge factor K	1.69	1.69	1.69	1.96	1.96



Penetratori estensimetrati

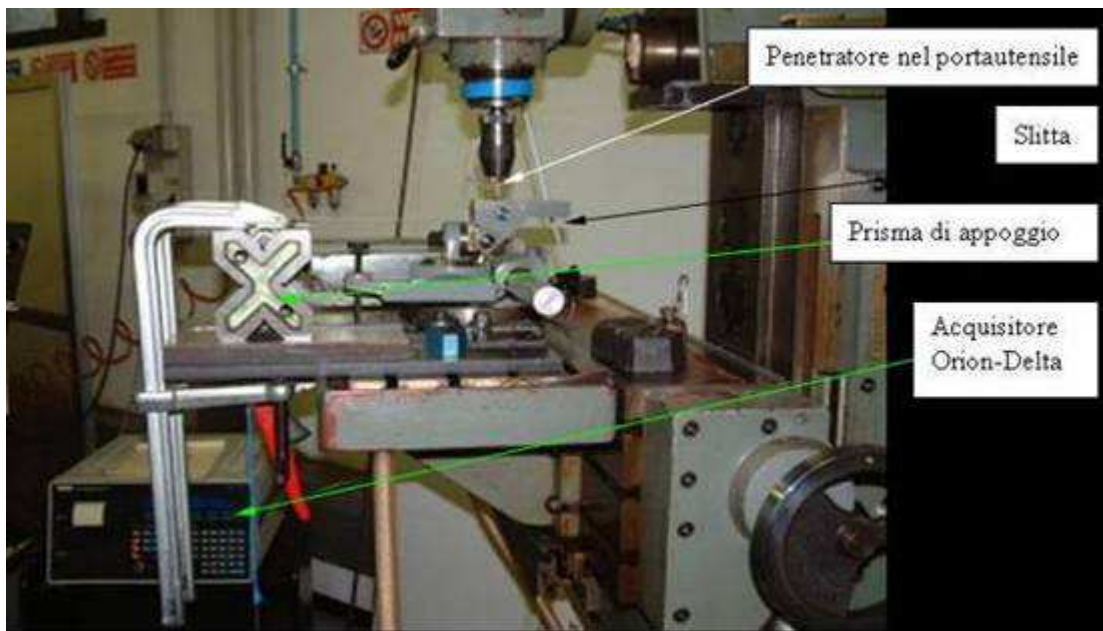
Penetratore durante la taratura

Per l'acquisizione della misura è stato utilizzato un sistema Orion-Delta disponibile presso Co.Fi.Plast.

La taratura dei diversi penetratori è stata effettuata mediante fissaggio al portautensile di una fresa disponibile presso Co.Fi.Plast.

Il penetratore è premuto contro un provino di acciaio, che a sua volta è fissato ad una slitta.

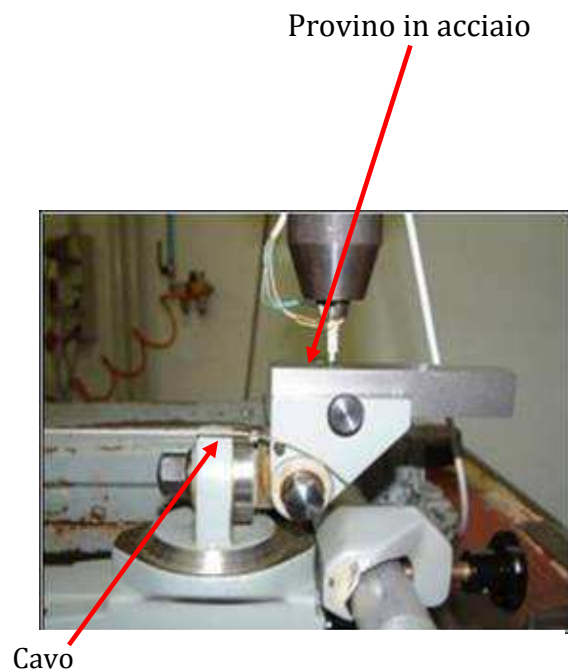
Il carico assiale non compromette la correttezza del procedimento in quanto il particolare collegamento degli estensimetri fa sì che vengano misurate solo le deformazioni prodotte dal momento flettente.



*Apparato di prova*

Alla slitta è attaccato un cavo con un peso, per cui la cui tensione trasmessa attraverso un punto di appoggio (un perno appoggiato orizzontalmente su un prisma a X) tende a far muovere la slitta in senso orizzontale.

Con questo dispositivo di prova non è stato possibile ottenere un movimento a velocità costante, per cui durante i test di taratura si è fatto riferimento al valore di F rilevato immediatamente prima che la slitta iniziasse a muoversi



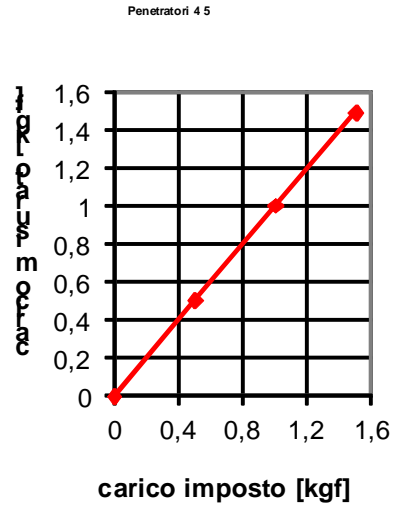
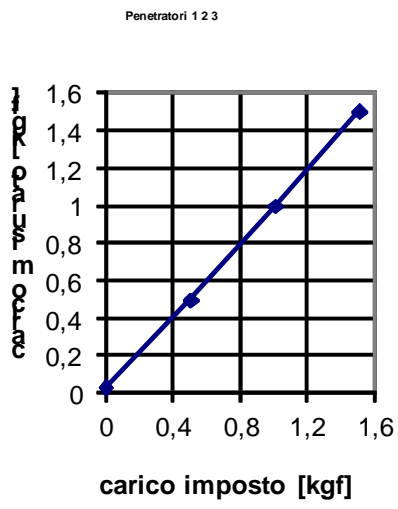
*Particolare penetratore e slitta*

Per ciascun penetratore estensimetrato è stato applicato un carico (peso) crescente da 0 a 1.5 kg in step da 0.5kg.

Non sono stati applicati pesi di entità superiore per essenzialmente due ragioni: durante le successive prove su materiali lapidei il range di valori attesi per F è inferiore al kg.

Inoltre applicando un peso di 2 kg all'estremità del cavo, la forza normale con cui il penetratore è premuto sul provino non è più sufficiente a mantenere l'equilibrio longitudinale della slitta, che inizia così a muoversi.

	<b>Penetratori 1 2 3</b>	<b>Penetratori 4 5</b>
Carico applicato - (peso [kg])	Valore rilevato per F [kg]	
0	0.033	0
0.5	0.499	0.506
1.0	0.999	1.005
1.5	1.504	1.495
<b>Fattore di conversione <math>\beta</math></b>	<b>0.0174</b>	<b>0.0188</b>

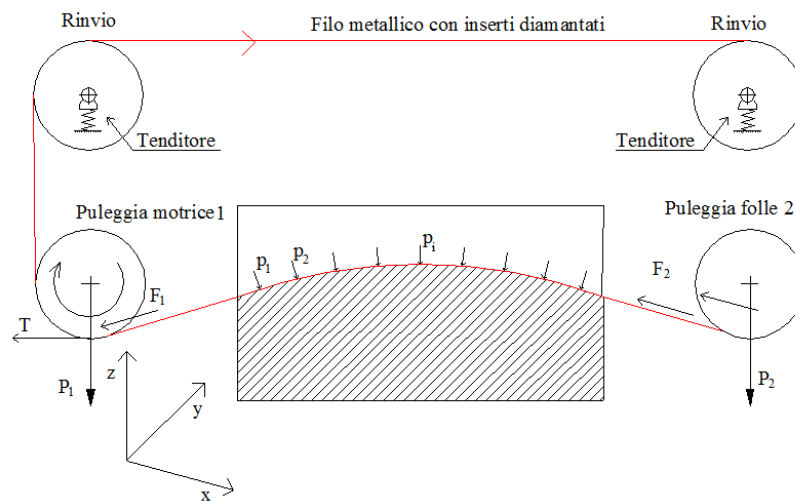


*I risultati delle prove di taratura (grafico)*

## 7. VALIDAZIONE INDUSTRIALE DI CAVI NITI

### 7.1. SPERIMENTAZIONE SUI PARAMETRI DEL PROCESSO DI TAGLIO LAPIDEO E DELLE PRESTAZIONI DEI CAVI IN CONDIZIONI INDUSTRIALI.

Successivamente alla messa a punto della “macchina laboratorio” strumentata, e definite le condizioni standard di processo e dei materiali in lavorazione, sono stati avviati i test mediante taglio di lastre del materiale lapideo (Diorite).



*Schema della macchina da taglio sperimentale*

Il filo usato per il taglio, in lega NiTi, scorre in direzione x avvolgendosi su 4 pulegge che svolgono differenti funzioni, una puleggia motrice, una folle e due tenditori.

La puleggia motrice (in basso a sinistra in figura) è quella che genera il tiro del filo e viene azionata da un motore elettrico.

La seconda puleggia (in basso a destra) è una ruota folle, si muove passivamente a causa del trascinamento del filo.

Le altre due sono solo di rinvio e sono montate su un sistema che sviluppa la forza elastica necessaria a garantire la tensione iniziale del filo: i due volani tenditori scorrono in direzione verticale allontanandosi dalle pulegge sottostanti.

Le 4 pulegge riescono così a mantenere il filo teso durante il processo e muovendosi simultaneamente in direzione z rendono possibile, in forza della pressione esercitata sul filo diamantato, il taglio del blocco.



L'avvio delle prove sistematiche per lo studio del processo di taglio dei materiali lapidei con il nuovo monofilo superelastico ha richiesto i seguenti step.

1. Utensile (perline e filo)

- a. Prodotta una serie di perline da utilizzare per le prove, fatte quindi con le stesse modalità, stesso trattamento, uguale diamante, stessa matrice, stessa pressione di sinterizzazione etc...Una volta prodotte le perline in numero sufficiente sono state riposte in modo da poterne estrarre a caso il numero necessario per produrre il filo.
- b. Il filo fa parte di uno stesso stock, sì da essere certi che esso ha subito lo stesso processo di fabbricazione.



- c. Nel processo di assemblaggio del filo mantenuti costanti “i giri di torsione”.
- d. Una volta prodotto il filo, si è proceduto con la rattivatura delle perline prima dell'avvio della prova.

## 2. Materiale

- a. Il materiale di prova è stato identificato in una Diorite sulla quale sono state verificate le caratteristiche mediante la procedura precedentemente esposta.
- b. Il blocco è stato squadrato su dimensioni standard in modo che l'inizio della prova (transitori) fosse il medesimo.
- c. Posizionato e identificato l'orientamento del blocco tra i montanti della macchina in mezzeria.

## 3. Parametri che sono stati mantenuti costanti durante le prove

- a. Acqua di raffreddamento erogata, con attenzione al fatto che il getto investisse la zona di taglio nello stesso modo e dalla stessa distanza.
- b. Tensionatura di montaggio del filo uguale per ogni prova.

## 4. Campo di variabilità delle misure

- a. È stato definito un volume di variabilità delle prove in modo da identificare un campo in cui tutti i valori di prova potranno poi ricadere. È una valutazione empirica basata sui dati storici. I valori di partenza sono chiaramente definiti e si basano sulle condizioni operative limite del processo e delle caratteristiche della macchina di prova. Queste condizioni sono qualitativamente identificate quattro coppie di valori velocità di discesa del filo e velocità di taglio (avanzamento) dello stesso.

## 5. Profondità di taglio

- a. È stato necessario fare in modo che almeno cinque percorsi della traiettoria fossero paralleli

## 6. Misure off line”

Oltre al monitoraggio di tutte le grandezze che vengono automaticamente rilevate, per ogni misura sono state controllate:

- a. Stato della perlina, in modo soggettivo, sentendo più pareri, ed oggettivamente, ove possibile, valutando la misura della stessa, con un proiettore di profili
- b. Stato di finitura del taglio, valutazione soggettiva ed eventuale misura della rugosità della superficie
- c. Prelievo durante la prova, alla fine della terza e della quinta misura della traiettoria, una quantità opportuna di acqua e pesarla al fine di determinare la quantità di materiale in esso contenuto.
- d. Abbinare alle misure fatte i valori di abrasione risultanti dal modello di simulazione sviluppato dai partners del progetto HiCUT.

È inoltre stato osservato il comportamento del filo durante la prova, sono state memorizzati e descritti i fatti pertinenti la prova stessa nel modo più circostanziato possibile.

Nel primo set di prove avviate non è stato ritenuto necessario cambiare sempre il filo.

I risultati sperimentali sono stati confortanti in quanto le prestazioni del cavo diamantato e del sistema di giunzione sono risultati soddisfacenti anche se sono necessari ulteriori sviluppi, dopo il completamento del progetto, soprattutto in relazione alla industrializzazione delle modalità di giunzione.

L'attività sperimentale effettuata mediante la "macchina laboratorio" strumentata ha consentito di verificare il comportamento del cavo superelastico e confermare le risultanze delle prove di laboratorio effettuate presso CNR-IENI nelle fasi preliminari di studio

È stato inoltre possibile verificare e validare una serie di parametri e di risultanze dei modelli di simulazione sviluppati nel progetto HI-CUT.

La sperimentazione ha inoltre consentito di testare, in condizioni assimilabili a quelle di effettiva produzione, l'assieme cavo utensile a valle delle precedenti verifiche specifiche su:

- cavo superelastico,
- giunto di testa,
- perline abrasive.

Di seguito una tabella per la definizione dei parametri di processo di prova

Predisposizione prove con SMA											
			<table border="1"> <tr> <td>Passo perline</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Marmo</td> <td>0,033</td> </tr> <tr> <td>Granito</td> <td>0,026</td> </tr> </table>			Passo perline		Marmo	0,033	Granito	0,026
Passo perline											
Marmo	0,033										
Granito	0,026										
<table border="1"> <tr> <td>Materiale in esame</td> <td>0,026</td> </tr> </table>			Materiale in esame	0,026							
Materiale in esame	0,026										
01											
02	Altezza blocco	Hg [m]	0,80								
03	Lunghezza blocco	Lg [m]	2,5								
04	Passo perline	a [m]	0,026								
05	Velocità filo	Vf [m/sec]	25								
06	tempo di taglio	Tt [h]	2								
07	sforzo tangenziale	tr [N/mm <sup>2</sup> ]	8	Calcolatore							
08	diametro perlina	Dp [mm]	6,2								
	diametro del filo	Df [mm]	2,5								
09	Coefficiente attrito		0,4								
	diametro del rivestimento	Dr [mm]	4,4								
10											
11	Sviluppo del calcolo										
12											
13	Perline interne al blocco		96,15384615								
14	Velocità abbassamento del filo		0,0001111111	[m/sec]							
15	Frequenza delle perline		961,5384615	[perl/sec]							
16	Tempo di transito perlina nel blocco		0,1	[sec]							
17	Numero passaggi perlina		72000								
	Spessore medio asportato	s0	1,111111E-05	[m]	0,0111111111 [mm]						
18	Perline impegnate al taglio		6.923,076,92	perline							
19	Lunghezza ipotetica filo		180.000,00	[m]							
20											

## 7.2. CONCLUSIONI: L'APPLICAZIONE INDUSTRIALE DEL CAVO IN SHAPE MEMORY ALLOY

---

I parametri più importanti dai quali dipendono i risultati del taglio e dai quali dipende la produttività sono fondamentalmente la velocità del filo  $V_f$  e la velocità di discesa del filo  $V_z$ .

Gli esperti del settore segnarono il range di variazione dei due parametri succitati identificandolo in:

1. velocità minima del filo:  $V_{fmin} = 20 \text{ m/s}$
2. velocità massima del filo:  $V_{fmax} = 30 \text{ m/s}$
3. velocità minima di discesa del filo:  $V_{zmin} = 0.3 \text{ m/h}$
4. velocità massima di discesa del filo:  $V_{zmax} = 0.6 \text{ m/h}$

L'ipotesi di partenza è stata quindi quella che all'interno del rettangolo definito da tutte le possibili combinazioni di velocità del filo e velocità di discesa si trovasse la soluzione ottima che consentisse di individuare un giusto trade off tra durata del filo ed efficacia del taglio e cioè produttività.

La soluzione ottimale viene essere ottenuta considerando non solo la fisica del processo di taglio ma facendo anche una valutazione di tipo economico-industriale al fine di ottenere non solamente la massima produttività ma soprattutto il minimo costo di taglio al metro quadro di materiale lapideo.

Infatti alla massima produttività, vista solo dal punto di vista del processo fisico di taglio, non corrisponde necessariamente il minimo costo.

La verifica sperimentale è servita a confermare l'assunto.

Volendo ottenere la massima produttività è probabile che l'ottimizzazione del processo di taglio richieda di forzare ai massimi limiti fisici sia la velocità del filo che la velocità di discesa del filo stesso.

Il punto ottimale è presumibilmente all'interno del rettangolo determinato dai punti A, B, C e D individuate dalle combinazioni:

Punto	Velocità del filo $V_f$ [m/s]	Velocità discesa filo $V_z$ [m/h]
<b>A</b>	20	0.3
<b>B</b>	30	0.3
<b>C</b>	20	0.6
<b>D</b>	30	0.6

Per ciascuno dei quattro punti ABCD è stata fatta la sperimentazione al fine di individuare il momento torcente  $M_t$  necessario per sostenere la lavorazione stessa.

L'analisi statistica dei dati rilevati nelle prove (effettuate con cavo tradizionale in trefolo d'acciaio) ha mostrato che la quasi totalità dei valori si colloca in un intervallo definito dal valore medio più o meno la deviazione standard.

Nell'ipotesi che le variabili velocità del filo  $V_f$  e velocità di discesa  $V_z$  siano linearmente indipendenti (e cioè abbiano una trascurabile covarianza) l'equazione che lega dette variabili al Momento torcente  $M_t$  assume questa forma:

$$M_t = kV_f^x V_z^y$$

Dai dati sperimentali si è ottenuta in buona approssimazione che le variabili hanno i seguenti valori:  $k = 275$ ,  $x = -0.2$ ,  $y = 0.4$  con:

$$M_t = 275V_f^{-0.2} V_z^{0.4} = 275 \frac{V_z^{0.4}}{V_f^{0.2}}$$

Dall'equazione si legge chiaramente che l'influenza della velocità del filo non è molto rilevante mentre lo è maggiormente la velocità di discesa del filo.

Inoltre l'effetto delle due variabili è opposto in quanto ad un aumento della velocità del filo corrisponde ad una diminuzione del Momento Torcente, viceversa ad un

aumento della velocità di discesa del filo corrisponde ad un aumento del Momento Torcente.

Confrontando i valori simulati con i valori misurati sperimentalmente alle condizioni di lavoro dei punti A, B, C e D si può notare che l'errore è assolutamente trascurabile, come di evince leggendo la tabella seguente.

Punto	M <sub>t</sub> misurato	M <sub>t</sub> simulato	Errore
A	92	93,32	+1,4%
B	86	86,05	+0.1%
C	121	123,14	+1,8
D	114	113,5	-0.4%

L'errore ottenuto mediante calcolo è < 2%.

L'equazione rappresenta una superficie in una spazio tridimensionale definito dalle variabili Momento torcente, Velocità del filo e Velocità di discesa del filo.

Lo stesso criterio di lavoro ha guidato l'approccio sperimentale sul filo NiTi con l'obiettivo di verificare se e in che misura queste considerazioni si adattano al problema.

Qui di seguito sono riportati i risultati di alcune prove condotte sui prototipi di filo NiTi:

<b>Vf</b>	<b>m/s</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>20</b>
<b>Va</b>	mm/s	0,11	0,11	0,14	0,14	0,083
<b>RPM</b>		395	395	395	394	315
<b>M<sub>p1</sub></b>	Nm	90,3	84	102,7	101,2	95,3
<b>MT</b>	Nm	99,729	99,729	109,514	109,829	93,1706

<b>Vf</b>	<b>m/s</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>23,89</b>	<b>24,9</b>
<b>Va</b>	mm/s	0,083	0,17	0,17	0,3	0,11	0,14
<b>RPM</b>		476	315	476	93	380	395
<b>M<sub>p1</sub></b>	Nm	70,5	101,1	102,4	102,4	81	82
<b>MT</b>	Nm	85,9136	124,115	114,448	155,774	100,639	109,917

Applicando la relazione, validata sperimentalmente per il cavo in trefolo di acciaio, è emerso, dal confronto dei valori sperimentalmente rilevati durante l'uso del cavo superelastico, che il processo di taglio con quest'ultimo cavo è più efficace rispetto al cavo in trefolo di acciaio tradizionale.

$$M_t = 275V_f^{-0.2}V_Z^{0.4} = 275\frac{V_Z^{0.4}}{V_f^{0.2}}$$

Considerando anche la sola serie di dati sopra riportata, il valore del momento torcente misurato sperimentalmente è sempre inferiore a quello calcolato con la relazione. Da ciò si desume che il processo di taglio con il cavo superelastico è più efficace.

La relazione:

$$M_t = 275V_f^{-0.2}V_Z^{0.4} = 275\frac{V_Z^{0.4}}{V_f^{0.2}}$$

deve essere quindi adeguata, nel caso di cavo Ni-Ti, facendo una ampia serie di approfondimenti sperimentalmente.

### 7.3.PROBLEMATICHE APERTE E ULTERIORI SVILUPPI PREVISTI PER L'APPLICAZIONE INDUSTRIALE DEL CAVO IN SHAPE MEMORY ALLOY

---

Le principali problematiche applicative del cavo utensile con anima in lega Ni-Ti tuttora non completamente definite riguardano essenzialmente due ordini di problematiche:

- Giunzione di testa del cavo Ni-Ti e in generale del cavo monofilo
- Limitata casistica e ridotte informazioni sull'affidabilità in relazione all'impiego del cavo Ni-Ti per il taglio di materiali lapidei

La giunzione di testa, che è stato oggetto di alcune analisi e test nel corso del presente lavoro, costituisce uno degli aspetti più importanti per garantire un elevato livello performance del cavo utensile. La tecnologia oggi disponibile (cavo in trefolo d'acciaio) prevede infatti la soluzione di "chiudere" il cavo mediante la tradizionale sovrapposizione dei fili costituenti i trefoli (impalmatura). L'impiego di tale tecnica, unitamente all'adozione di specifiche soluzioni sviluppate da Co.Fi.Plast, permette di ripristinare cavi danneggiati e eventualmente di sostituire "perline" usurate".

L'impiego di un cavo monofilo di diametro di 2,5-3 mm, quale supporto per l'utensile abrasivo, deve necessariamente prevedere una giunzione diretta di testa per la quale, come sinteticamente descritto al Capitolo 6.1 sono state effettuate differenti test (saldatura laser, manicotto di giunzione, ecc.).

Le prove di lavorazione effettuate hanno fatto uso di cavi prototipali con giunzione mediante manicotto. Tale soluzione, che si è rivelata adeguata per effettuare i test richiede un significativo sviluppo in relazione all'impiego industriale soprattutto per limitare l'effetto di punti di significativa discontinuità lungo il cavo.

Tale aspetto riporta alla seconda problematica ancora non adeguatamente approfondita ossia l'aspetto affidabilità stico dell'impiego del cavo monofilo.



Tale aspetto rappresenta, vista la necessità di dimensionare il cavo utensile in modo economicamente ottimale (stessa durata del cavo di supporto e della perlina diamantata), un ambito di indagine ancora aperto che richiede numerose prove di durata tuttora in corso da parte di Co.Fi.Plast.

Le problematiche sopra citate, una volta risolte, permetteranno di estendere notevolmente l'impiego di cavi utensile per il taglio in segheria di materiali lapidei grazie anche alla semplificazione dei sistemi di lavorazione che beneficeranno di notevoli semplificazioni meccaniche e strutturali grazie all'adozione di cavi utensili incorporanti gli attuali complessi sistemi di pretensionamento.

## 8. BIBLIOGRAFIA

---

- [1] Martin F.X. Wagner and Gunther Eggeler. Stress and strain states in a pseudoelastic wire subjected to bending rotation. *Mechanics of Materials*, 38:1012–1025, 2006.
- [2] Taylor R. L. Auricchio, F. and J. Lubliner. Shape-memory alloys: Macromodeling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering*, 146:281–312, 1997.
- [3] V. T. L. Buono M. G. A. Bahia, B. M. Gonzalez. Fatigue behaviour of nickel titanium superelastic wires and endodontic instruments. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 29:518–523, 2006.
- [4] Nicholas P. Chironis Neil Sclater. *Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook*. McGraw-Hill, New York, 2001.
- [5] J. Fino J. Sheriff A.R. Pelton A. Wick, X.-Y. Gong. Bending fatigue characteristics of nitinol. In *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies October 3-7, 2004, Kurhaus Baden-Baden, Baden-Baden, Germany, 2004*.
- [6] H. Ohtsuka T. Ishihara B. Strnadela, S. Ohashi and S. Miyazaki. Cyclic stress-strain characteristics of Ti–Ni and Ti–Ni–Cu shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*, 202:148–156, 1995.
- [7] Yoshirou Shimeno Takashi Hachisuka Hisaaki Tobushia, \* and Kikuaki Tanaka. Influence of strain rate on superelastic properties of Ti–Ni shape memory alloy. *Mechanics of Materials*, 30:141–150, 1998.
- [8] R. Gauvina M. C. Piedboeuf and M. Thomas. Damping behaviour of shape memory alloys: Strain amplitude, frequency and temperature effects. *Journal of Sound and Vibration*, 214:885–901, 1995.

- [9] Hiroyuki Tamai and Yoshikazu Kitagawa. Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wire and its application to seismic resistance member for building. *Computational Materials Science*, 25:218–227, 2002.
- [10] R. E. HOBBS and NABIJOU. Relative movements within wire ropes bent over sheaves. *JOURNAL OF STRAIN ANALYSIS*, 30:2, 1995.
- [11] Shape Memory Alloys - Annual Review of Materials Science - Vol. 18: 25-45 (Volume publication date August 1988)
- [12] J Zheng IML Ridge and C R Chaplin. Measurement of cyclic bending strains in steel wire rope. *JOURNAL OF STRAIN ANALYSIS*, 35:6, 2000.
- [13] Antoniomaria Di Ilio and Antonio Togna. A theoretical wear model for diamond tools in stonecutting, 2003.
- [14] X.J. Yan & oth. Influence of heat treatment on the fatigue life of a laser-welded NiTi alloy wire. 2006.
- [15] Rezia Molino FEM and Multybody modeling of superelastic diamond wires for stone cutting, 2010
- [16] Yousef Payandeha & oth. Effect of martensitic transformation on the debonding propagation in Ni–Ti shape memory wire composite, 2009.

## 9. PUBBLICAZIONI

---

- Giuseppe Lucisano - L'intelligenza corre lungo un filo – Tecnologie del Filo (giu. 2011)
- Giuseppe Lucisano - Un utensile nuovo per produrre meglio e a costi ridotti - Utensili e Attrezzature (nov. 2011)