

**POLITECNICO DI TORINO**

**I FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E  
IL TERRITORIO**



**Tesi di Laurea Magistrale**

**Analisi teorico-sperimentale del comportamento del  
filo diamantato nel taglio di rocce carbonatiche**

Relatori

Prof. Marilena Cardu

Ing. Stefano Bianchini

Candidato

Gabriele Garetto

Marzo 2018

## *Ringraziamenti*

*Ringrazio la Professoressa Marilena Cardu per avermi permesso di vivere questa esperienza; l'Ingegnere Stefano Bianchini per la pazienza e i consigli.*

*Ringrazio le Aziende: Apuania Corsi per il materiale fornito, Atlas Copco per avermi ospitato e fatto osservare le macchine in prima persona, Mega Diamant (nella persona di Marco Bartoli) per la fornitura continua di fili e giunzioni.*

*Ringrazio Andrea Bernacca per avermi permesso di effettuare alcune prove nella sua cava, rallentando inevitabilmente tutti.*

*Ringrazio tutte le aziende che non hanno mai risposto alle mie e-mail, spronandomi a non smettere di cercare.*

*Ringrazio Andrea Vannucci, "Manao" e "Botton", di Gioia: cavaori dal cuore grande.*

*Ringrazio Luca, animo puro e cristallino, in un ambiente di squali.*

*Ringrazio gli amici di una vita, prima dei trenta partiamo, promesso.*

*Ringrazio mamma e papà, nonostante qualche capello bianco in più, mi avete dato una forza immensa.*

*Ringrazio Te, che mi aiuti a colorare i miei dipinti, troppo spesso grigi.*

*Ringrazio me stesso, per averci creduto e per crederci ancora.*

## *INDICE*

PREMESSA .....	1
CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE.....	2
1.1 LE ALPI APUANE .....	2
1.2 LA CAVA GIOIA (COLONNATA) .....	3
1.3 DOCUMENTI CONSULTATI.....	4
1.3.1 Comitato paritetico marmo.....	5
1.3.2 Università di Pisa .....	7
1.4 RIFERIMENTI NORMATIVI.....	11
1.4.1 Norma europea UNI EN 13236:2016.....	11
1.4.2 Decreto Legislativo 81/08 e s.m.i.....	15
1.4.3 Decreto Legislativo 17/10 e s.m.i.....	16
1.4.4 Norma europea UNI EN 15163:2017.....	16
CAPITOLO 2 - IL FILO DIAMANTATO.....	20
2.1 CARATTERISTICHE GENERALI .....	20
2.2 IL CAVO DI ACCIAIO ZINCATO .....	23
2.3 LE PERLINE DIAMANTATE .....	26
2.3.1 Perline elettrodeposte .....	26
2.3.2 Perline sinterizzate .....	27
2.4 MOLLE DISTANZIATRICI .....	28
2.5 FERMI (PRESSATORI).....	30
2.6 DISTANZIALI.....	30
2.7 MORSETTI DI GIUNZIONE.....	31
2.8 CAMPI DI APPLICAZIONE .....	34
CAPITOLO 3 – LA TAGLIATRICE A FILO DIAMANTATO .....	35
3.1 CARATTERISTICHE GENERALI .....	35

3.2 CENNI DI MECCANICA DEI FLESSIBILI .....	37
3.3 CENNI DI MECCANICA DELLA TAGLIATRICE A FILO DIAMANTATO DA CAVA.....	39
3.3.1 Azione della forza centrifuga agente sulla puleggia motrice .....	40
3.3.2 Moto di alimentazione e di taglio.....	42
3.3.3 Forze presenti sull'arco di contatto .....	44
3.4 LE TAGLIATRICI IMPIEGATE PRESSO LA CAVA GIOIA .....	46
3.4.1 Lochtmans LGR.....	47
3.4.2 Apuania Corsi MF 5000.....	49
3.4.3 Atlas Copco SpeedCut 100 .....	52
3.5 I SISTEMI DI SICUREZZA DELLE TAGLIATRICI A FILO .....	54
3.5.1 Sistemi di contenimento: nastro e pannelli in acciaio di protezione ....	54
3.5.2 Sistemi di prevenzione dello strappo: inverter e cella di carico.....	56
3.5.2.1 Inverter .....	57
3.5.2.2 Cella di carico.....	58
3.5.3 Controllo dei dati di taglio istantanei .....	59
3.5.3.1 Sistema di controllo PID .....	64
CAPITOLO 4 – L'ESPERIENZA DI CAVA.....	68
4.1 CONSIDERAZIONI SUL FILO DIAMANTATO.....	69
4.2 QUESTIONE FILO TRADIZIONALE – FILO COPERTO.....	69
4.3 MORSETTI DI GIUNZIONE.....	73
4.4 SOLLECITAZIONI E USURA DEL FILO DIAMANTATO .....	77
4.4.1 Avvio e fine taglio.....	77
4.4.2 Dimensione e numero dei blocchi.....	80
4.4.3 Usura asimmetrica, acqua di raffreddamento, piegature.....	82
4.5 TAGLI OBLIQUI E VERSO ROVESCIO .....	85
4.6 COSTI DEL FILO DIAMANTATO.....	87

4.7 BANCA DATI DI CAVA.....	88
CAPITOLO 5 – PROVE DI LABORATORIO.....	91
5.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA .....	91
5.2 MATERIALE UTILIZZATO .....	94
5.3 MODALITÀ OPERATIVE .....	96
5.4 TEST SUI PRESSATORI.....	98
5.5 TEST SUI MORSETTI DI GIUNZIONE.....	101
5.5.1 Giunzioni in acciaio 9x20 mm .....	101
5.5.2 Giunzioni in acciaio 9x25 mm .....	102
5.5.3 Giunzioni in rame 9x30 mm.....	103
5.5.4 Giunzioni in acciaio “avvitabili” 9x25 mm.....	104
5.5.5 Giunzioni pressate con doppia pressatura .....	104
5.6 TEST DI SFILAMENTO DELLE PERLINE.....	107
5.6.1 Sfilamento perline configurazione gomma-perla-gomma.....	109
5.6.2 Sfilamento perline configurazione solo perla (filo gommato) .....	109
5.6.3 Sfilamento perline configurazione plastica-perla-plastica .....	110
5.6.4 Sfilamento perline configurazione solo perla (filo plastificato).....	110
5.7 ANALISI DEI RISULTATI.....	111
5.7.1 Test sui pressatori.....	112
5.7.2 Test sulle giunzioni .....	113
5.7.3 Test di sfilamento delle perline diamantate.....	116
CAPITOLO 6 – ANALISI DI DUREZZA DELLE GIUNZIONI .....	120
6.1 PROVE DI MICRODUREZZA VICKERS.....	120
6.2 RISULTATI PROVE DI MICRODUREZZA VICKERS .....	121
6.3 IMMAGINI AL MICROSCOPIO METALLOGRAFICO .....	122
6.3.1 Giunzioni in acciaio 9x20 mm .....	123
6.3.2 Giunzioni in acciaio 9x25 mm .....	123

6.3.3 Giunzioni in rame 9x30 mm.....	125
6.3.4 Giunzioni in rame 10x30 mm.....	125
CAPITOLO 7 – CAMPAGNA SPERIMENTALE IN CAVA .....	127
7.1 ANALISI TEORICA DELLE FORZE IN GIOCO .....	127
7.2 RILEVAMENTO SPERIMENTALE IN CAVA DELL'ARRETRAMENTO ISTANTANEO DELLA TAGLIATRICE .....	131
CONCLUSIONI.....	133
BIBLIOGRAFIA .....	136
ALLEGATO 1 .....	139
ALLEGATO 2 .....	144
ALLEGATO 3 .....	149
ALLEGATO 4 .....	154
ALLEGATO 5 .....	160
ALLEGATO 6 .....	166
ALLEGATO 7 .....	172
ALLEGATO 8 .....	175
ALLEGATO 9 .....	177
ALLEGATO 10 .....	179
ALLEGATO 11 .....	183
ALLEGATO 12 .....	187
ALLEGATO 13 .....	191
ALLEGATO 14 .....	195

## *PREMESSA*

Lo scopo dello studio è stato quello di effettuare un'analisi oggettiva e quantitativa delle caratteristiche di resistenza delle macchine impiegate per il taglio di bancate e per la riquadratura di blocchi di marmo in un bacino di Carrara. Le caratteristiche analizzate non si sono limitate alle analisi delle tagliatrici a filo, ma hanno riguardato anche il comportamento degli utensili e della relativa componentistica. Inoltre, è stata effettuata un'analisi di differenti tipologie di tagliatrici a filo diamantato presenti nella cava analizzata.

Lo studio, in particolare, ha avuto la finalità di definire tecnicamente le condizioni di utilizzo e di resistenza del filo diamantato in quanto, dal punto di vista tecnologico il problema, ad oggi, è stato affrontato in modo limitato e poco approfondito.

Le analisi effettuate si sono sviluppate in tre fasi successive: la prima fase, protrattasi per circa due mesi, è stata dedicata ad indagini continuative di cantiere, al fine di affrontare con approccio scientifico il gran numero di problemi che si verificano costantemente in cava; nel contempo è stata condotta un'approfondita analisi di letteratura circa le problematiche del filo diamantato e le normative nazionali ed europee vigenti. La continuativa permanenza in cava ha consentito di analizzare il comportamento delle tagliatrici a filo diamantato in fase operativa e di comprenderne a fondo le modalità di taglio.

La seconda fase, della durata di circa un mese, ha riguardato la realizzazione di prove di sfilamento in laboratorio dei morsetti di giunzione e dei pressatori del filo diamantato al fine di valutarne la resistenza a trazione. Per indagare sulle caratteristiche microstrutturali di tali materiali, sono stati effettuati presso il DISAT del Politecnico di Torino alcuni test (microdurezza Vickers) e analisi al microscopio metallografico per determinare la composizione delle giunzioni.

La terza fase, della durata di circa un mese, è stata dedicata ad uno studio approfondito in cantiere delle modalità operative di alcune tagliatrici a filo diamantato, al fine di valutare le forze in gioco durante il taglio, mediante acquisizioni in tempo reale degli spostamenti compiuti dalla macchina durante l'arretramento.

## CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE

---

### 1.1 LE ALPI APUANE

La catena delle Alpi Apuane è nella Toscana Nord Occidentale e fa parte del Subappennino toscano. È delimitata geograficamente dalla valle del Fiume Magra (e del suo affluente Aulella) a nord-ovest, dalla valle del Fiume Serchio a est e dalla Riviera Apuana a sud. La superficie totale del massiccio è suddivisa tra le province di La Spezia, Massa-Carrara, Lucca e Pisa e ricopre una superficie di più di 1000 km<sup>2</sup> (Figura 1.1a,1.1b)



Figura 1.1a - 1.1b: Le Alpi Apuane

Dal punto di vista geologico le Alpi Apuane costituiscono un sistema a sé stante rispetto all'Appennino, ed emerso in epoca più antica. Nel complesso, esse sono

composte maggiormente da formazioni calcaree di varia natura e tessitura: si tratta infatti di una zona resa celebre per la ricchezza, sia in termini qualitativi che quantitativi, dei suoi marmi universalmente riconosciuti per pregio e qualità.

L'area di affioramento dei depositi marmiferi è di circa 65 km<sup>2</sup> ed è ritenuto possibile un approvvigionamento di marmo estraibile pari a 30 Mt (Figura 1.2).

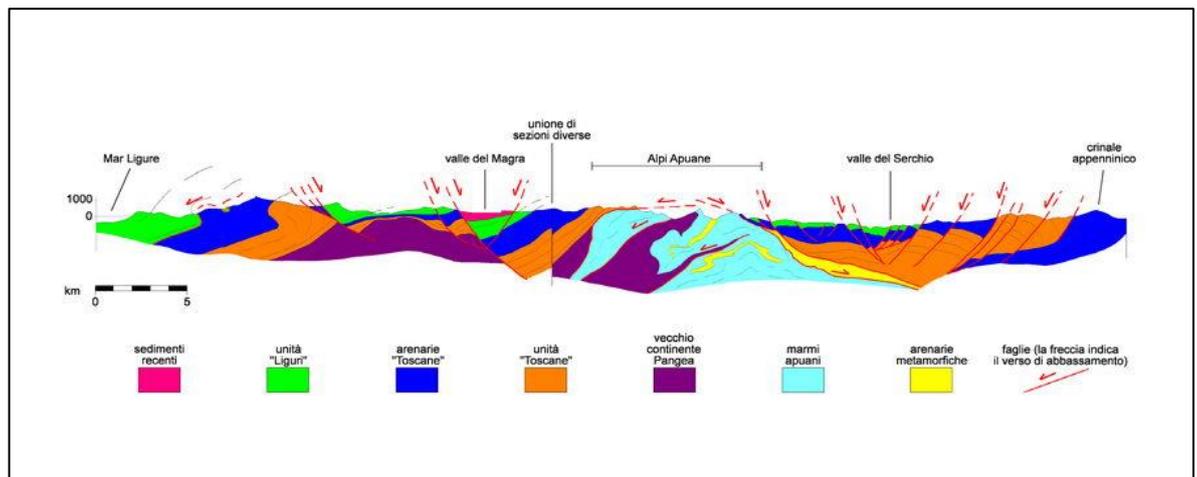


Figura 1.2: Sezione geologica delle Alpi Apuane

## 1.2 LA CAVA GIOIA (COLONNATA)

I bacini marmiferi più importanti del complesso delle Apuane sono tre: il bacino di Miseglia, che rappresenta la parte centrale della regione marmifera carrarese e conta una cinquantina di cave, di cui quaranta attive, distribuite su una superficie complessiva di circa 300 ha; il bacino di Torano, sede delle celebri cave di marmo statuario utilizzato dai più celebri artisti di tutti i tempi; il bacino di Colonnata che costituisce la parte orientale della regione marmifera carrarese e conta una settantina di cave, di cui quarantaquattro attive, distribuite su una superficie di 500 ha. In quest'ultimo bacino e più precisamente nella cava di Gioia (*Cooperativa cavatori di Gioia S.c.r.l*) è stato svolto il lavoro di Tesi e di raccolta dati (Figura 1.3).



Figura 1.3: Cava Gioia

### 1.3 DOCUMENTI CONSULTATI

Il presente lavoro è stato preliminarmente impostato secondo la consultazione di bibliografia tecnica di riferimento inerente il taglio del marmo con filo diamantato. Le fonti principali consultate sono state: *“Comitato Paritetico Marmo”* e *“Università di Pisa”*.

### 1.3.1 Comitato paritetico marmo

Uno dei pochi studi atti a determinare in maniera esaustiva il comportamento del filo diamantato durante il taglio del marmo è stato effettuato dal *Comitato Paritetico Marmo di Pietrasanta (LU)* in un periodo compreso tra il 1997 ed il 2000. Lo studio è stato condotto in fasi successive ed ha riguardato diversi aspetti tecnici del taglio del marmo con filo diamantato in alcune cave nella Provincia di Lucca. Durante la fase I si sono condotte analisi relative ai problemi legati all'uso di sei tipologie di filo diamantato rivestito prodotto da diverse aziende: Diamant Boart, Co.Fi.Plast, Geo Service, Winter, Big Diam, Benetti. Ogni filo diamantato è stato esaminato sia sotto il profilo tecnico sia dal punto di vista dell'interazione utensile-marmo (variabile dipendente dal tipo di marmo sottoposto al taglio). Sono state quindi individuate le problematiche principali relative all'utilizzo del filo (perlopiù comuni ad ogni filo): rottura e proiezione di materiali, corretta refrigerazione con acqua, problemi all'avviamento del filo, problemi a inizio e fine taglio, comportamento delle giunzioni, ovalizzazione delle perline diamantate, qualità ed usura della plastica di rivestimento del filo, problemi legati alla fratturazione delle zone di taglio, problemi di rottura dell'anima in acciaio del filo stesso ed altri.

La fase II ha riguardato inizialmente una serie di prove di sfilamento delle perline dei fili prodotti dalle case costruttrici Benetti, Co.Fi.Plast, Diamant Boart e Winter. Le prove sono state effettuate con apposite strumentazioni di registrazione del carico e in condizioni di temperatura del filo variabili (temperatura ambiente, 60°C e 90°C) dopo averlo sottoposto preventivamente a cicli di gelività.

Il dato emerso dalle prove di sfilamento delle perline è, per ogni tipologia di filo, pressoché lo stesso: si ha una diminuzione della resistenza a sfilamento all'aumentare della temperatura, nonostante l'elemento di plastificazione funga da elemento resistente. Altro elemento di riduzione della tenuta è l'ovalizzazione delle perline, che ne riduce la resistenza a trazione. Sono state indicate quindi alcune pratiche per ridurre il rischio di sfilamento: refrigerare con attenzione e continuità il filo diamantato durante il taglio, tenere la tagliatrice a distanza ridotta dal fronte di taglio ed evitare l'ovalizzazione delle perline installando il filo nel miglior modo possibile.

Sono successivamente state effettuate delle prove di rottura sui fili Diamant Boart e Co.Fi.Plast, forniti da una cava (quindi con diverse ore di lavoro all'attivo e circa 1000 m<sup>2</sup> di marmo tagliato); tale analisi è di rilevante importanza in quanto, essendo il filo rivestito, non consente l'ispezione visiva dell'anima in acciaio e quindi una valutazione di massima del suo stato di usura.

I risultati, seppur statisticamente poco significativi (sono state effettuate tre prove per ogni filo), hanno dimostrato una sensibile riduzione del carico nominale del filo Co.Fi.Plast a seguito dei cicli di fatica cui è stato sottoposto in cava; diverso è il discorso per il filo Diamant Boart che in 2 prove su 3 ha superato il carico a rottura nominale fornito dal produttore.

Un altro set di prove è stato effettuato per la valutazione dello sfilamento dei giunti (dispositivi metallici che uniscono due spezzoni di filo per costruire l'anello chiuso). Sono stati analizzati giunti di diversa tipologia (a tubetto, a vite) e di diversa composizione (rame, acciaio); il quadro emerso è molto complesso: nessuna giunzione ha soddisfatto i requisiti fondamentali ossia tenuta allo sfilamento unitamente con impedimento della rottura a flessione ciclica del cavetto. Altro elemento emerso dallo studio è che i giunti in acciaio hanno fatto registrare caratteristiche di gran lunga superiori a quelli in rame.

Durante la fase III sono state eseguite delle analisi per la caratterizzazione di due giunti in acciaio. Sono state eseguite delle analisi chimiche, delle prove di durezza Brinell, esami metallografici e prove di microdurezza Vickers allo scopo di caratterizzare in maniera più sistematica le giunzioni al fine di un maggior controllo dei processi di taglio. Dalle analisi chimiche e metallografiche effettuate è emerso che i materiali sono acciai ipoeutetoidi (percentuale di C < 0.8%) ossia con una struttura formata dal costituente ferrite e dall'aggregato perlite. Si evince, dallo studio, come a una maggiore quantità di perlite (maggior contenuto in C) corrisponda una minor elasticità e quindi un incrudimento maggiore all'atto della pressatura del giunto, il che rende il giunto più resistente a prove di sfilamento.

### 1.3.2 Università di Pisa

Uno studio molto importante riguardante il comportamento del filo diamantato a seguito di rottura è stato condotto nel 2007 dall'Università di Pisa ed in particolar modo dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione (DIMNP) in collaborazione con la Società Consorzio "Macchine Marmo Sicure", l'Unione Industriali di Massa Carrara e la Asl 1 di Carrara. In un ambiente opportunamente allestito sono state condotte delle prove a strappo sue varie tipologie di filo diamantato (plastificato e tradizionale) mediante l'ausilio di una tagliatrice in funzione durante il taglio di un blocco di marmo. Le prove sono state effettuate sia mediante taglio "diretto" ossia con il tratto di filo teso posto più lontano dal suolo, sia con movimento della macchina di tipo "inverso", ossia avente il tratto teso posto in vicinanza al suolo. Con lo scopo di studiare la tipologia e la disposizione delle protezioni da adottare in cava, ai fini di sicurezza, sono state eseguite tre tipologie di prove:

- prove preliminari per la messa a punto delle apparecchiature;
- prove eseguite dopo aver tolto le protezioni, per esaminare il comportamento del filo in assenza di vincoli e trarre utili informazioni sulla forma e sul posizionamento delle protezioni da adottare;
- prove per l'impiego delle protezioni normalmente presenti sulle macchine di taglio, per valutarne l'efficacia.

Ogni prova è stata effettuata utilizzando fili preventivamente indeboliti o utilizzando un giunto di cui un estremo fosse stato pressato in modo diverso da quanto venisse effettivamente fatto in cava: ciò è servito per portare il filo diamantato a rottura rimanendo nei limiti di potenza della tagliatrice utilizzata.

La prima serie di prove, eseguite senza le protezioni della macchina, ha permesso di analizzare il fenomeno del "colpo di frusta" (Figura 1.4), mediante un sistema di acquisizione di immagini ad alta risoluzione. Il moto del filo diamantato all'estremità interna al blocco tende a fermarsi per le forze di attrito che tendono a smorzarne il moto, mentre il tratto di filo che costituisce il ritorno tra puleggia motrice e blocco prosegue a causa dell'energia cinetica posseduta prima dello strappo, dando luogo ad una situazione di estrema pericolosità poiché vi è il rischio di proiezioni di elementi di filo a velocità superiore di quella posseduta dal filo stesso prima della rottura (40 m/s). Di notevole importanza è il fatto che le

proiezioni di elementi di filo si siano verificate anche in alcuni casi in cui era stato impiegato il filo gommato.

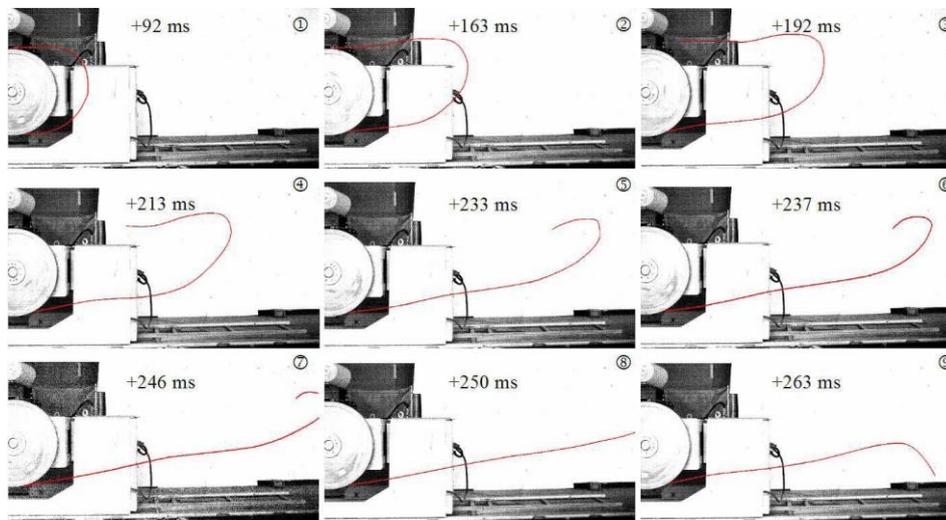


Figura 1.4: Fenomeno del “Colpo di frusta”, con moto della macchina di tipo diretto, monitorato con immagini ad altissima risoluzione temporale (Tantussi, 2008)

Dall’analisi dei dati sperimentali, lo studio ha messo in luce alcune importanti considerazioni dal punto di vista della sicurezza.

Per quanto riguarda i pericoli derivanti dalla rottura del filo diamantato durante il taglio, si ha la proiezione sia di spezzoni di filo che di elementi non rigidamente fissati su di esso (perline, molle, distanziali). Il maggior numero di rotture si è verificato in corrispondenza del giunto a causa di sfilamento o rottura dello stesso. Per quanto riguarda lo strappo in corrispondenza del cavo di acciaio, si hanno meno probabilità di accadimento a causa degli elevati fattori di sicurezza cui questi sono soggetti: solitamente le case produttrici forniscono cavi d’acciaio con resistenza 1900 kg, mentre la tagliatrice a filo possiede un sistema di blocco se l’amperaggio richiesto supera una certa soglia (tale da eccedere i 300 kg di trazione). Viene comunque posta l’attenzione sul fenomeno della resistenza a fatica dei cavi usurati: tale parametro influenza pesantemente la resistenza ultima del cavo d’acciaio, nonostante la resistenza nominale sia molto più elevata.

Per quanto riguarda i fenomeni conseguenti alla rottura del filo, qualora la macchina sia avviata in modo “diretto”, la rottura può avvenire essenzialmente in tre zone:

- all’interno del blocco. In questa situazione l’estremità del filo a valle della rottura si muove verso l’alto, arrivando talvolta a colpire la protezione soprastante in kevlar minimizzando il rischio di colpo di frusta;

- nel tratto maggiormente teso tra blocco e puleggia. Il filo a valle della rottura continua il suo moto lungo la direzione posseduta prima dello strappo andando ad urtare il carter o le protezioni vicino ad esso. Per quanto riguarda il moto del tratto di filo a monte della rottura, possono verificarsi due casi: punto di rottura immediatamente in uscita dal blocco o punto di rottura in vicinanza della puleggia. Nel primo caso, lo spezzone rimane all'interno del blocco e può urtare o no la protezione superiore in kevlar, mentre nel secondo l'energia posseduta dalla parte del filo compresa tra blocco e punto di rottura, può determinare un parziale o totale sfilamento del cavo dal blocco, con urti sulle protezioni superiori e addirittura sulla macchina.
- sulla puleggia. In quest'ultimo caso la parte inferiore del cavo continua nel suo moto e, in taluni casi, può risalire lungo il blocco. Questo moto è favorito dal fatto che la parte superiore del filo continua ad avanzare in direzione della puleggia trascinandosi dietro anche la parte rimasta nel blocco. In presenza delle pulegge folli, l'estremità del filo compresa tra la puleggia superiore e il punto di rottura risale urtando contro le protezioni fisse, per poi ricadere nello spazio fra la puleggia ed il carter. Il resto del filo a monte della rottura continua il suo moto verso la puleggia e, potendo sollevarsi verso l'alto nel caso di sfilamento dal blocco, urta le protezioni fisse e si insinua nello spazio tra le eventuali pulegge folli, quella motrice ed il carter.

Qualora la macchina stesse lavorando in modo "inverso", la parte di filo interessata a rottura è quella più vicina al suolo, ossia quella su cui agisce la tensione massima. Dopo la rottura, il moto dei due spezzoni di filo continua, mantenendosi sostanzialmente all'interno del piano di taglio. Lo spezzone che si trova "lato blocco" viene inizialmente decelerato, mentre quello "lato puleggia" viene accelerato dalle forze derivanti dal rilascio di energia elastica accumulata nel filo teso. A causa del ritorno elastico il filo si distacca dalla puleggia, che cessa così di esercitare la sua azione di trascinamento.

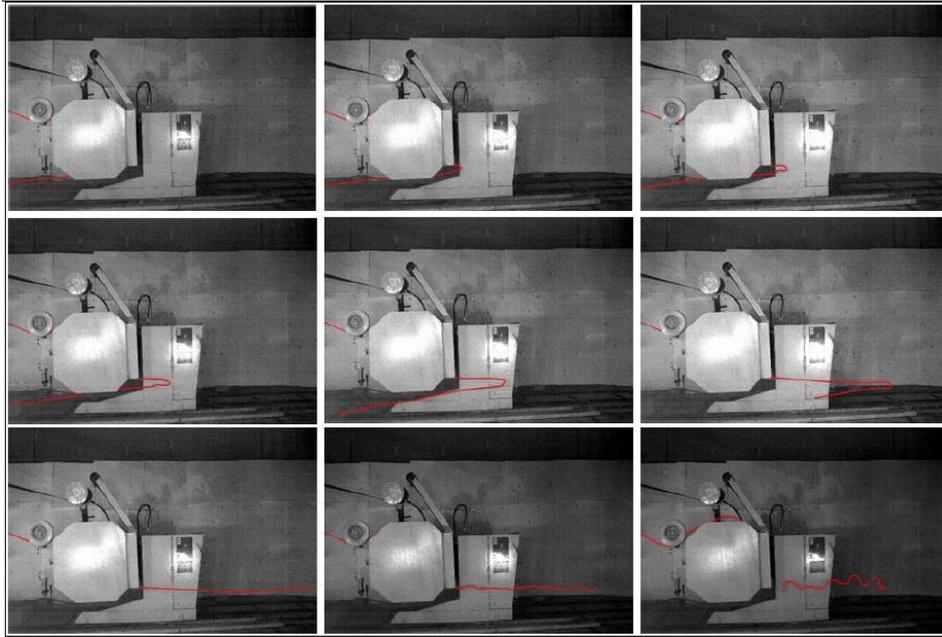


Figura 1.5: Fenomeno del “Colpo di frusta”, con moto della macchina di tipo inverso, monitorato con immagini ad altissima risoluzione temporale (Tantussi, 2008)

Per quanto riguarda l’effetto delle proiezioni, sono state riscontrate condizioni di grave pericolo qualora non siano state impiegate le dovute strutture di protezione; in tal caso si verifica il colpo di frusta, con conseguenti proiezioni di elementi (sia nel caso di filo gommato sia tradizionale) a velocità elevatissima. Le protezioni rigide, poste dietro la puleggia, risultano necessarie per arrestare il moto del filo verso la zona posteriore dell’impianto; tale protezione deve avere uno sviluppo verso l’alto fino a congiungersi con la protezione a nastro. Il carter della tagliatrice dovrebbe essere realizzato senza elementi sporgenti che interferiscano con il filo dopo lo strappo; meglio ancora sarebbe la realizzazione di un carter tale da poter contenere il filo e smorzare la sua energia dopo la rottura. La protezione superiore in kevlar è necessaria per limitare i moti del filo verso l’alto; è inoltre opportuno che circondi la parte posteriore del blocco e venga fissata a terra. In caso di rottura, avendo posto le adeguate protezioni, le proiezioni del filo gommato sono minime, mentre quelle del filo tradizionale avvengono nella zona tra macchina e blocco o in fasce laterali ridotte. La presenza sul piano di lavoro di detriti grossolani è deleteria in quanto possono verificarsi rimbalzi con direzioni di proiezione imprevedibili, per cui è comunque opportuno prevedere una zona di sicurezza laterale.

## 1.4 RIFERIMENTI NORMATIVI

Il presente elaborato è stato svolto tenendo sempre in considerazione le normative vigenti in termini di salute e sicurezza sul lavoro; le prove sperimentali eseguite e le successive considerazioni sono state effettuate seguendo le specifiche tecniche imposte da normative italiane ed europee.

### 1.4.1 Norma europea UNI EN 13236:2016

La Norma UNI EN 13236, recepita a livello italiano il 28 gennaio 2016, riguarda i *Requisiti di sicurezza per prodotti superabrasivi*; vi vengono specificati i requisiti e/o le misure per la rimozione o la riduzione dei pericoli derivanti dalla progettazione e dall'applicazione dei prodotti superabrasivi. Questa norma si applica solamente ai prodotti superabrasivi che contengono diamante naturale o sintetico o nitruro di boro cubico. Essa contiene inoltre le procedure e le prove per la verifica della conformità ai requisiti, così come le informazioni di sicurezza per l'utilizzo, che devono essere messe a disposizione dell'utente da parte del fabbricante.

La norma tratta essenzialmente due tipologie di prodotti superabrasivi: dischi (mole) e fili diamantati. Poiché il presente lavoro è stato svolto ponendo l'attenzione sul taglio del marmo in cava, si è posta l'attenzione preferenzialmente ai riferimenti normativi riguardanti il filo diamantato.

La norma impone i seguenti requisiti minimi:

- **CAVO DI SUPPORTO:** i cavi di supporto dei fili diamantati sono soggetti a frequente rottura dovuta allo stress meccanico o alla fatica del filo; ciò dipende dal tipo di costruzione, dal tipo di applicazione e dalle condizioni operative. Perciò, un cavo deve essere selezionato dopo aver dimostrato di resistere a fatica e preferibilmente si impiega un cavo multi-trefolo composto da molteplici fili, ed esempio 6 x 7 su anima da 19.

I cavi di supporto devono avere una resistenza a trazione minima di 800 N/mm<sup>2</sup>, in relazione al diametro del filo.

- **REQUISITI PER FILI TRADIZIONALI:** per quanto riguarda fili le cui perline abrasive sono trattenute mediante molle, anelli pressati (fermi) e

anelli distanziatori, il diametro del foro delle perline abrasive deve avere i seguenti vincoli:

- a) per quanto riguarda un filo diamantato nuovo: il foro della perline abrasiva deve essere maggiore di 0.4 mm rispetto al diametro del filo;
- b) per quanto riguarda un filo diamantato usato: il foro della perline abrasiva deve essere maggiore di 0.6 mm rispetto al diametro del filo.

Devono essere montate un massimo di 5 perline abrasive tra due anelli pressati (fermi).

Dopo il montaggio sul cavo di supporto, quest'ultimo e gli anelli pressati (fermi) non devono mostrare alcuna traccia di rottura.

Entrambe le estremità delle molle devono essere a spirale chiusa e piatta.

- REQUISITI PER FILI DIAMANTATI MONTATI CON PLASTICHE E GOMMA VULCANIZZATA: tutte le perline devono essere montate sul cavo di supporto mediante plastica o gomma vulcanizzata.
- REQUISITI PER GIUNTI E ANELLI PRESSATI:  
Il giunto del filo diamantato deve essere in grado di reggere almeno il 30% della capacità di carico del cavo di supporto.  
Gli anelli pressati (fermi) devono essere in grado di reggere 1/12 della capacità di carico del cavo di supporto senza muoversi.
- MASSIMA VELOCITÀ DI FUNZIONAMENTO:  
La massima velocità di funzionamento del filo diamantato non deve eccedere i 40 m/s.

La norma prevede anche le procedure standardizzate per la Dichiarazione di Conformità del filo diamantato. I metodi di verifica di conformità sono i seguenti:

- ISPEZIONE VISIVA:  
Nell'ispezione visiva ogni difetto visibile del filo diamantato è identificato. I fili diamantati plastificati o costituiti da gomma vulcanizzata devono essere controllati per valutare la perdita di alcuni segmenti.
- TEST DI RESISTENZA DI CAVO DI SUPPORTO, ANELLO PRESSATO (FERMO) E GIUNTO:  
Nel test per la determinazione della resistenza a trazione del cavo di supporto, i singoli componenti devono rispettare i valori definiti precedentemente. Questa procedura di test può essere sostituita da

un'adeguata certificazione di prodotto del fornitore del cavo e da un certificato di esecuzione del test.

- TEST DI ABRASIVITÀ DELLE PERLINE:

Nel caso in cui si usi un filo diamantato tradizionale, devono essere rispettati i limiti di taglio citati precedentemente.

- TEST DI RESISTENZA DI GIUNTI E ANELLI PRESSATI (PRESSATORI):

- Il test di resistenza dei giunti è effettuato mediante un dispositivo idoneo: il pezzo di prova è composto da due segmenti di filo uniti da una connessione. Entrambi gli estremi del filo sono brasati, Figura 1.6. Il filo è caricato con la forza F, la quale è incrementata finché il pezzo di connessione si allenta dal filo. La forza sufficiente è verificata se la massima tensione registrata ha raggiunto il minimo valore citato in precedenza (almeno il 30% della capacità di carico del cavo di supporto).

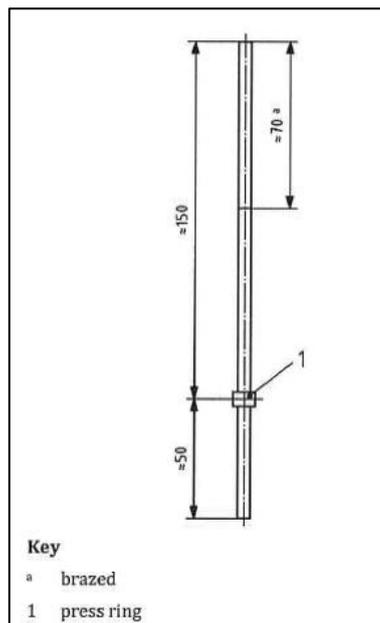


Figura 1.6: Schematizzazione per prova di resistenza del giunto, UNI 13236 (misure in mm)

Per quanto riguarda il test di resistenza del fermo, il pezzo di prova deve essere preparato come mostrato in Figura 1.7. L'estremità non vincolata è brasata per evitare l'estrazione dal morsetto dovuta al raddrizzamento del filo.

Il pezzo di prova è bloccato nella macchina atta ad effettuare il test. La piastra di spinta del fermo deve avere un foro che abbia diametro superiore a quello del filo di 1 mm.

La piastra di spinta è caricata con una forza avente velocità di avanzamento di 25 mm/min. La forza  $F$  che agisce sulla piastra di spinta è misurata e registrata.

La forza applicata tramite la piastra di spinta è incrementata finché il fermo si muove sul filo di 25 mm.

La resistenza è verificata se il massimo valore di resistenza tensionale raggiunge il minimo valore citato precedentemente (1/12 della capacità di carico del cavo di supporto senza muoversi).

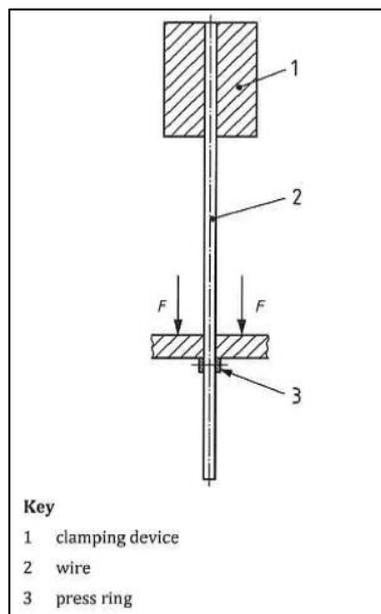


Figura 1.7: Schematizzazione per prova di resistenza del pressatore, UNI 13236 (misure in mm)

In definitiva, per la Dichiarazione di Conformità CE dei fili diamantati, sono necessarie le seguenti informazioni:

- a) Fabbricante, fornitore, importatore, marchio di fabbrica;
- b) Dimensioni nominali;
- c) Massima velocità di funzionamento;
- d) Direzione di funzionamento;
- e) Dichiarazione di conformità UNI EN 13236;
- f) Codice di tracciabilità del prodotto;

#### 1.4.2 Decreto Legislativo 81/08 e s.m.i

Il Decreto Legislativo 81 del 2008 rappresenta a livello nazionale il testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro. Il campo di applicazione (*TITOLO I, CAPO I, Articolo 3*) riguarda tutti i settori di attività, privati e pubblici, e tutte le tipologie di rischio. Tale D.Lgs. fissa in maniera inequivocabile le misure di gestione della prevenzione nei luoghi di lavoro, definendo le misure di tutela e obblighi dei soggetti coinvolti nell'attività lavorativa (*TITOLO I, CAPO III, SEZIONE I, Articoli 15 – 27*).

Di rilevante importanza ai fini del presente elaborato è il *TITOLO III: Uso delle attrezzature di lavoro e dei dispositivi di protezione individuale*. Importante è citare il *CAPO I, Articolo 69 – Definizioni*, in esso vengono univocamente definiti:

- a) *Attrezzatura di lavoro*: qualsiasi macchina, apparecchio, utensile o impianto, inteso come il complesso di macchine, attrezzature e componenti necessari all'attuazione di un processo produttivo, destinato ad essere usato durante il lavoro.
- b) *uso di una attrezzatura di lavoro*: qualsiasi operazione lavorativa connessa ad una attrezzatura di lavoro, quale la messa in servizio o fuori servizio, l'impiego, il trasporto, la riparazione, la trasformazione, la manutenzione, la pulizia, il montaggio, lo smontaggio;
- c) *zona pericolosa*: qualsiasi zona all'interno, ovvero in prossimità, di una attrezzatura di lavoro nella quale la presenza di un lavoratore costituisce un rischio per la salute o la sicurezza dello stesso;
- d) *lavoratore esposto*: qualsiasi lavoratore che si trovi interamente o in parte in una zona pericolosa;
- e) *operatore*: il lavoratore incaricato dell'uso di una attrezzatura di lavoro o il datore di lavoro che ne fa uso.

Fondamentale risulta anche il *CAPO I, Articolo 70 – Requisiti di sicurezza*:

- a) Salvo quanto previsto al comma 2, le attrezzature di lavoro messe a disposizione dei lavoratori devono essere conformi alle specifiche disposizioni legislative e regolamentari di recepimento delle Direttive comunitarie di prodotto.
- b) Le attrezzature di lavoro costruite in assenza di disposizioni legislative e regolamentari, e quelle messe a disposizione dei lavoratori antecedentemente all'emanazione di norme legislative e regolamentari di

recepimento delle Direttive comunitarie di prodotto, devono essere conformi ai requisiti generali di sicurezza di cui all'ALLEGATO V (*“REQUISITI DI SICUREZZA DELLE ATTREZZATURE DI LAVORO COSTRUITE IN ASSENZA DI DISPOSIZIONI LEGISLATIVE E REGOLAMENTARI DI RECEPIMENTO DELLE DIRETTIVE COMUNITARIE DI PRODOTTO, O MESSE A DISPOSIZIONE DEI LAVORATORI ANTECEDENTEMENTE ALLA DATA DELLA LORO EMANAZIONE”*)

#### 1.4.3 Decreto Legislativo 17/10 e s.m.i

Il Decreto Legislativo 17 del 2010 rappresenta a livello nazionale la cosiddetta *“Direttiva Macchina”*. Tale decreto è applicato tra gli altri ad (*ART. 1*): macchine, attrezzature intercambiabili, componenti di sicurezza ecc...

La definizione di macchina è fornita nell' *ART. 2*: *“insieme equipaggiato o destinato ad essere equipaggiato di un sistema di azionamento diverso dalla forza umana o animale diretta, composto di parti o di componenti, di cui almeno uno mobile, collegati tra loro solidamente per un'applicazione ben determinata”*.

La direttiva macchine copre un campo estesissimo, senza stabilire soluzioni tecniche di dettaglio, ma fa esplicito riferimento ai pericoli di cui bisogna tenere conto nell'ipotesi di un impiego appropriato del prodotto e del relativo utensile.

Il produttore, per apporre il Marchio di conformità CE, deve dimostrare di aver seguito le prescrizioni della direttiva in termini tecnici (fascicolo tecnico), ivi comprese le istruzioni di installazione, uso, manutenzione, smaltimento, ecc.

#### 1.4.4 Norma europea UNI EN 15163:2017

La Norma UNI EN 15163, recepita a livello italiano il 21 settembre 2017, riguarda la conformità ai requisiti essenziali di salute e sicurezza per macchine ed impianti atti allo sfruttamento ed alla lavorazione di pietre naturali, nonché i requisiti di sicurezza per tagliatrici a filo diamantato sia mobili (da cava) che fisse (telai industriali). Vengono trattati tutti i pericoli significativi, le situazioni e gli eventi pericolosi relativi alle tagliatrici a filo diamantato.

Questa norma appartiene alla tipologia C (norme di sicurezza per categorie di macchine); tale tipologia tratta, appunto, requisiti di sicurezza dettagliati per una particolare macchina o gruppo di macchine ed è indirizzata a tutti i soggetti interessati alla produzione, al commercio o all'utilizzo di macchine specifiche.

Vengono forniti i requisiti di sicurezza e le misure protettive riguardanti l'utilizzo delle macchine tagliatrici. Per quanto riguarda i comandi delle macchine da cava (i cui componenti più importanti sono: avvio, arresto in condizioni normali, arresto in condizioni di emergenza, modalità di selezione da remoto, se presente) vengono fornite le specifiche del posizionamento e le caratteristiche che essi devono possedere per la conformità. La zona di rischio è definita in maniera differente per tagli verticali e tagli orizzontali. Per quanto riguarda i tagli verticali, posta  $L$  la lunghezza del filo diamantato, la zona interdetta alla presenza di operatori è mostrata in Figura 1.8.

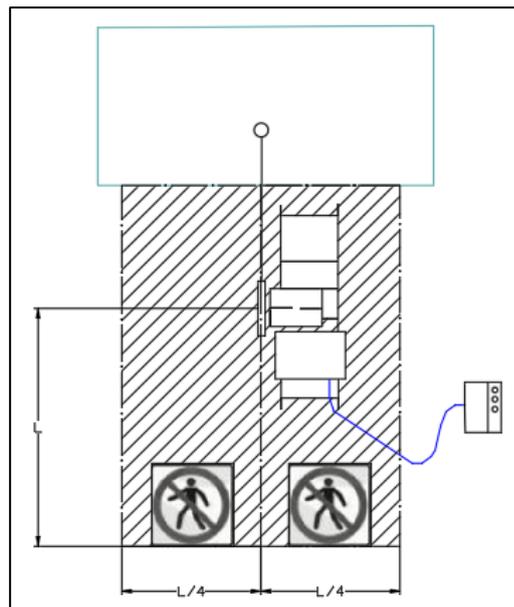


Figura 1.8: Zona interdetta per tagli verticali

Per quanto riguarda i tagli orizzontali, posta  $L$  la lunghezza del filo diamantato, la zona interdetta alla presenza di operatori è mostrata in Figura 1.9.

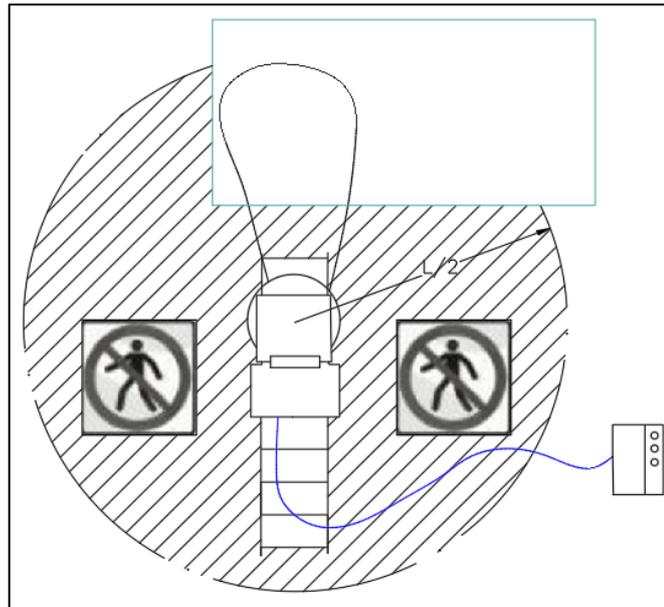


Figura 1.9: Zona interdetta per tagli orizzontali

Successivamente vengono analizzati i rischi meccanici che possono verificarsi durante l'utilizzo delle macchine tagliatrici a filo, sia quelli legati al corpo macchina generico che quelli relativi alla componentistica di trasmissione del moto al filo diamantato. Elemento importante, e già citato precedentemente contenuto in UNI EN 13236, è la massima velocità lineare del filo in esercizio che non deve superare i 40 m/s. Altro aspetto fondamentale e citato nella Norma è la standardizzazione del sistema di tensionamento del filo diamantato che, fatta esclusione per i momenti di avvio e fine taglio, deve essere regolato da un sistema di controllo automatico il quale monitori la potenza richiesta al motore dalla puleggia motrice in fase di taglio. In più la macchina deve essere munita di uno strumento che limiti la tensione sul filo diamantato il quale in condizioni standard di lavorazione non deve essere sottoposto a carichi superiori ad 1/6 del suo stesso carico di rottura. Sono inoltre esaminati nel dettaglio i rischi e le conseguenti protezioni da rischi non meccanici quali incendi, rumore, radiazioni, ergonomia, componentistica idraulica e pneumatica.

Al fine di marcatura CE sono elencati i requisiti minimi che una macchina tagliatrice deve possedere ed esibire:

- nome azienda, indirizzo della fabbrica e, se applicabile, un rappresentante autorizzato;

- nome della macchina;
- simbolo di marcatura;
- anno di costruzione (inteso come completamento della macchina);
- dichiarazione della serie o il tipo di serie o il tipo;
- numero di serie della macchina;
- potenza richiesta (obbligatorio per macchine elettriche: voltaggio, frequenza, potenza ecc.);
- marcatura delle parti meccaniche che vengono maneggiate più spesso le quali hanno specifiche finalità meccaniche.

Sono infine chiaramente indicati tutti i parametri che devono possedere i libretti di uso e manutenzione delle macchine tagliatrici.

In ultima analisi è importante sottolineare come in tutto il documento, qualora venga nominato il filo diamantato, la dicitura sia sempre riferita al filo coperto e di come il filo tradizionale a molle non venga mai citato. Tale elemento è fortemente indicativo di come ci si stia orientando sempre di più verso questa tipologia di filo ai fini della sicurezza; nel seguito del presente lavoro di Tesi verranno meglio esplicitate le caratteristiche fondamentali delle varie tipologie di filo diamantato.

## CAPITOLO 2 - IL FILO DIAMANTATO

### 2.1 CARATTERISTICHE GENERALI

Il filo diamantato (Figura 2.1) è l'elemento che, in cooperazione con la tagliatrice, esegue materialmente il taglio del materiale lapideo. Esso è costituito in generale dalle seguenti componenti:

- *cavo di acciaio zincato*: costituisce l'“anima” del filo ed ha il compito di sostenere tutte le componenti dello stesso e di assorbire le sollecitazioni statiche e dinamiche cui il filo è sottoposto;
- *perline diamantate*: costituiscono il vero e proprio utensile del filo diamantato; tramite queste ultime avviene la disgregazione della roccia per mezzo di microutensili striscianti (diamanti);
- *molle distanziatrici*: elementi spiraliformi in acciaio aventi una specifica costante elastica, interposti alle perline diamantate. Sono elementi utili, oltre alla protezione del cavo durante l'esercizio, anche all'ammortizzazione di urti e variazioni di attrito cui sono soggetti gli utensili;
- *fermi*: elementi ad anello in acciaio resi solidali al cavo interno del filo mediante pressatura. Hanno il compito di impedire lo sfilamento delle perline diamantate in caso di rottura o strappo del filo. Solitamente si interpone un fermo ogni 5 perline;
- *distanziali*: elementi ad anello in acciaio, di lunghezza mediamente 3 – 5 mm e diametro esterno 8 mm che, posizionati vicino alla perline diamantata, permettono di mantenerla sempre alla stessa distanza da quella successiva;

*morsetti di giunzione*: elementi metallici in rame o acciaio che permettono la chiusura del filo diamantato o la giunzione di più spezzoni di cavo tali da formare una stesa di lunghezza opportuna in base al tipo di taglio da effettuare.

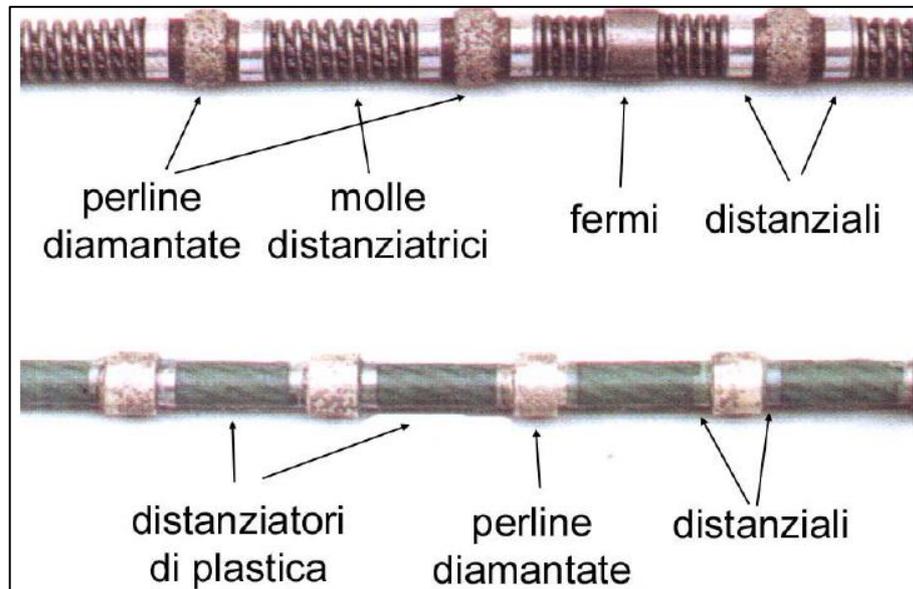


Figura 2.1: Filo diamantato tradizionale e ricoperto (Corso di Ingegneria degli Scavi)

Le perline diamantate sono suddivise in due categorie principali a seconda della modalità di posa dei diamanti sintetici atti ad effettuare il taglio. Le perline sono elettrodeposte qualora la boccola sia rivestita di uno strato di diamanti riportati sulla superficie con un processo elettrochimico e fatti aderire tramite un legante al nichel; la granulometria degli utensili è compresa tra 40 e 60 mesh. Le perline sono sinterizzate qualora i diamanti sintetici siano immersi in un'amalgama composta da cobalto, con bronzo per calibrarne la durezza in funzione del materiale da tagliare. La distribuzione dei diamanti (granulometria compresa tra 40 – 50 mesh) è omogenea in tutto lo spessore dell'amalgama. In Figura 2.2 si possono osservare le due tipologie di perline diamantate.

Il meccanismo di taglio si può schematizzare, in entrambi i casi, come disgregazione della roccia per mezzo di microutensili striscianti, montati su portautensile flessibile, che applicano localmente alla superficie di contatto delle pressioni elevate, idonee alla asportazione di un piccolo spessore di roccia (la passata dell'utensile). Il principio è analogo a quello su cui si basano le macchine utensili ad "asportazione di truciolo o scaglia".



Figura 2.2: Perlina sinterizzata (a sinistra), elettrodeposta (a destra)

I fili con perline elettrodeposte e struttura tradizionale consentono elevate velocità di taglio a utensile nuovo poiché i diamanti sintetici sono superficiali e quindi già predisposti al taglio. Con l'utilizzo prolungato si ha una progressiva riduzione delle prestazioni dovuta all'usura dello strato superficiale dei diamanti stessi. Nei fili con perline sinterizzate, il consumo dei diamanti procede parallelamente a quello dell'amalgama che li ingloba, consentendo così alla perlina di mantenere costante la capacità di taglio fino al suo consumo totale. A fronte di un maggior costo, garantiscono una maggiore versatilità, potendo agire sulla scelta dell'amalgama metallica, dei diamanti, in modo da arrivare a perline "personalizzate" a seconda del materiale da tagliare.

Un'ulteriore classificazione dei fili diamantati può essere fatta indicando il tipo di rivestimento del cavo (Figura 2.3). Si definisce filo di tipo *tradizionale* la tipologia di filo i cui componenti sono descritti in precedenza, i quali sono a diretto contatto con la roccia da tagliare (esternamente) e con il cavetto di acciaio (internamente). Si definiscono di tipo *rivestito* i fili "plastificati" e "gommati". I primi sono fili per i quali, nella maggior parte dei casi, molle e distanziali sono sostituiti da una copertura di resina termoplastica iniettata ad alta pressione e resistente all'usura; in tal modo le perline si possono considerare solidali al cavo. I secondi sono fili nei quali si inietta a caldo una guaina protettiva di materiale gommoso su un filo costituito da sole molle e perline, in modo da occludere tutti gli spazi tra le diverse componenti del filo.

Il filo rivestito è stato inizialmente introdotto sul mercato per la coltivazione di pietre "dure" (ad esempio il granito), in quanto permetteva al filo diamantato di

avere una buona protezione dall'abrasività del minerale e affinché, in caso di rottura, la perlina proiettabile trovasse materiale in grado di frenarne l'espulsione dal filo. Questa seconda caratteristica, volta a favore di sicurezza, ha fatto sì che lo sviluppo del filo rivestito negli ultimi anni sia notevolmente aumentato.



Figura 2.3: Tipologie di filo diamantato a seconda del tipo di rivestimento

## 2.2 IL CAVO DI ACCIAIO ZINCATO

Il cavo di supporto del filo diamantato è a tutti gli effetti una fune metallica in acciaio a trefoli e, come tale, rispetta delle caratteristiche ben determinate e normate (UNI EN 12385). I dati fondamentali per indicare una fune a trefoli in acciaio sono essenzialmente:

- *fili impiegati*: conformi alla UNI EN 10264;
- *diametro*: normalmente espresso in mm, è quello misurato sulla circonferenza che circonda la sezione (solitamente per fili diamantati si utilizza un cavo di diametro 4.9 mm);
- *formazione*: è la struttura della sezione retta del cavo; le funi a trefoli vengono solitamente indicate in successione con numero di trefoli, numero dei fili componenti ciascun trefolo e composizione dell'anima (solitamente per fili diamantati si ha una formazione 6 x 7 + 19);

- *sensu di avvolgimento*: sensu delle eliche descritte sia dai trefoli rispetto alla fune, sia dai fili rispetto al trefolo (Figura 2.4). Si definisce quindi un sensu di avvolgimento parallelo qualora le eliche siano concordi, mentre si definisce crociato qualora siano discordi. Il sensu di avvolgimento pu0 essere destro (si parla di avvolgimento a Z) o sinistro (si parla di avvolgimento a S);

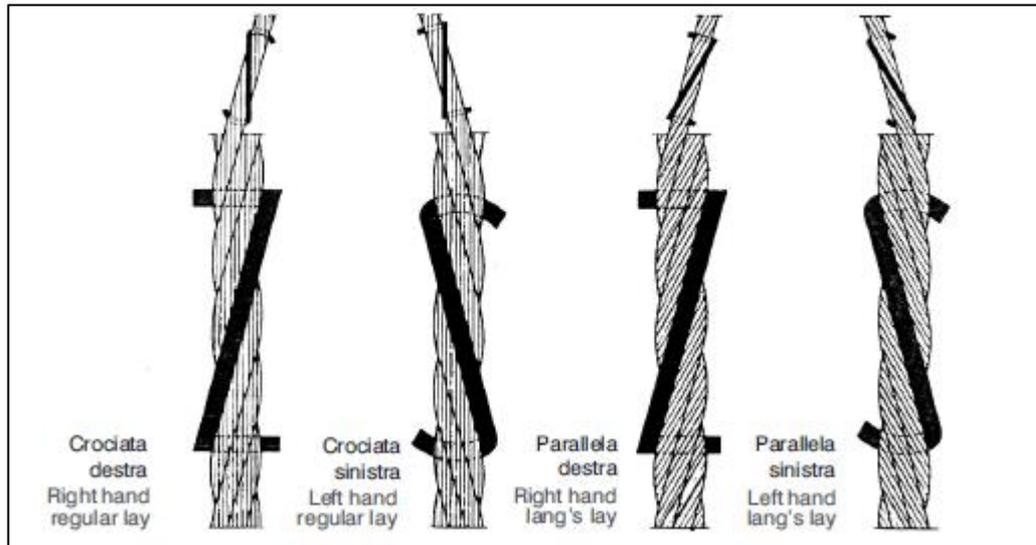


Figura 2.4: Sensi di avvolgimento della fune di acciaio ([www.aliotogroup.com](http://www.aliotogroup.com))

- *carico minimo di rottura*: carico di rottura a trazione, definito in UNI EN 12385;
- *inclinazione e passo*: solitamente costanti in modo da conferire una sollecitazione di trazione uguale per ciascun filo;
- *sezione metallica*: somma delle aree dei singoli fili, misurate sulla sezione trasversale;
- *rivestimento protettivo dei fili*: pu0 essere un lubrificante specifico oppure un trattamento di zincatura a caldo.

I cavi utilizzati per la produzione dell'anima del filo diamantato sono poi sottoposti ad un processo di zincatura a caldo, prima dell'ultima trafilatura. Tale processo permette di conferire al filo stesso una maggiore durabilit0 (in termini di corrosione), soprattutto in condizioni atmosferiche avverse o in periodi di fermo prolungati.

Esistono sostanzialmente due tipologie di cavi: quelli resistenti esclusivamente a trazione e quelli resistenti anche a sollecitazioni di flessione: i cavi utilizzati per realizzare il filo diamantato appartengono alla seconda categoria, poiché le condizioni di utilizzo impongono ad essi traiettorie svariate e sollecitazioni di varia natura.

Per quanto riguarda le sollecitazioni di trazione, l'esperienza mostra che la rottura a trazione del cavo avviene per valori di carico effettivo compreso tra il 7 ed il 15% in meno rispetto alla somma dei carichi a rottura dei singoli fili strappati in successione: ciò è imputabile alla differente distribuzione del carico tra i fili con il cavo già formato ed anche dall'avvolgimento ad elica, che aumenta la sollecitazione rispetto ad un fascio di fili a configurazione rettilinea. Tale somma è comunque superiore (fino all' 8%) alla resistenza calcolata moltiplicando il numero dei fili per la loro sezione e per il carico minimo di rottura, perché i carichi di rottura unitari sono circa uguali al valore minimo del carico stesso (si ricordi che il carico minimo di rottura è calcolato per ciascun filo moltiplicato però per la sezione totale e per il coefficiente di cordatura, minore di 1, riportato nelle tabelle UNI).

Per quanto riguarda la sollecitazione flessionale, è possibile asserire che quando un filo è avvolto ad elica in un cavo con le usuali inclinazioni, la sua sollecitazione a flessione aumenta rispetto al valore ottenuto dal filo isolato: infatti si deve tenere presente che un filo sopporta un numero di flessioni fino a 100 volte maggiore quando è isolato rispetto a quando fa parte di un cavo, se sottoposto alla stessa curvatura.

È importante sottolineare che, oltre alle sollecitazioni di trazione e flessione, si aggiungono quelle di attrito derivanti dal contatto dei fili con altri dello stesso trefolo, o di trefoli adiacenti, o ancora tra trefolo e gole della puleggia su cui si avvolge il cavo.

In conclusione si può dedurre che per ottenere un cavo con buone proprietà di resistenza è necessario favorire gli scorrimenti relativi tra i vari fili, cercando di diminuire le forze d'attrito che si vengono a creare e di abbassare i valori delle pressioni specifiche tra di essi (R. Giovannozzi, *Costruzione di macchine Vol. II*, 1980).

## 2.3 LE PERLINE DIAMANTATE

Le perline diamantate (Figura 2.5) rappresentano gli strumenti principali della tecnologia del taglio di lapidei mediante filo. Le boccole in acciaio costituiscono il portautensile dello strumento, mentre l'utensile propriamente detto è costituito dai diamanti sintetici o naturali (derivanti da scarti di lavorazione) fissati su di esse mediante diversi processi chimico-fisici.

Solitamente le boccole di acciaio sulle quali, per lavorazioni successive, si fissano gli utensili del filo diamantato hanno diametro interno pari a 5 mm ed esterno di 8 mm; la lunghezza è compresa tra 10 e 11 mm. Sulla superficie esterna vi è poi uno strato di materiale sinterizzato od uno elettrodeposto contenente i diamanti, per uno spessore di 2 - 3 mm e lunghezza di circa 6 mm. Lo spessore complessivo risulta quindi compreso tra 10 e 11 mm, mentre la lunghezza totale della perlina è di circa 10 - 11 mm.



Figura 2.5: Perline diamantate

### 2.3.1 Perline elettrodeposte

Le perline elettrodeposte hanno una concentrazione di diamanti compresa tra 40 e 60 mesh; essi vengono assemblati alla matrice con un processo di elettrodeposizione (galvanica) e fatti aderire alla perlina tramite un legante al nichel, motivo per cui si trovano sulla superficie della perlina. Quest'ultima caratteristica ricopre un ruolo fondamentale nella determinazione dell'utilizzo di questa tipologia di perline; il processo produttivo permette infatti di avere una percentuale di particelle di diamante attive (ossia che concorrono attivamente al taglio) molto elevata. Tale condizione permette un'operatività immediata del filo

diamantato, nonché una elevata velocità di taglio e quindi una notevole produttività. Non a caso questa tipologia di perlina, nella cava in cui è stato svolto il presente lavoro, è impiegata solamente per il taglio di riquadratura di blocchi (taglio che viene definito in cava “di piazza”, poiché svolto nei piazzali di cava). D’altro canto, però, questa tipologia di perlina ha lo svantaggio di possedere una vita utile relativamente breve, in quanto i diamanti tendono a usurarsi velocemente e risultano quindi inutilizzabili ai fini per cui sono stati progettati (Figura 2.6).



Figura 2.6: Perline elettrodeposte: nuova (a sinistra), completamente usurata (a destra)

### 2.3.2 Perline sinterizzate

Le perline sinterizzate hanno anch’esse una concentrazione di diamanti compresa tra 40 e 60 mesh, ma il metodo con cui essi sono montati sulla perlina differisce molto dal precedente. I diamanti sintetici sono infatti immersi in un amalgama composto principalmente da ferro, cobalto e bronzo, per calibrarne la durezza in funzione del materiale da tagliare; la distribuzione dei diamanti è omogenea in tutto lo spessore dell’amalgama, con una concentrazione media di 0.36 carato/perlina e solo una parte di questi affiora sulla superficie. L’esposizione dei diamanti procede parallelamente al consumo della matrice che li ingloba: ciò consente di mantenere la capacità di taglio dell’utensile pressoché costante. Il processo continuo di usura di uno strato di diamanti e la conseguente scopertura dello strato successivo è la caratteristica fondamentale di questa tipologia di perlina. La costanza del taglio ha orientato gli utilizzatori in ambito estrattivo marmifero ad utilizzare prevalentemente questa tipologia di utensile per tagli più lunghi, per i quali è

necessaria una affidabilità duratura di produzione. Nella cava oggetto di studio tale tipologia di perlina è utilizzata sostanzialmente per il taglio delle bancate e dei canali di apertura (viene infatti usualmente definito in cava un filo “da monte”, ossia per il taglio della bancata, un filo munito di utensili sinterizzati). L’aspetto negativo di tale utensile è in particolar modo la bassa produttività ad inizio taglio, ossia nel momento in cui non vi è ancora un numero adeguato di diamanti attivi; inoltre la velocità di taglio è inferiore a quella dei fili muniti di perline elettrodeposte. È possibile osservare quanto appena asserito tramite il grafico qualitativo, in Figura 2.6, che esprime la durata in servizio della perlina in funzione della velocità di taglio.

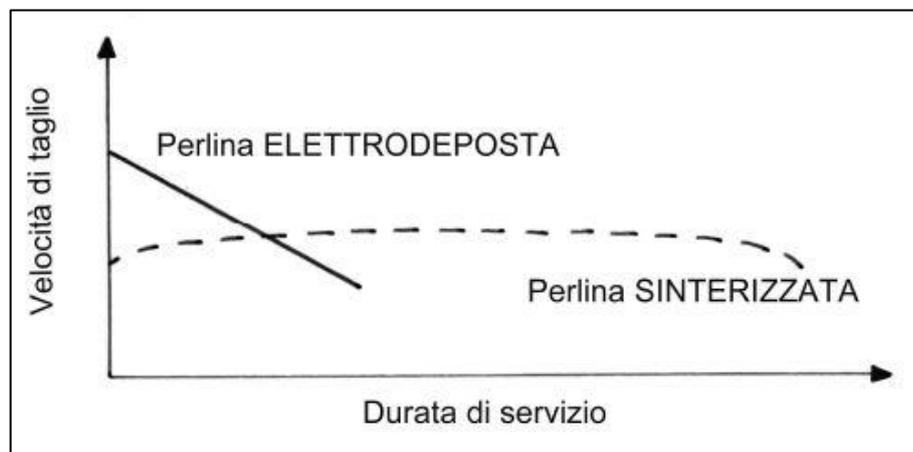


Figura 2.6: Confronto tra velocità di taglio di perline elettrodeposte e sinterizzate

## 2.4 MOLLE DISTANZIATRICI

Le molle distanziatrici (Figura 2.7) hanno la funzione di garantire la necessaria flessibilità del filo durante l’esercizio nonché assicurarne l’adeguata protezione rispetto a colpi e improvvise variazioni di attrito cui gli utensili sono soggetti nelle operazioni di taglio. Esse sono realizzate in acciaio speciale al carbonio di classe B, aventi le estremità molate e trattate con olio essiccante. Sono disponibili con un diametro del filo della spirale di dimensione 1.25 mm e una lunghezza di 12, 15, 20, 25, 30 mm per il montaggio su perline diamantate nuove; oppure con un diametro del filo della spirale di dimensione 1 mm per il montaggio su perline usate.



Figura 2.7: Molle per filo diamantato (www.palmerio.com)

Nei fili diamantati tradizionali le molle sono a diretto contatto con l'esterno, ma non con il lapideo in fase di taglio in quanto le perline, in condizioni ottimali, sono l'unico elemento di contatto con il blocco da tagliare; la presenza delle molle scoperte permette un trasporto di acqua refrigerante più omogeneo all'interno del blocco rispetto al filo ricoperto, nel quale le molle sono "annegate" nel materiale di copertura. Tale asserzione è derivante dall'esperienza maturata in cava e da informazioni dagli operatori, che unanimemente hanno riscontrato una differenza sostanziale nella movimentazione dell'acqua refrigerante in base alle due tipologie di filo utilizzato. A parere dello scrivente, la motivazione di tale differenza è imputabile al fatto che nel filo ricoperto la movimentazione dell'acqua è ascrivibile quasi interamente al moto delle perline diamantate in fase di taglio, poiché la zona plastificata o gommata tende a "scivolare" all'interno della fase fluida; nel filo tradizionale invece la movimentazione del fluido è generata dalla cooperazione di molle e perline diamantate, ed ha quindi una resa maggiore. Resta il fatto che tale asserzione non può da sola incidere su una valutazione riguardante l'utilizzo di uno o dell'altro filo; restino, ad esempio, ben presenti le valutazioni riguardanti la sicurezza effettuate precedentemente.

Nell'ambito della raccolta dati sono state fornite due schede tecniche di molle distanziatrici dall'azienda "Mega diamant S.r.l."; per questioni aziendali il nome del fornitore verrà ommesso nel presente lavoro. L'aspetto da sottolineare, presente in (Allegato 1) è la composizione effettiva dell'acciaio delle molle. Si tratta infatti di un acciaio tipo SH le cui caratteristiche sono tabulate all'interno della norma UNI EN 10270/1, di cui si riporta in Tabella 2.1 la composizione effettiva.

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
0.35-1.00	0.10-0.30	0.50-1.20	0.02-0.035	0.025-0.035

Densità [kg/dm <sup>3</sup> ]	Modulo di elasticità E [kN/mm <sup>2</sup> ]	Modulo di elasticità tangenziale G [kN/mm <sup>2</sup> ]	Temperatura di lavoro [°C]
7.85	206	81.5	-30 +100

Tabella 2.1: Caratteristiche tecniche dell'acciaio delle molle distanziatrici

## 2.5 FERMI (PRESSATORI)

I fermi (o pressatori) sono anelli di acciaio zincato che vengono resi solidali al cavo interno di acciaio mediante pressatura. Hanno il compito di impedire lo sfilamento delle perline diamantate e delle molle distanziatrici a seguito di rottura con filo tradizionale. Poiché nell'assemblaggio del filo vengono pressati, e quindi sottoposti a sollecitazioni elevate che ne modificano gli aspetti strutturali, vengono prodotti con dimensioni maggiori rispetto agli anelli distanziatori. Hanno infatti diametri esterni di 8 – 9 mm e diametro interno di 5 mm, mentre la lunghezza è compresa tra 6 e 8 mm.

Nell'ambito della raccolta dati è stata fornita una scheda tecnica di anelli pressatori dall'azienda "Mega diamant S.r.l."; per questioni aziendali il nome del fornitore è omesso nel presente lavoro. L'aspetto da sottolineare, presente in (Allegato 1) è la composizione effettiva dell'acciaio costituente i fermi. Si tratta infatti di un acciaio al carbonio le cui caratteristiche di composizione chimica sono tabulate in Tabella 2.2.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
0.07	0.40	0.22	0.007	0.011

Tabella 2.2: Composizione chimica dell'acciaio dei pressatori

## 2.6 DISTANZIALI

I distanziali sono anelli di acciaio zincato di lunghezza variabile compresa tra 3 e 5 mm; sono posizionati in prossimità della perline diamantata sia in fili tradizionali sia ricoperti e fungono da elementi di regolarizzazione della distanza tra i vari elementi del filo stesso. Il diametro esterno è compreso tra 7 e 8 mm, mentre quello interno è pari a 5 mm.

Nell'ambito della raccolta dati è stata fornita una scheda tecnica di distanziali dall'azienda "Mega diamant S.r.l."; per questioni aziendali il nome del fornitore è omesso nel presente lavoro. L'aspetto da sottolineare, presente in (Allegato 1) è la composizione effettiva dell'acciaio costituente i distanziali. Si tratta infatti di un acciaio al carbonio le cui caratteristiche di composizione chimica, a seguito di fusione, sono tabulate in Tabella 2.3.

<b>C [%]</b>	<b>Si [%]</b>	<b>Mn [%]</b>	<b>P [%]</b>	<b>S [%]</b>	<b>Cr [%]</b>	<b>Ni [%]</b>
0.0466	0.044	0.3794	0.0104	0.0102	0.0231	0.0224
<b>Cu [%]</b>	<b>Al [%]</b>	<b>Ti [%]</b>	<b>Mo [%]</b>	<b>V [%]</b>	<b>W [%]</b>	<b>Sn [%]</b>
0.0157	0.0436	0.0019	0.0056	0.0019	0.0013	0.0012
<b>B [%]</b>	<b>N [%]</b>	<b>Nb [%]</b>	<b>As [%]</b>	<b>Pb [%]</b>	<b>Co [%]</b>	<b>Ca [%]</b>
0.0001	0.006	0.0004	0.0034	0.0009	0.0021	0.0035

Tabella 2.3: Composizione chimica dell'acciaio dei distanziali

## 2.7 MORSETTI DI GIUNZIONE

I morsetti di giunzione (Figura 2.8) sono elementi tubolari metallici in rame o acciaio che consentono la chiusura del filo diamantato in modo da poter usufruire, tramite la macchina tagliatrice, di un cappio che asporti il materiale lapideo. La presenza di giunzioni, se da una parte permette di avvalersi di catene diamantate di varie misure (unendo più spezzoni), dall'altra rappresenta il punto debole della catena, poiché ne costituisce un punto avente rigidità completamente diversa dal resto del filo; questa caratteristica durante il taglio influisce enormemente sulla resa finale del filo.

Le giunzioni più comuni, nonché quelle più utilizzate nella cava oggetto di studio, sono sostanzialmente di due tipi: avvitabili con innesto filettato (in due o tre pezzi) e a tubo da pressare. Le prime hanno lunghezza di circa 25 mm, diametro esterno di 9 – 10 mm e diametro interno di 4 – 5 mm per quanto riguarda le giunzioni composte da 2 pezzi; lunghezza di circa 28 mm, diametro esterno di 9 – 10 mm e diametro interno di 4 – 5 mm per quanto riguarda le giunzioni composte da 3 pezzi. Per quanto riguarda le giunzioni a tubo da pressare, le misure variano in lunghezza dai 20 ai 30 mm, mentre per quanto riguarda il diametro esterno si ha una variabilità tra gli 8 e i 9 mm, e valori compresi tra 4 e 5 mm per il diametro interno.



Figura 2.8: Morsetti di giunzione in acciaio a tubetto (sinistra) e avvitabili (destra), (www.palmerio.com)

La differenza fondamentale nell'utilizzo dell'una o dell'altra tipologia di giunzione è relativa alla praticità di gestione delle operazioni di taglio. Infatti la giunzione di tipo avvitabile, durante l'esperienza in cava, è stata riscontrata maggiormente per i tagli di riquadratura nei piazzali di cava; ciò è dovuto alla praticità di apertura, chiusura e giunzione di nuovi spezzoni di filo diamantato per la gestione del cappio da inserire sulla tagliatrice a seconda della tipologia di blocco da riquadrare. I giunti a tubo sono stati invece riscontrati maggiormente nei tagli di dimensione maggiore ed in particolare per l'apertura di nuovi canali di taglio ed in generale per i tagli di bancate al monte; si tratta di operazioni che richiedono una tempistica di taglio maggiore e che non necessitano di innumerevoli aperture e chiusure del cappio per essere portati a termine. Le giunzioni a tubo, secondariamente, essendo di lunghezza mediamente inferiore rispetto a quelle avvitabili, consentono di effettuare il taglio minimizzando la zona ad elevate sollecitazioni flessionali che si trova esattamente in corrispondenza del giunto in quanto, come detto, costituisce una zona "rigida" che, nelle innumerevoli zone di curvatura che il filo percorre durante il taglio, risulta sollecitata in maniera continua e ripetitiva a sforzi flessionali di entità variabile.

Risulta importante determinare quanto le sollecitazioni flessionali e quanto quelle assiali cooperino nella generazione della rottura. A tal proposito si riportano in Tabella 2.4 i risultati delle prove a sfilamento sui giunti effettuate dal "Comitato Paritetico Marmo, 1998".

Materiale del manicotto	Larghezza sede di pressatura (mm)	Forza di pressatura (daN)	Resistenza allo sfilamento (daN)	Resistenza della fune (daN)	% della resistenza della fune (%)
Rame	5	5000	470	1800	26
Rame	5	5000	538	1800	30
Rame	6/7	5000	881	1800	49
Rame	7	13000	892	1800	50
Rame	5	5000	548	1800	30
Acciaio	5	5000	763	1800	42
Acciaio	6/7	5000	553	1800	31
Acciaio	7	13000	938	1800	52
Acciaio	5	5000	493	1800	27
Acciaio	7	13000	1066	1800	59
Acciaio	5	5000	827	1800	46
Acciaio	6/7	5000	824	1800	46
Acciaio	7	13000	815	1800	45
Acciaio	5	5000	869	1800	48
Acciaio	6/7	5000	927	1800	52
Acciaio	7	13000	1029	1800	57
Acciaio	5	5000	829	1800	46
Acciaio	6/7	5000	847	1800	47
Acciaio	7	13000	1086	1800	60

Tabella 2.4: Risultati dei test di resistenza sui giunti effettuati dal Comitato Paritetico Marmo, 1998

Dai risultati ottenuti si evince come, nonostante le giunzioni siano effettivamente delle zone di debolezza del filo diamantato, aventi una resistenza che in media si attesta su valori di circa il 40% di quella del cavo di acciaio, non comportino un punto di rottura certa per sfilamento. L'esperienza in cava ha tuttavia permesso allo scrivente di effettuare interviste verbali a numerosi operatori in cava riguardo la tipologia di rottura più frequente che si verifica nelle operazioni di taglio mediante filo diamantato; su una base campione di venti persone, la risposta ha sempre portato all'attenzione il fatto che la giunta è il punto in cui si verificano più strappi. Si entrerà nel dettaglio di ciò nel seguito del presente lavoro (Cap. 4.3). Per quanto detto quindi si desume come, in maniera maggioritaria, la rottura del filo diamantato non avvenga per cedimento a trazione, ma avvenga altresì per sollecitazioni di fatica flessionale cui il filo è sottoposto durante le operazioni di taglio.

## 2.8 CAMPI DI APPLICAZIONE

Si riportano in termini riassuntivi, in Tabella 2.5, i campi di applicazione del filo diamantato nelle sue varie tipologie. Si ricorda inoltre che tale lavoro di Tesi sia incentrato sul taglio e la riquadratura di marmo di Carrara, ma la tecnologia del filo diamantato abbia trovato applicazioni anche e soprattutto per la lavorazione di rocce più dure quali il granito e di materiali compositi come il calcestruzzo armato.

		perla elettrodeposta	perla sinterizzata	perla saldobrasata (*)	montaggio meccanico	montaggio plastificato	montaggio gommato
<b>Materiale: calcestruzzo</b>							
armato fortemente		X					X
armato normalmente		X		X		X	X
armato debolmente o non armato		X		X	X	X	
<b>Materiale: marmo</b>							
riquadatura		X		X		X	X
taglio al monte			X	X	X	X	X
<b>Materiale: granito</b>							
riquadatura			X			X	X
taglio al monte			X			X	X
<b>Filo diamantato: caratteristiche</b>							
ad alta resa			X			X	X
ad alta velocità				X			
ad altissima velocità		X					
taglio a secco		X	X	X	X		

Tabella 2.5: Campi di applicazione filo diamantato e relative perline (fonte: Mega Diamant S.r.l.)

(\*) si definisce perla saldobrasata una categoria di perla di tipo sinterizzato la cui diamantatura, a differenza delle perle sinterizzate classiche, è monostrato.

## *CAPITOLO 3 – LA TAGLIATRICE A FILO DIAMANTATO*

---

### 3.1 CARATTERISTICHE GENERALI

Le macchine tagliatrici a filo diamantato possono effettuare diverse tipologie di taglio a seconda dell'utilizzo per cui sono state progettate. È possibile quindi avere macchine da cava (utilizzate per il taglio al monte o in piazzale), macchine stazionarie (utilizzate negli stabilimenti per il taglio di lastre o la riquadratura di blocchi) e macchine per impiego in campo civile (utilizzate per il taglio di calcestruzzo armato). Il presente elaborato si focalizzerà sulla prima tipologia di macchine menzionate, in quanto osservate in prima persona dallo scrivente in ambito del taglio in cava sia di riquadratura di blocchi, sia di taglio al monte.

L'applicazione tecnologica della tagliatrice a filo prevede la creazione di un circuito chiuso mediante il filo diamantato che, in cooperazione con la forza motrice della macchina, ha il compito di asportare progressivamente, sotto forma di detrito finissimo, un piccolo spessore di materiale lapideo al fine di isolare dei blocchi di roccia integri. La realizzazione del circuito più semplice "a cappio" del filo, per quanto riguarda il taglio di bancate, nel caso siano già presenti due superfici libere e sia già stato effettuato il taglio orizzontale al "piede" del blocco mediante tagliatrice a catena, prevede la perforazione preliminare di due fori complanari e convergenti in cui successivamente verrà posto il filo diamantato che effettuerà il definitivo distacco del blocco (o della bancata). In Figura 3.1 è mostrata una schematizzazione del processo di taglio mediante tagliatrice a filo.

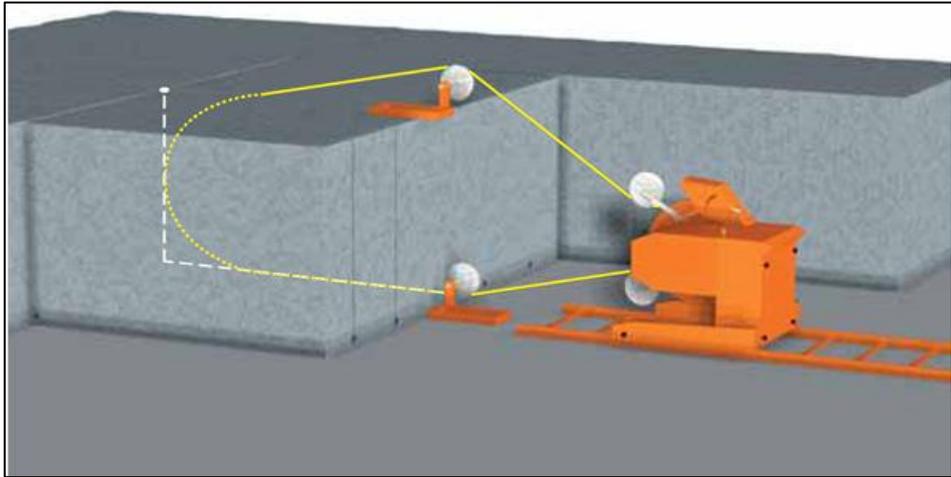


Figura 3.1: Rappresentazione di taglio mediante tagliatrice a filo

Durante il taglio la tagliatrice retrocede progressivamente scorrendo su binari, mediante un pignone dentato e cremagliera, in modo da mantenere il filo a contatto con la roccia in tensione e quindi garantire la necessaria abrasività per garantire il taglio. In Figura 3.2 è mostrata un'esemplificazione del percorso del filo diamantato durante successive fasi di taglio.

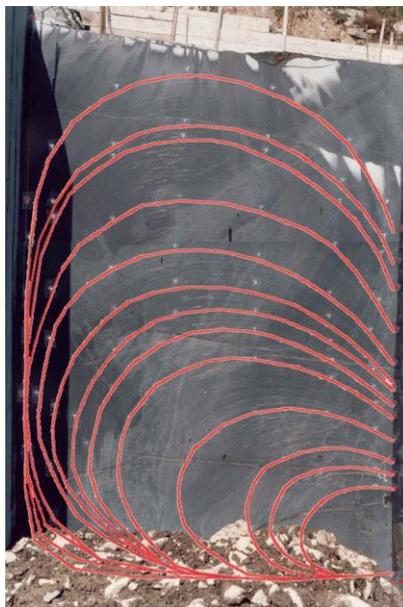


Figura 3.2: Percorso del filo diamantato durante un taglio di tipo "diretto"

Il moto di taglio è trasmesso al filo per aderenza da una puleggia motrice, analogamente a quanto avviene per le cinghie di trasmissione. Alcuni tipi di

macchine sono dotati di un gruppo portavolano che permette rotazioni di  $360^\circ$  grazie ad un motore elettrico.

### 3.2 CENNI DI MECCANICA DEI FLESSIBILI

Il moto di taglio della tagliatrice a filo diamantato è trasmesso al filo per aderenza da una puleggia motrice, analogamente a quanto accade per le cinghie a trasmissione (Figura 3.3).

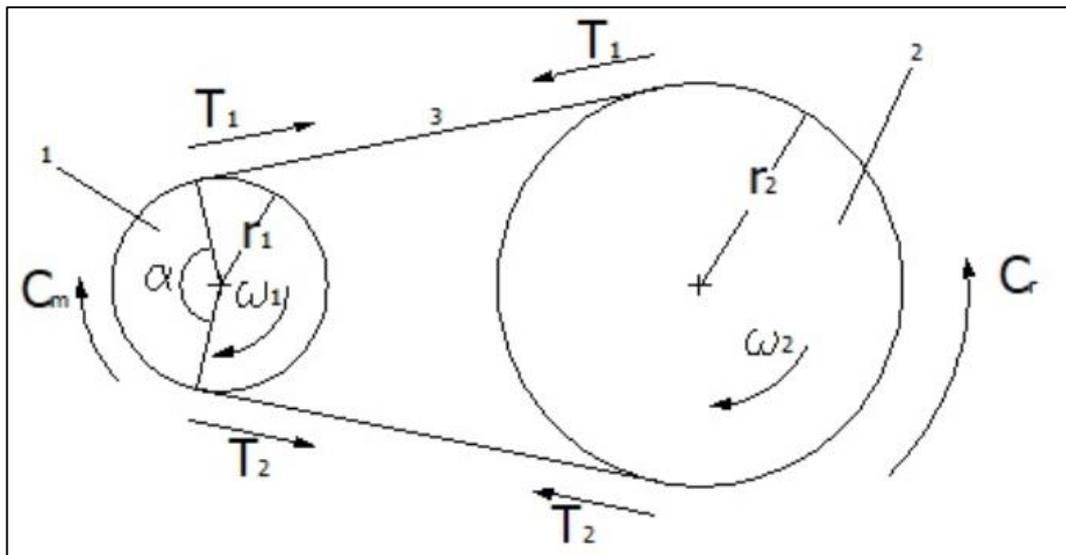


Figura 3.3: Esempificazione del moto di cinghie a trasmissione

Per quanto riguarda la cinematica del moto, sono definiti:

- 1 = puleggia motrice;
- 2 = puleggia condotta;
- 3 = flessibile di trasmissione del moto;
- $\omega_1$  = velocità angolare della puleggia motrice;
- $\omega_2$  = velocità angolare della puleggia condotta;
- $r_1$  = raggio della puleggia motrice;
- $r_2$  = raggio della puleggia condotta;

Si supponga inoltre che, durante il moto, vi sia aderenza tra pulegge e flessibile e che quest'ultimo sia ideale o perfetto ed inestensibile; tale ipotesi implicano che il

flessibile si accoppi con continuità con i corpi con cui è a contatto assumendone la forma, e che la lunghezza rimanga costante. In tal caso si ha:

$$V_3 = \omega_1 r_1 = \omega_3 r_3 \quad (1)$$

Da cui si evince il rapporto di trasmissione

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

Siano ancora definiti, per quanto riguarda la dinamica del moto:

- $C_m$  = coppia motrice, trasmessa dalla puleggia motrice;
- $C_r$  = coppia resistente, trasmessa dalla puleggia condotta;
- $T_1$  = forza agente sul tratto di cinghia cedente (tratto che si svolge dalla puleggia motrice);
- $T_2$  = forza agente sul tratto di cinghia traente (tratto che si avvolge sulla puleggia motrice);

Se la massa della cinghia è trascurabile,  $T_1$  e  $T_2$  restano costanti lungo i rispettivi tratti di azione e, per l'equilibrio del sistema puleggia motrice-cinghia, a regime, si ha:

$$C_m = (T_2 - T_1)r_1 \quad (3)$$

Sempre a regime, per il sistema puleggia condotta-cinghia, si ha:

$$C_r = (T_2 - T_1)r_2 \quad (4)$$

Il rapporto tra  $C_m$  e  $C_r$  vale:

$$\frac{C_m}{C_r} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{i} \quad (5)$$

Dati quindi i raggi delle pulegge, resta definito il rapporto tra le coppie.

Il rendimento del sistema, ottenuto mediante il rapporto tra potenza utile e potenza motrice, è definito come:

$$\eta = \frac{C_r \omega_2}{C_m \omega_1} \quad (6)$$

Con le ipotesi fatte, la trasmissione ha rendimento unitario. Elemento fondamentale, per un corretto funzionamento, è l'aderenza tra cinghia e pulegge. Definiti quindi  $f_a$ , coefficiente d'aderenza tra cinghia e puleggia e  $\alpha$ , angolo di avvolgimento sulla puleggia più piccola, deve essere:

$$\frac{T_2}{T_1} \leq e^{f_a \alpha} \quad (7)$$

L'aderenza tra cinghia e pulegge è garantita da un appropriato forzamento; per realizzarlo si può ricorrere all'uso di opportuni dispositivi, quali i galoppini o i tenditori, oppure si imprime alla cinghia un forzamento iniziale.

Esistono anche cinghie dentate che si impiegano in apposite ruote dentate: con esse la trasmissione del moto non è affidata all'attrito ma all'incastro tra i denti della cinghia e della ruota (C. Ferraresi, T. Raparelli, *Meccanica applicata*).

### 3.3 CENNI DI MECCANICA DELLA TAGLIATRICE A FILO DIAMANTATO DA CAVA

Nella tagliatrice a filo diamantato, a differenza della schematizzazione fornita in precedenza, si hanno condizioni operative sensibilmente differenti rispetto ad un caso ideale di trasmissione meccanica del moto mediante flessibili. Principalmente le differenze dal caso ideale sono riscontrabili nel manifestarsi di forze di attrito di diversa tipologia. Si possono distinguere:

- Attrito filo-puleggia, il quale permette la trasmissione del moto dall'albero motore al filo;
- Attrito filo-blocco di lapideo, dovuto allo scorrimento tra filo e roccia;
- Attrito al perno nelle pulegge folli, dovuto all'accoppiamento perno-puleggia.

Oltre a ciò, una sostanziale differenza è riscontrabile nella non idealità del comportamento del filo diamantato durante l'esercizio, in quanto possiede una certa elasticità intrinseca (non vale l'ipotesi di inestensibilità), una certa massa (non vale l'ipotesi di massa unitaria) ed un numero variabile di giunzioni (non vale l'ipotesi di omogeneità ed isotropia).

Altra sostanziale differenza tra meccanica della tagliatrice a filo e meccanica dei flessibili è individuabile nell'interazione filo-puleggia. Qualora infatti, nei sistemi di trasmissione ordinaria, lo scorrimento di una cinghia rispetto ad una puleggia causi il solo deterioramento di quest'ultima ed una certa dissipazione di energia, nel caso del filo diamantato ciò causa l'abrasione della puleggia stessa ed in particolare l'abrasione della guaina di rivestimento della gola di quest'ultima, realizzata con materiale polimerico ad alto coefficiente di aderenza. Inoltre il materiale di cui è

composta la gola della puleggia, non essendo perfettamente rigido, come avviene nei gruppi di trasmissione tradizionali, fa sì che una parte dei diamanti delle perline dello spezzone di filo in avvolgimento siano impercettibilmente conficcati in esso; ciò, in cooperazione col fatto che la porzione di flessibile in entrata della puleggia motrice è necessariamente soggetta ad una trazione maggiore di quella a cui è sottoposta in uscita (Figura 3.4), determina che vi sia per ogni ciclo di filo diamantato sulla puleggia una zona di esso che tende a contrarsi iterativamente, sollecitando il cavo e danneggiando progressivamente la guaina della gola della puleggia.

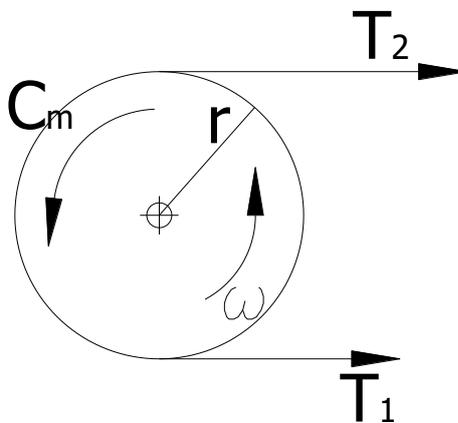


Figura 3.4: Schema dinamico della puleggia motrice

Si dimostra ora come il contributo di  $T_2$  sia necessariamente maggiore rispetto a quello di  $T_1$  in termini di sollecitazioni cui il sistema è sottoposto durante il taglio.

$$C_m + T_1 r - T_2 r = 0 \quad (8)$$

Da cui:

$$T_2 = \frac{C_m}{r} + T_1 \quad (9)$$

Essendo i termini a destra dell'uguale entrambi positivi si ha che  $T_2 > T_1$ .

### 3.3.1 Azione della forza centrifuga agente sulla puleggia motrice

Un'altra differenza non trascurabile esistente tra le trasmissioni a cinghia e la trasmissione agente sul filo diamantato è l'azione della forza centrifuga che si oppone alla forza di trazione del filo. Poiché la velocità del filo è molto elevata (fino a 40 m/s, UNI 13236:2016), occorre tener conto di quest'ultima nella verifica

dinamica dello slittamento del filo sulla puleggia. In Figura 3.5 è presente una schematizzazione di tale fenomeno.

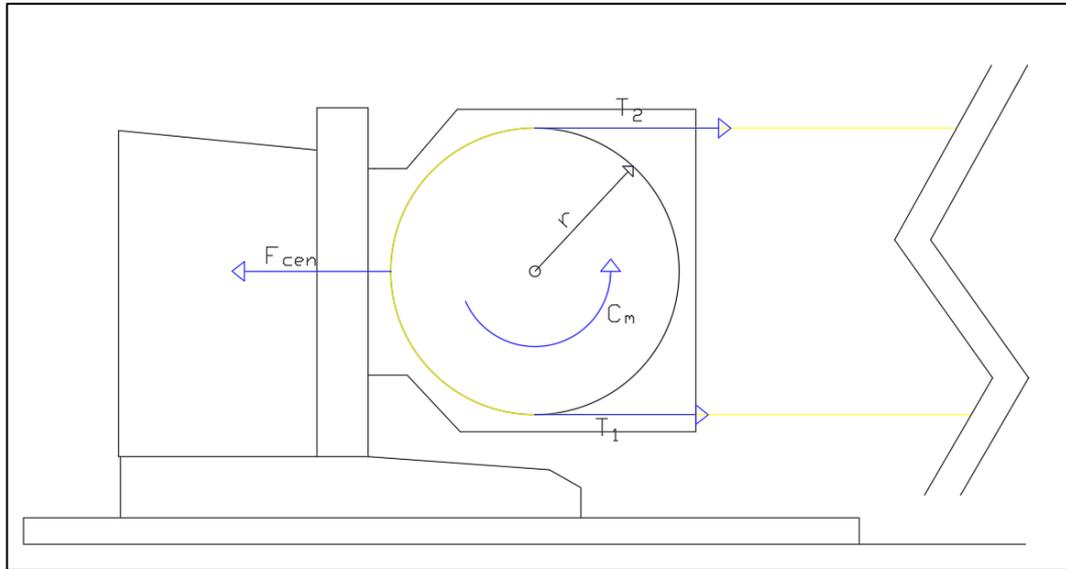


Figura 3.5: Schema semplificato delle forze agenti sulla tagliatrice

Si definisce la forza centrifuga come:

$$F_{cen} = \frac{m V^2}{r} \quad (10)$$

essendo:

$m$  = massa del filo;

$V$  = velocità del filo;

$r$  = raggio della puleggia;

La forza radiale totale si ottiene quindi dalla somma vettoriale delle due tensioni possedute dal filo in ingresso e uscita dalla puleggia motrice e dalla forza centrifuga che questo possiede durante il percorso sulla gola della puleggia.

Il limite di aderenza risulta quindi ottenibile moltiplicando la forza radiale totale per la tangente dell'angolo di attrito del materiale polimerico della gola della puleggia.

Definendo la trazione della puleggia come:

$$T_{puleggia} = T_2 - T_1 = \frac{C_m}{r} \quad (11)$$

E definendo la forza di trazione radiale come:

$$F_{trazione} = T_1 + T_2 \quad (12)$$

è possibile impostare la seguente equazione per la valutazione della velocità alla quale si verifica perdita di aderenza sulla puleggia motrice:

$$\left( T_1 + T_2 - \frac{mV^2}{R} \right) \operatorname{tg}\varphi = T_{puleggia} \quad (13)$$

Da cui:

$$V = \sqrt{\frac{r}{m} \left( F_{trazione} - \left( \frac{T_{puleggia}}{\operatorname{tg}\varphi} \right) \right)} \quad (14)$$

Esistono quindi condizioni di trazione massima, di diametro della puleggia motrice, ed un dato filo per cui non è possibile trasmettere allo stesso alcun tipo di moto.

È importante asserire come la variazione del raggio della puleggia non influisca sull'entità della forza centrifuga, bensì crei una variazione della trazione agente sul filo. Per quanto riguarda la forza centrifuga infatti, è possibile riscriverne la formula come segue:

$$F_{cen} = \frac{m V^2}{r} = \frac{r \cdot \vartheta \cdot \gamma_{filo} \cdot \pi \cdot \Phi_{filo}^2 \cdot V^2}{r \cdot 4} = \frac{\vartheta \cdot \gamma_{filo} \cdot \pi \cdot \Phi_{filo}^2 \cdot V^2}{4} \quad (15)$$

Per quanto riguarda la trazione del filo invece, riprendendo la (11), citata precedentemente, si osserva che la variazione di  $r$ , in tal caso, fa sì che venga modificata, a parità di coppia motrice, la componente di trazione delle forze in gioco durante il processo di taglio; si ha infatti una diminuzione della velocità massima (per rimanere nel campo dell'aderenza) al crescere del diametro della puleggia.

### 3.3.2 Moto di alimentazione e di taglio

L'energia necessaria al taglio del lapideo è impartita alla tagliatrice a filo diamantato mediante un motore elettrico e viene trasformata, dal punto di vista meccanico, in due tipologie di moto differenti. Un moto rotativo della puleggia motrice che trasmette l'energia necessaria al taglio al filo diamantato che su di esso scorre ed un moto di traslazione dell'intera macchina che permette l'avanzamento del taglio rispetto al blocco, ovviamente in posizione fissa (Figura 3.6). Il moto di

traslazione costituisce un'ulteriore differenza tra la meccanica dei flessibili e la meccanica delle macchine tagliatrici a filo diamantato.

Per quanto riguarda il moto traslazionale, le prime tagliatrici venivano impostate dai produttori con un valore di arretramento fisso rispetto alla passata dei singoli utensili; ciò equivale a imporre un rapporto costante tra velocità di scorrimento del filo e velocità di traslazione della puleggia. Altro elemento costante, per le prime macchine, era la velocità impartita al filo diamantato mediante la puleggia motrice. Si è tuttavia constatato che un sistema di questo genere risultava a sfavore di sicurezza in quanto: dal punto di vista del moto di traslazione non si teneva conto della durezza variabile del lapideo in fase di taglio e ciò comportava un incremento del rischio di strappi; dal punto di vista del moto di rotazione del filo, soprattutto per le manovre di avvio del taglio, si riscontravano condizioni di estrema pericolosità. Si tornerà su questa trattazione nel seguito.



Figura 3.6: Riquadratura di un blocco in cava

Dal punto di vista delle forze in gioco ed ipotizzando, per semplificare, che l'arco di contatto filo-blocco sia un semicerchio di dimensioni della puleggia motrice (nonostante la Figura 3.2 abbia dimostrato il contrario) e che trasli orizzontalmente sempre parallelamente a sé stesso, è possibile asserire che in un dato intervallo di tempo l'arco di contatto trasli orizzontalmente di una certa quantità uguale a quella di cui deve traslare la macchina. La forza da esercitare per muovere la macchina è pari alla somma di  $T_2$  e  $T_1$  più una componente aggiuntiva  $X$ , dovuta all'attrito che si sviluppa alla base della macchina durante il suo arretramento (Figura 3.7).

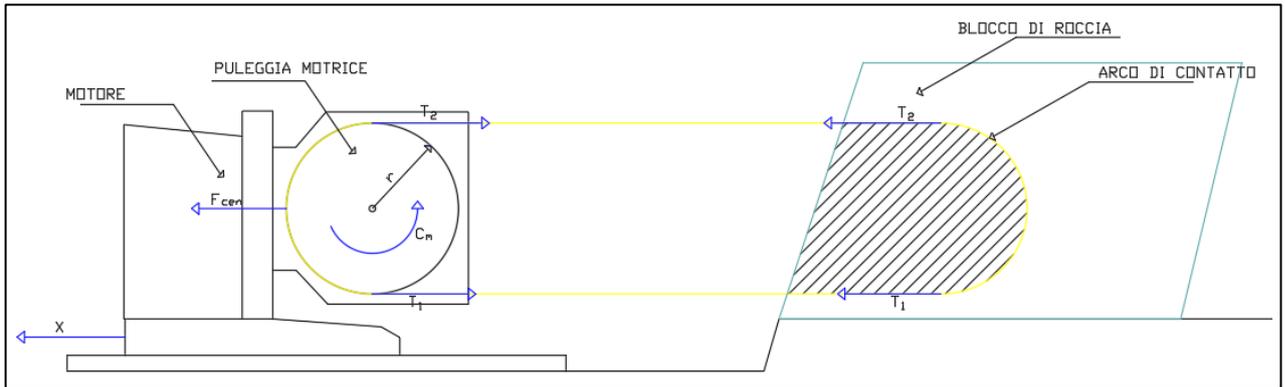


Figura 3.7: Schema di taglio di un blocco

La forza necessaria per l'arretramento della macchina equivale dunque a:

$$F = T_1 + T_2 + X \quad (16)$$

Tale valore, seppur apparentemente banale, costituisce un'incognita molto importante nella pratica lavorativa cui i cavaatori sono sottoposti. Infatti, non esiste una configurazione "standard" con la quale impostare il taglio e gli operatori sono chiamati ad utilizzare la loro esperienza nel raggiungimento di un optimum tra velocità di taglio e velocità di arretramento della macchina; ciò è reso ancora più complicato dalla innumerevole quantità e tipologia di fili diamantati che vengono utilizzati i quali, a detta dei cavaatori, rispondono in maniera differente alle diverse tipologie di macchine e di tagli da effettuare in cava.

Il problema non è in alcun modo secondario, in quanto l'interazione tra forze in gioco, macchine e fili, costituisce un elemento di sicurezza fondamentale: un'errata valutazione di uno di questi tre elementi può dar luogo a strappi del filo che talvolta possono risultare molto pericolosi o addirittura letali.

Per minimizzare questo problema sono state messe a punto soluzioni tecniche meccaniche ed elettroniche che verranno prese in considerazione nel seguito.

### 3.3.3 Forze presenti sull'arco di contatto

La pressione lineare esercitata dal filo sull'arco di contatto con il materiale lapideo in fase di taglio (Figura 3.8) è ottenibile integrando la stessa (ipotesi di pressione costante su tutto l'arco di contatto) lungo il semicerchio di contatto filo-roccia (ipotesi di raggio costante lungo la traiettoria di taglio); è stato inoltre ipotizzato che la forza di trazione esercitata dalla tagliatrice sia equamente suddivisa in due componenti agenti sui due capi del filo.

$$\int_{-90}^{90} p \cos \alpha r d\alpha = 2 p r = T_1 + T_2 + X \quad (17)$$

da cui si ottiene:

$$p = \frac{T_1 + T_2 + X}{2 r} \quad (18)$$

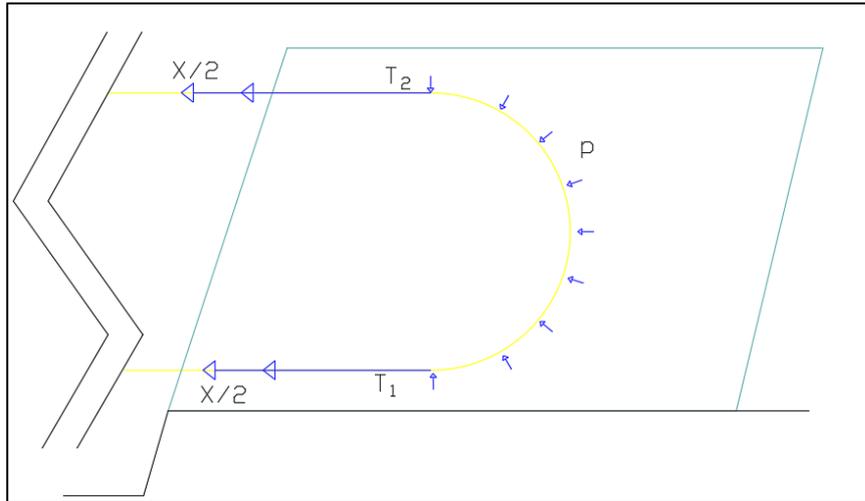


Figura 3.8: Pressioni lungo l'arco di contatto

Ricordando la relazione (7) è possibile scrivere la formula necessaria affinché vi sia strisciamento del filo diamantato nel punto di mezzeria dell'arco di contatto, tramite semplici valutazioni riguardanti la forza di attrito. Definita  $T_3$  come forza di reazione all'azione esercitata dalla forza di attrito (Figura 3.9), si ottiene:

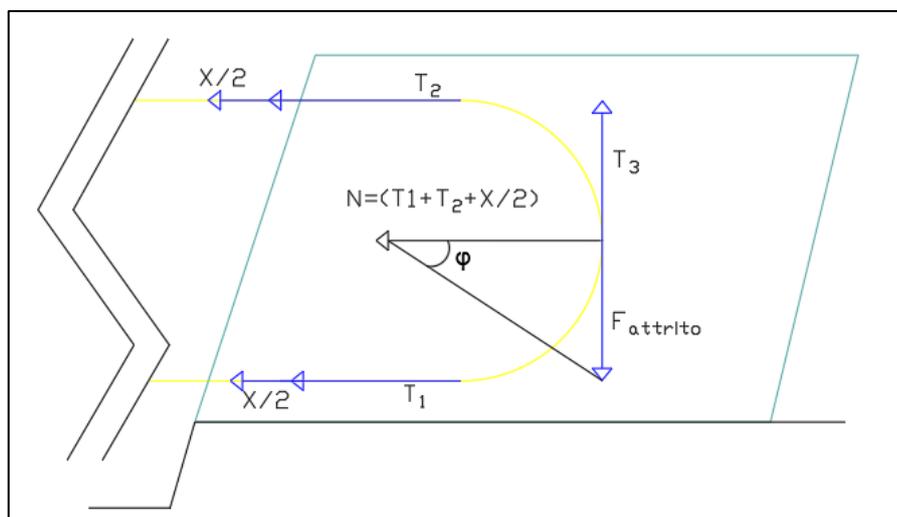


Figura 3.9: Schematizzazione di forze di attrito e tensioni agenti nell'arco di contatto

$$T_3 = T_1 \cdot e^{90 f_a} \geq N \cdot tg\varphi = (T_1 + T_2 + X) \cdot tg\varphi \quad (19)$$

essendo  $\varphi$  l'angolo di attrito tra filo e blocco.

### 3.4 LE TAGLIATRICI IMPIEGATE PRESSO LA CAVA GIOIA

Il parco macchine della cava oggetto di studio, viste le enormi dimensioni del bacino, è molto esteso. I mezzi più importanti per la movimentazione dei blocchi e delle bancate, oltre a mezzi minori, sono retroescavatori cingolati Liebherr (9150 e 975) e pale gommatae Caterpillar (di cui le più importanti sono: 980H, 980K, 988H, 988K), mostrati in Figura 3.10.



Figura 3.10: Mezzi pesanti per la movimentazione del marmo

Per quanto riguarda il taglio e l'estrazione vera e propria, sono presenti delle tagliatrici a catena usate per effettuare il primo taglio orizzontale alla base della bancata (Figura 3.11).



Figura 3.11: Tagliatrice a Catena

Le tagliatrici a filo diamantato sono circa 30, suddivise in maniera omogenea in tutto il bacino. Sono presenti diverse tipologie di macchine, ognuna delle quali ha caratteristiche tecniche, meccaniche ed elettroniche differenti. Le più importanti sono: Lochtmans LGR, Apuania Corsi MF 5000, Atlas Copco SpeedCut 100.

#### 3.4.1 Lochtmans LGR

La tagliatrice a filo diamantato più diffusa presso la cava è sicuramente la Lochtmans modello LGR. Quest'ultima è presente in cava in varie tipologie e con potenze differenti (50, 60, 75 CV), ha un peso di 2000 kg, un volano motore di diametro 900 mm e consente al filo diamantato di raggiungere una velocità lineare massima di 40 m/s (Figura 3.12). Le dimensioni del corpo macchina (in mm) sono di 1400 x 1720 x 1800.



Figura 3.12: Lochtmans LGR in fase di configurazione per taglio al monte

Il gruppo motore-volano è costituito da un motore elettrico cui è collegato il volano in alluminio il quale trasmette il moto al filo diamantato. Tutta la macchina è in grado di traslare su un binario che permette l'avanzamento del taglio. Il gruppo motore ha la possibilità di compiere movimenti di rotazione e traslazione, grazie ai quali è possibile effettuare diversi tipi di taglio.

Sono infatti premessi:

- due movimenti di rotazione a 360°;
- due movimenti orizzontali per un'ampiezza totale di 1.80 m (verso destra e verso sinistra);
- due movimenti verticali per una corsa complessiva da terra di 50 cm.

I movimenti di traslazione e rotazione sono realizzati mediante l'impiego di centralina idraulica, lo spostamento avviene tramite lo scorrimento su tubi cromati e boccole in bronzo. Il movimento di rotazione avviene mediante motore idraulico con corona dentata acciaio/bronzo e vite senza fine in acciaio. Lo scorrimento della macchina è realizzato per mezzo di motoriduttore, ruote motrici dentate e binari asolati, permettendo di eseguire tagli fino ad una pendenza massima del 25% ([www.lochtmans.it](http://www.lochtmans.it)).

Il quadro comandi è separato dal corpo macchina ed è collegato al quadro elettrico mediante un cavo di lunghezza 10-15 m, per ragioni di sicurezza. Nella cava oggetto di studio sono state riscontrate due tipologie di quadro comandi differenti: analogico e digitale (Figura 3.13).



Figura 3.13: Quadro comandi analogico (a sinistra) e digitale (a destra) Lochtmans LGR

Per quanto riguarda il primo, l'elemento fondamentale è l'indicatore amperometrico di assorbimento del motore: esso è direttamente correlato alla velocità della macchina, grazie a due ghiera rotanti che controllano la velocità del volano ed il traino della macchina in arretramento. Sono inoltre presenti un pulsante di emergenza di interruzione dell'alimentazione ed un interruttore di tipo on/off che mette in trazione il telo di sicurezza durante le operazioni di taglio. Infine, vi sono alcuni comandi di movimentazione del gruppo motore e della macchina stessa, per il suo posizionamento a inizio taglio.

Per quanto riguarda il quadro comandi digitale, non vi sono particolari differenze dal punto di vista dell'operatività; tuttavia sono presenti alcune informazioni di maggior dettaglio come la velocità istantanea del filo diamantato, la segnalazione dei metri di taglio effettuati (voce "metri arretrati") e il tempo di taglio totale della macchina (voce "tempo automatico").

Elemento di fondamentale differenza tra i due quadri è la voce "cella di carico", che rappresenta un enorme passo avanti dal punto di vista della sicurezza della macchina in termini di strappi del filo diamantato. Verrà trattato questo aspetto nei successivi paragrafi.

Questa macchina è stata descritta in cava, da diversi operatori intervistati, come versatile e compatta, facilmente spostabile e di semplice utilizzo. Le potenze installate, inferiori ad altre macchine, la fanno percepire come "sicura", elemento opinabile, in quanto privo di fondamenti scientifici validi. Nel corso dell'esperienza di tesi è stato appurato che tale affermazione deriva soprattutto dal fatto che questa macchina è presente in cava da più tempo di altre e che quindi gli operatori riescano a manovrarla con molta padronanza, riuscendo a riscontare elementi di malfunzionamento o di pericolo con più tempestività rispetto a macchine di più nuova concezione.

#### 3.4.2 *Apuania Corsi MF 5000*

Un'altra tagliatrice a filo diamantato presente in cava è la Apuania Corsi MF 5000. Essa differisce in maniera sostanziale dalla precedente sia dal punto di vista meccanico sia costruttivo, mentre dal punto di vista elettronico, per quanto osservato direttamente in cantiere, risulta simile alla macchina descritta precedentemente.

Si tratta di una macchina per la quale è stato ripensato completamente il meccanismo di arretramento che consente l'avanzamento del taglio. Mentre nel modello precedentemente descritto tutto il corpo macchina traslava uniformemente su binari o verghe, in questo caso esso è mantenuto fisso in una posizione, mentre a traslare è la sola puleggia motrice la quale, grazie anche ad un meccanismo di rinvii mediante pulegge folli, trasmette il moto di arretramento al filo diamantato (Figura 3.14).



*Figura 3.14: Apuania Corsi MF 5000*

Dimensionalmente si tratta di una macchina più ingombrante della precedente, del peso di 5000 kg; la potenza del motore è di 75 Cv (55kW) la quale permette di conferire al filo una velocità lineare massima di 40 m/s. Il sistema motore-volano è fisso (dal punto di vista della traslazione) con sistema di piazzamento oleodinamico e sistema di recupero del filo automatico e girevole con rotazione di 340° sul piano orizzontale in modo da consentire di operare su più piani di taglio e di riquadrare più blocchi in sequenza. Elemento non secondario è invece l'impossibilità di effettuare tagli orizzontali, se non con un complesso sistema di pulegge folli di rinvio. Le dimensioni del corpo macchina (in mm) sono di 4500 x 2000 x 2200. Tale macchina consente la possibilità di operare in spazi ridotti, vista l'assenza dei binari e la compattezza del sistema di trazione del filo.

L'elemento più interessante di questa tagliatrice è il sistema di rinvii del filo diamantato presente nel corpo centrale puleggia-motore; tale sistema, brevettato, deriva direttamente dalla teoria della meccanica delle macchine riguardante i

paranchi ed i sistemi meccanici di suddivisione equa di forze. Come si osserva in Figura 3.14, il filo diamantato è inserito in due pulegge folli (diametro di 500 mm) di ingresso-uscita della macchina, quindi viene avvolto su due pulegge retrostanti quella centrale (del diametro di 400 mm); il moto è conferito al filo, come di consueto, dalla puleggia centrale del diametro pari a 700 mm.

Il quadro comandi della Apuania Corsi MF 5000 non differisce molto da quello precedentemente citato; se ne riporta un esempio in Figura 3.15.



Figura 3.15: Quadro comandi Apuania Corsi MFAC

Si possono osservare principalmente due indicatori: uno riguardante l'intensità di corrente assorbita dalla macchina in fase di taglio (a sinistra nella foto) ed uno riguardante i kg di tiraggio della macchina; ciò a indicare la presenza, come nella Lochtmans LGR, di una cella di carico di sicurezza. Sono presenti poi due ghiera di controllo di amperaggio della macchina e regolazione manuale dei giri del motore ed alcuni interruttori tipo on-off per la modalità automatica o manuale, il tiraggio del filo manuale e la messa in tiro del telo di protezione. Vi è poi un comando per l'attivazione in remoto tramite telecomando: altro elemento interessante nella macchina in quanto permette di effettuare le operazioni di posizionamento della stessa prima di effettuare il taglio di riquadratura da un singolo operatore (e non da due come di consuetudine).

Questa macchina è stata descritta in cava, da diversi operatori intervistati, come ad elevata produttività per il taglio di riquadratura, in quanto consente il

posizionamento di più blocchi, a raggiera, sul piazzale di cava, che vengono riquadrati in serie senza dover aspettare le movimentazioni secondarie dei mezzi gommati. Si sono riscontrati anche commenti negativi circa l'eccessivo (a detta di alcuni cavaatori) grado di meccanizzazione che comporterebbe l'obbligo di una manutenzione ed un livello di pulizia (difficile da mantenere in cava) più elevato rispetto alle macchine concorrenti. Il complesso dei rinvii interno al sistema motore-puleggia ha una percezione duplice: se da una parte è visto come elemento di novità che permette un livello più alto di copertura del filo all'interno del carter protettivo (e quindi una minimizzazione delle proiezioni in caso di strappo), dall'altro, a detta di alcuni utilizzatori, la presenza di molte parti metalliche favorirebbe, in caso di rottura del filo diamantato, il tranciamento di spezzoni potenzialmente in grado di acquisire elevate velocità, con gli annessi problemi di sicurezza.

### 3.4.3 *Atlas Copco SpeedCut 100*

Una tagliatrice a filo diamantato di rilevante importanza, nonostante sia presente nel numero di sole tre unità in cava Gioia, è sicuramente la Atlas Copco SpeedCut 100. Essa possiede una potenza di 100 CV (circa 75 kW) che permette di conferire al filo una velocità lineare massima di 45 m/s, un peso di 2570 kg e dimensioni del corpo macchina (in mm) di 3000 x 1520 x 1750 (Figura 3.16).



*Figura 3.16: Atlas Copco SpeedCut 100, taglio di bancata*

Il volano motore ha diametro di 1 m, mentre le pulegge folli di rinvio del filo diamantato su quest'ultimo misurano 425 mm. Tutta la macchina è in grado di traslare su un binario che permette l'avanzamento del taglio. Il gruppo motore ha la possibilità di compiere movimenti di rotazione e traslazione, grazie ai quali si possono effettuare diversi tipi di taglio. Il volano motore può infatti compiere rotazioni fino a 320°, tali da permettere i tagli orizzontali; dal punto di vista traslazionale è permesso un movimento dell'ampiezza massima di  $\pm 200$  mm. Il meccanismo di taglio è del tutto assimilabile a quello della Lochtmans LGR descritto precedentemente: la macchina, mediante la puleggia motrice, trasmette il moto rotazionale al filo diamantato che esercita la sua funzione di taglio in cooperazione con il moto di arretramento dell'intero corpo macchina su binari o verghe precedentemente installati.

Il quadro comandi (Figura 3.17) è collegato al corpo macchina mediante un cavo multipolare di lunghezza 30 m ed è munito di sistema *disconnector* il quale assicura che, in fase di stacco della corrente, non si verifichi un arco elettrico.



Figura 3.17: quadro comandi Atlas Copco SpeedCut 100

Sul pannello, elettronico, sono individuabili alcuni elementi già osservati nelle macchine precedenti, come il verso di rotazione della macchina, l'ampereaggio assorbito dal motore, il valore in kg di tensionamento del filo (il che lascia intendere

anche qui la presenza di una cella di carico di sicurezza) ed ancora il valore di arretramento della macchina (voce “speed”, nella Figura 3.17). La macchina permette una perfetta programmabilità sia in termini di arretramento del corpo macchina sia di energie in gioco: è infatti possibile porre un limite sia all’ampereaggio richiesto per il taglio, sia al tiraggio del filo percepito dalla cella di carico. Questa particolare versatilità è dovuta ad un software interno alla SpeedCut, attualmente sotto brevetto e quindi non fruibile ai fini didattici per il presente elaborato, ma di cui si analizzeranno le caratteristiche principali, in via del tutto teorica, nel seguito di questo capitolo.

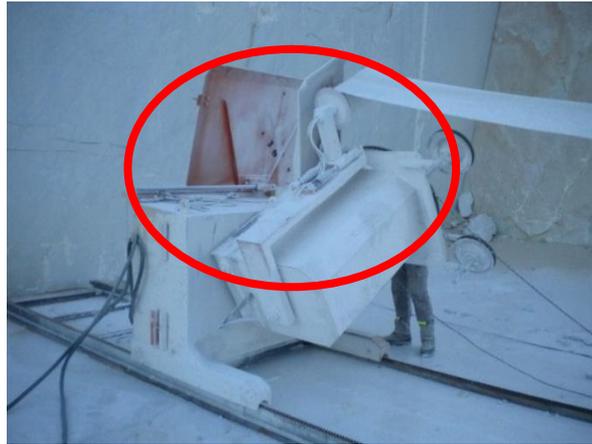
### 3.5 I SISTEMI DI SICUREZZA DELLE TAGLIATRICI A FILO

Le tagliatrici a filo diamantato sono dotate di sistemi di sicurezza, sia dal punto di vista della protezione degli operatori sia da quello della prevenzione degli strappi del filo stesso, i quali costituiscono senza dubbio l’evento di maggiore pericolosità per i cavitatori addetti al taglio nelle immediate vicinanze della macchina, e non solo (una perlina proiettata può compiere traiettorie di centinaia di metri a velocità elevatissime).

#### 3.5.1 Sistemi di contenimento: nastro e pannelli in acciaio di protezione

Le tagliatrici a filo diamantato più moderne sono dotate, per quanto riguarda la protezione degli operatori, di sistemi di sicurezza contenitivi atti ad intercettare il filo qualora si verifichi uno strappo. Gli studi effettuati (tra cui Tantussi, 2008) in merito alle rotture hanno evidenziato come il filo tenda a mantenere il suo moto in direzione tangente al punto in cui è avvenuto lo strappo e che tale direzione sia la stessa nella quale si verifica il colpo di frusta con annessa possibile proiezione di perline diamantate (anche nel caso di utilizzo di filo coperto). In tal senso sono stati messi a punto alcuni sistemi di intercettazione del filo dopo una possibile rottura. Tali sistemi si possono riassumere sostanzialmente in tre tipologie: Carter, pannelli in acciaio di protezione (in D. Lgs 17/10, detti “ripari”) e nastro in tessuto resistente. Per quanto riguarda la prima tipologia (Figura 3.18) si tratta di carter in acciaio che ricoprono le parti meccaniche della macchina per evitarne il danneggiamento a seguito di rottura ed impedire all’operatore il diretto contatto con parti mobili del

motore interno. La seconda tipologia è costituita da pannelli metallici di protezione (ripari) che si protraggono esternamente al corpo macchina, atti ad intercettare il filo (e le perline, se proiettate) dopo uno strappo: tali sistemi, pur non agendo sulla causa del problema (per questo sono elementi di protezione e non di prevenzione) sono ugualmente molto importanti, in quanto garantiscono lo smorzamento delle enormi energie cinetiche in gioco dovute alle rotture del filo.



*Figura 3.18: Pannelli di sicurezza in acciaio*

La terza tipologia di protezione delle tagliatrici a filo (Figura 3.19) è costituita dal nastro in tessuto resistente. Quest'ultimo, solidale col gruppo motore, largo 40 cm circa e di lunghezza variabile fino a 20 m, viene svolto in direzione parallela al filo diamantato durante il taglio ed ha lo scopo di evitare il verificarsi del colpo di frusta in caso di rottura, intercettando il filo diamantato ed impedendone la corsa in direzione tangenziale rispetto al punto di strappo. Essendo estensibile e controllata da un motorino idraulico, la protezione deve interessare tutto il tratto percorso a cielo aperto del filo diamantato ed avvolgersi progressivamente su sé stessa durante l'avanzamento del taglio, al fine di non intersecare il filo diamantato, che lo lacererebbe rendendola inutilizzabile. Per lo stesso scopo vengono inoltre interposti tra blocco e nastro di protezione due cavalletti in acciaio.



Figura 3.19: Nastro di protezione in tessuto

### 3.5.2 Sistemi di prevenzione dello strappo: inverter e cella di carico

Le tagliatrici a filo diamantato più moderne sono dotate di sistemi di controllo elettronico-meccanico del tiraggio del filo diamantato e della macchina tagliatrice durante la fase di taglio: tale elemento rappresenta un importante passo avanti per la sicurezza degli operatori che, nonostante l'esperienza maturata in anni di professione, talvolta non possono prevedere con certezza la variabilità delle condizioni al contorno che caratterizzano il taglio del blocco o della bancata. I sistemi di cui alcune macchine sono provvisti sono sostanzialmente di due tipologie: inverter, ossia strumenti elettronici che consentono di modulare la frequenza della corrente in ingresso della macchina per regolarne i giri del motore (e quindi della puleggia motrice) e la velocità di arretramento e le celle di carico, ossia trasduttori elettromeccanici che, in base al tiraggio del corpo macchina (o, nei casi più tecnologici, del filo diamantato), in fase di taglio producono in uscita una variazione del segnale elettrico cui sono sottoposti. Tali tecnologie permettono, se correttamente applicate e sfruttate, di conoscere in tempo reale il carico cui il filo è sottoposto e quindi di regolarne il tiraggio istantaneamente. Le modalità di regolazione di quest'ultimo sono gestite da un altro elemento di spicco delle macchine di ultima generazione, ossia il software interno. Non tutte le macchine sopra citate possiedono questa implementazione tecnologica; inoltre, per ovvi motivi industriali, qualora sia presente, risulta coperta da brevetti e quindi segreta nella sua totalità. L'esperienza in cava ha tuttavia permesso allo scrivente di

osservare da vicino le modalità operative delle diverse macchine tagliatrici in opera durante il taglio ed ha quindi consentito di effettuare una diversificazione delle modalità di acquisizione ed elaborazione dei dati da parte delle tagliatrici. Nel seguito si propongono una descrizione oggettiva delle caratteristiche osservate ed una spiegazione basata su dati osservazionali delle modalità operative delle diverse macchine ai fini securistici.

### 3.5.2.1 Inverter

L'inverter è un dispositivo elettronico atto a trasformare una corrente continua in corrente alternata di forma sinusoidale o pseudosinusoidale. Nell'ambito delle macchine elettriche, è utilizzato sostanzialmente ai fini di regolare la velocità dei motori trifase. Nell'inverter la tensione alternata della rete (trifase o monofase) viene raddrizzata in corrente continua e quindi riconvertita in corrente alternata trifase a frequenza variabile per alimentare il motore. Il valore della frequenza in uscita può quindi essere scelto a piacere dall'utilizzatore a seconda della velocità di funzionamento che si vuole far raggiungere al motore.

Nell'ambito delle tagliatrici a filo diamantato, la tecnologia inverter ricopre un ruolo fondamentale in diversi aspetti della pratica lavorativa. In primo luogo le macchine dotate di questi sistemi possono essere avviate gradualmente in fase di taglio: si tratta di un elemento importantissimo, in quanto precedentemente le macchine erano munite di una semplice tecnologia di avvio on-off per cui il filo diamantato, una volta avviato il taglio, raggiungeva in una frazione di secondo velocità elevatissime; tale situazione poteva essere molto pericolosa se non fatale nei casi in cui si fosse presentata la necessità di "aiutare" a mano, da parte del cavatore, il filo all'avvio (pratica che talvolta si verifica per condizioni di taglio particolarmente difficili e di dimensioni del blocco poco regolari). Un altro aspetto interessante di questa tecnologia è la possibilità di controllo non solo della velocità della puleggia motrice, ma anche del motore di arretramento della macchina, la quale non si muove più a velocità costante, ma limitabile a determinati valori. Tale tipologia di controllo dovrebbe essere abbinata all'installazione nel corpo macchina di una cella di carico che, grazie ad una programmazione software adeguata, potrebbe impedire di sottoporre il filo diamantato a tensioni eccessive dovute

all'arretramento della macchina ed al momento torcente conferito dalla puleggia motrice.

### 3.5.2.2 Cella di carico

Le celle di carico (Figura 3.20) sono strumenti ampiamente utilizzati in svariati settori dell'ingegneria per la misurazione delle forze e quindi per la determinazione di pesi, pressioni e carichi agenti su un dato elemento. Sono costituite da una struttura deformabile nel regime elastico lineare ed è proprio da quest'ultima che, a seguito di una data deformazione, restituiscono il valore di carico ad essa associato mediante un sistema elettrico che, nel caso delle rilevazioni di trazione (sistema in uso per le tagliatrici a filo diamantato), è composto da sensori estensimetrici o piezoelettrici. L'importanza di questo strumento è indiscutibile in quanto, se correttamente sfruttato, potrebbe radicalmente modificare le condizioni di sicurezza in cava. Risulterebbe infatti possibile abbinare il tiraggio istantaneo cui è soggetto il filo diamantato ad un dato arretramento del corpo macchina, mediante il dispositivo inverter descritto precedentemente, in modo da non sollecitare troppo filo e giunte. Risulterebbe anche possibile agire direttamente sul motore della puleggia motrice, la quale plausibilmente è gestita da un secondo inverter, in modo da avere un completo controllo sia sull'arretramento (componente delle forze di taglio denominata  $X$  in relazione (16)), sia sul tiraggio del filo diamantato (componenti delle forze di taglio denominate  $F$  in relazione (16)). Le tecnologie osservate in cava, infatti, sono spesso meno sofisticate di quanto lo sviluppo mecatronico offra sul mercato. Alcune tagliatrici sono infatti basate, per quanto riguarda l'arretramento dell'impianto, semplicemente su un sistema di assorbimento elettrico del motore della puleggia motrice (sistemi di controllo ad anello aperto Cap. 3.5.3): l'arretramento del corpo macchina, e quindi del taglio, avviene in maniera iterativa quando, fissato un certo amperaggio assorbito dal motore elettrico (solitamente 40-50 A), ad un dato abbassamento dell'amperaggio richiesto percepito dalla centralina corrisponde uno step di arretramento. La macchina riconosce un minor assorbimento del motore elettrico come un avanzamento del taglio effettuato, lato blocco, e risponde a tale valutazione con un arretramento, lato macchina, tale da alzare nuovamente l'amperaggio richiesto in quanto il filo "incontra" nuovamente materiale da tagliare. Tale tecnologia non

permette in alcun modo di conoscere il tiro istantaneo sul filo diamantato, elemento fondamentale per la sicurezza degli operatori durante il taglio, né tantomeno permette di agire sul moto della puleggia motrice che, in caso di rottura, procede nel suo movimento di rotazione.



Figura 3.20: Esempio di cella di carico per misure di trazione (www.siemens.com)

### 3.5.3 Controllo dei dati di taglio istantanei

I due strumenti di sicurezza descritti precedentemente, se non correttamente integrati all'interno del sistema hardware-software della macchina, potrebbero portare ad una erronea concezione del pericolo insito nel lavoro di cava e del taglio del lapideo. Le specifiche cui deve sottostare il sistema di controllo sono tuttavia contenute nella già citata Norma UNI EN 15163:2017; al paragrafo 5.2.1 “*Sicurezza e affidabilità del sistema di controllo*” viene esplicitato come il sistema di controllo debba rispondere ai requisiti della Norma EN ISO 13849-1:2015 “*Sicurezza del macchinario – Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza – Parte 1: Principi generali per la progettazione*”. Quest’ultima Norma specifica i requisiti di sicurezza e le linee guida sui principi di progettazione e integrazione di parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza, inclusa la progettazione del software; è una Norma di tipo B1, ossia tratta uno o più aspetti della sicurezza per un’ampia gamma di macchinari (tra cui le tagliatrici a filo diamantato).

In termini generali, un sistema è definito come un ente (fisico o astratto) dato dall’interconnessione di più parti elementari, per cui vale il principio di azione e reazione. In Figura 3.21 è esemplificata una schematizzazione della definizione di

sistema: la variabile di interesse del sistema è l'uscita  $y$ , il cui andamento è influenzato dall'ingresso  $u$ , essendo  $y$  ed  $u$  le funzioni (o parametri) in ingresso e uscita. In scienza dell'automazione, il controllo automatico di un dato sistema dinamico si prefigge di modificare il comportamento del sistema da controllare, attraverso la manipolazione della grandezza in ingresso.

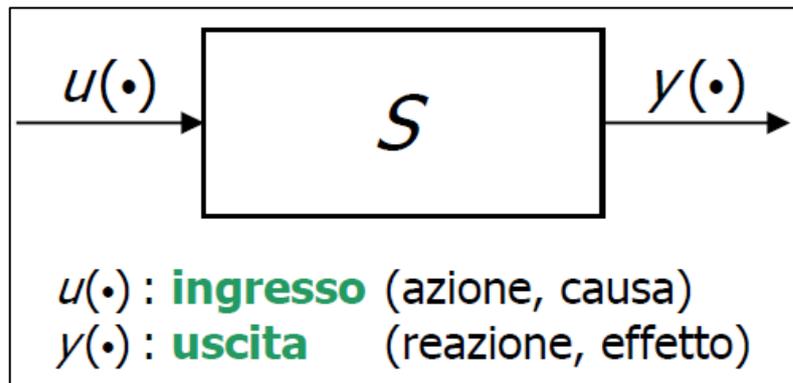


Figura 3.21: Schematizzazione generale di un sistema

Il controllo dei dati di taglio istantanei da parte delle tagliatrici a filo diamantato avviene, per quanto osservato in cava, mediante due tipologie di sistemi intrinsecamente differenti e aventi diverse potenzialità legate alla sicurezza.

È possibile suddividere i sistemi di controllo automatico delle tagliatrici in: sistemi ad anello aperto e sistemi ad anello chiuso.

#### - SISTEMI DI CONTROLLO AD ANELLO APERTO

I sistemi di controllo ad anello aperto si basano su una elaborazione di parametri in ingresso del sistema in fase di controllo, eseguiti senza conoscere il valore dell'uscita, essendo note alcune proprietà del sistema da controllare. In questo caso è fondamentale avere un buon modello matematico che descriva con precisione il comportamento del sistema. Tanto più il modello matematico su cui si basa l'azione del controllo è rigoroso, tanto più questo tipo di controllo è affidabile.

Ciò si traduce, per quanto riguarda le tagliatrici a filo diamantato da cava, nell'analisi istantanea dell'ampereaggio assorbito dal motore in fase di taglio non tenendo in considerazione altri parametri, come lo stato di tensionamento istantaneo cui è soggetto il filo. Una volta impostato l'ampereaggio massimo che secondo il

cavatore è necessario al taglio, la macchina, mediante il sistema di controllo ad anello aperto, si porta istantaneamente su quel valore e permane in tale configurazione per tutta la durata del taglio. Si riporta in Figura 3.22 uno schema a blocchi della metodologia di arretramento delle macchine gestite da un sistema di controllo ad anello aperto.

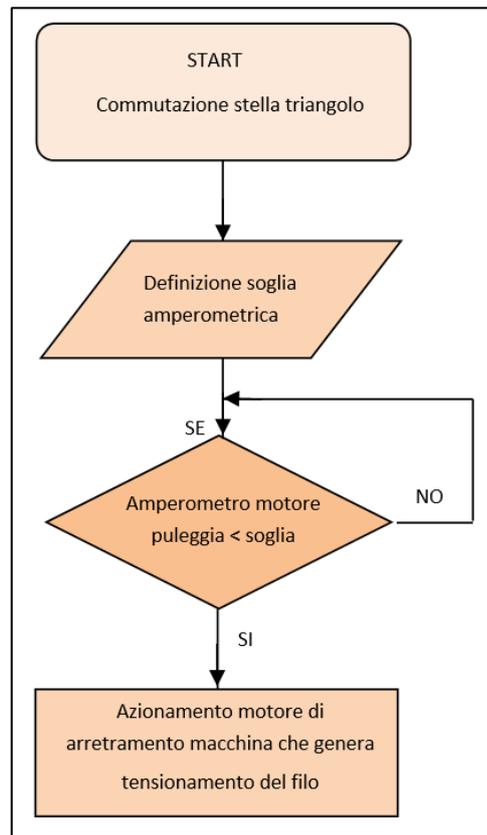


Figura 3.22: Schema a blocchi sistema di controllo ad anello aperto

Il legame che intercorre tra dato in ingresso e dato in uscita è statico, ossia il valore dell'uscita  $y$  all'istante  $t$  dipende solo dal valore dell'ingresso  $u$  allo stesso istante  $t$ .

In formule:

$$y(t) = g(u(t)), \quad \forall t \quad (20)$$

Le macchine tagliatrici che possiedono questa tecnologia sono presenti in un numero di 25 unità in cava ed hanno sostanzialmente il pregio di essere molto versatili per il taglio di riquadratura sul piazzale. Impostato il valore di amperaggio richiesto per il taglio ed impostata la velocità necessaria (fino a 40 m/s), sono facilmente gestibili e danno la percezione di un buon controllo del taglio stesso. A parere dello scrivente però vi sono alcune criticità non trascurabili ai fini della sicurezza per quanto riguarda questa tipologia di controllo automatico: una di

queste è la totale assenza di dati riguardanti il tiraggio cui è sottoposto il filo diamantato istantaneamente. La potenza assorbita dal motore è infatti, senza dubbio, proporzionale e dipendente dal tiraggio istantaneo del filo, ma quest'ultimo riceve sollecitazioni ulteriori sia dal motore di traino che dagli accumuli di energia elastica derivante dalla non sempre assoluta omogeneità del lapideo in fase di taglio. Comporterebbe quindi una grave sottostima del rischio valutare, come elemento securistico preponderante, il solo assorbimento del motore elettrico, tralasciando completamente un sistema di controllo e di analisi sul filo diamantato come elemento a sé stante. Altra criticità notevole di questi sistemi, come si evince dallo schema a blocchi di Fig. 3.22, è la totale assenza di un sistema strutturato di disalimentazione della macchina. Essendo il controllo basato sul solo assorbimento amperometrico della puleggia motrice, e quindi non essendo in grado di percepire tecnologicamente le diverse fasi di taglio, questa permane nel suo moto anche qualora il taglio, per ragioni varie, presentasse la necessità di essere immediatamente interrotto. Si riporta un esempio di tale affermazione verificatosi in cava durante la permanenza dello scrivente: a causa di difetti interni del blocco si è verificata l'apertura di schianto dello stesso, fortunatamente nel verso di apertura (il blocco si è rotto senza chiudersi sul filo diamantato, bensì aprendosi nel verso opposto). La tagliatrice è stata arrestata manualmente mediante pulsante di arresto di emergenza solo dopo alcuni istanti dall'avvenimento del fatto poiché permaneva nel suo stato di moto, mantenendo il filo diamantato in rotazione fino al suo sfilamento dalla gola della puleggia, in quanto il sistema non riconosceva la situazione come pericolosa: in figure 3.23a e 3.23b è possibile osservare il blocco in questione.



*Figure 3.23a e 3.23b: rottura blocco per cedimento di schianto*

All'interno della Direttiva Macchine, Allegato I, principi generali si asserisce: “*Il fabbricante di una macchina, o il suo mandatario, deve garantire che sia effettuata una valutazione dei rischi per stabilire i requisiti di sicurezza e di tutela della salute che concernono la macchina. La macchina deve inoltre essere progettata e costruita tenendo conto dei risultati della valutazione dei rischi.*”

*Con il processo iterativo della valutazione dei rischi e della riduzione dei rischi di cui sopra, il fabbricante o il suo mandatario:*

*... - individua i pericoli cui può dare origine la macchina e le situazioni pericolose che ne derivano”.*

L'esempio proposto è singolo e non può essere utilizzato per effettuare analisi statistiche dell'incidenza di situazioni pericolose come quella descritta; risulta indicativo però che in una permanenza in cava relativamente breve come quella dello scrivente si siano verificate situazioni che in un'analisi di rischio non dovrebbero in alcun modo essere trascurate. Le macchine a circuito chiuso di cui seguirà l'analisi permettono un controllo della trazione del filo più accurata, che garantisce procedure di arresto macchina automatiche e tempestive.

#### - SISTEMI DI CONTROLLO AD ANELLO CHIUSO

I sistemi di controllo ad anello chiuso (anche detti in retroazione), si differenziano dai precedenti in quanto l'anello di controllo riporta all'ingresso del processo che si vuole controllare o rendere stabile una funzione dell'uscita che va sommata algebricamente al segnale già presente in ingresso. Il legame che intercorre tra dato in ingresso e dato in uscita è dinamico, ossia il valore dell'uscita  $y$  all'istante  $t$  dipende da tutti i valori dell'ingresso  $u$  fino all'istante  $t$ . In formule:

$$y(t) = g(u([\ ] - \infty, t]), \quad \forall t \quad (21)$$

Per riassumere la “storia passata” del sistema fino all'istante  $\tau$ , si può introdurre lo stato  $x(\tau)$  che racchiude in sé tutta la memoria del passato, ossia:

$$y(t) = g(x(\tau), u([\tau, t])), \quad \forall t \geq \tau \quad (22)$$

Un sistema di controllo di questo tipo risulta indiscutibilmente di più difficile realizzazione, in quanto necessita di programmazione software adeguata, tuttavia da un punto di vista prettamente securistico un'implementazione simile permette di

avere dati di taglio “pesati” non solo istantaneamente, ma che tengono conto dell’intero processo di taglio, consentendo una regolazione del tiraggio del filo diamantato (qualora il sistema fosse accoppiato ad una cella di carico) molto precisa e basata sull’effettiva forza agente su di esso e non su altri parametri ad essa correlati (come l’assorbimento elettrico del motore della puleggia motrice).

### 3.5.3.1 Sistema di controllo PID

Un sistema di controllo automatico in retroazione molto utilizzato in svariati ambiti dell’ingegneria è il sistema di controllo PID (proporzionale-integrale-derivativo). Tale sistema ha trovato grande impiego in ambito industriale, essendo molto versatile; grazie ad un sensore che fornisce un valore attuale di input nel sistema, il controllore PID è in grado di reagire attivamente ad un errore positivo o negativo rispetto ad un parametro fisso fornito dall’utente, facendo tendere l’errore a 0. La reazione all’errore, in aggiunta, può essere regolata mediante programmazione software.

Dal punto di vista matematico, il regolatore PID è un sistema dinamico che elabora il segnale di ingresso errore come differenza fra il riferimento e la variabile controllata  $e(t) = r(t) - y(t)$  ottenendo il segnale di controllo  $u(t)$  (Figura 3.24).

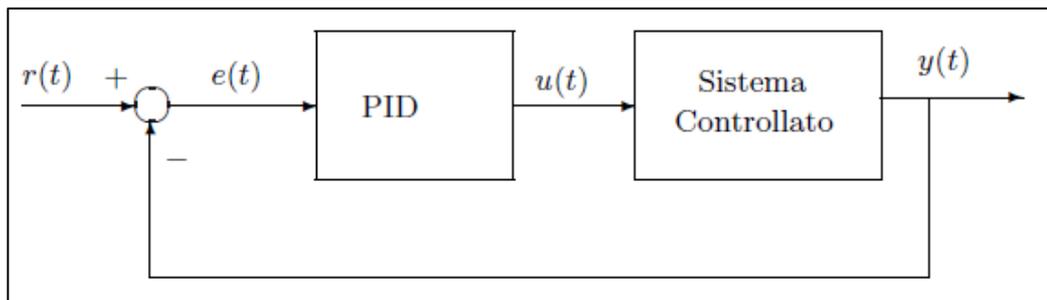


Figura 3.24: Schema a blocchi di sistema di controllo PID

Il regolatore PID, nella sua forma base, ha una struttura comprendente la somma di tre termini di controllo:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (23)$$

rispettivamente chiamati termine *proporzionale P*, termine *integrale I* e termine *derivativo D*; dipendenti dai parametri rispettivamente guadagno proporzionale, costante di tempo integrale, costante di tempo derivativa.

Per quanto riguarda l'azione di controllo proporzionale, in estrema sintesi, è possibile asserire che maggiore è l'errore  $e(t)$  all'ingresso del controllore, maggiore è l'azione di controllo svolta dal sistema. Un sistema puramente proporzionale produce in uscita una differenza tra il valore richiesto e quello effettivamente ottenuto. Tuttavia la sola azione proporzionale non garantisce l'annullamento dell'errore a regime. Tale funzione è svolta infatti principalmente dal termine integrale il quale, appunto, integra nel tempo l'errore. Un errore costante provoca un incremento dell'azione di controllo fino a che l'errore non si è completamente annullato ed inoltre un valore istantaneo nullo del segnale di errore non ha come conseguenza necessaria un valore di azione integrale nulla. Infine per quanto riguarda l'azione di controllo derivativa è possibile asserire, in termini semplicistici, che serve a migliorare i margini di stabilità del sistema fornendo un anticipo di fase all'anello di controllo in retroazione; ha lo scopo di introdurre un'azione che sia proporzionale alla variazione dell'errore, fornendo quindi una correzione che “anticipa” l'andamento dell'errore nel tempo.

Una caratteristica fondamentale dei sistemi di controllo PID è che possono essere utilizzati anche senza conoscere un modello dettagliato del processo: tale elemento è di fondamentale importanza in quanto risulta possibile calcolare i guadagni e le costanti di tempo basandosi solo su semplici prove sperimentali da effettuare direttamente sull'impianto.

La taratura di tale sistema ad anello chiuso, detta anche “*secondo metodo di Ziegler-Nichols*” è articolata nei seguenti punti:

- a. si chiude l'anello inserendo un controllore puramente proporzionale con basso guadagno  $K_p$ ;
- b. si aumenta progressivamente il guadagno  $K_p$  fino all'insorgere di una oscillazione regolare permanente;
- c. si definisce  $K_u$  come valore del guadagno  $K_p$  tale per cui si abbiano delle oscillazioni ad ampiezza costante;
- d. si misura il periodo  $T_u$  dell'oscillazione (Figura 3.25);

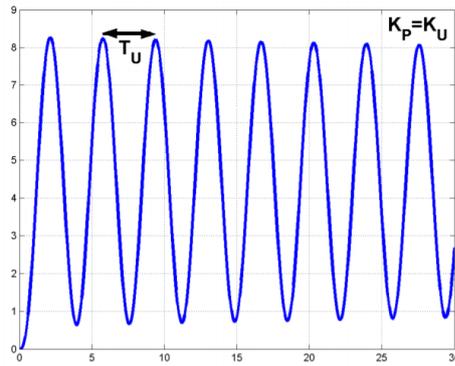


Figura 3.25: oscillazioni del sistema e costanti di interesse metodo Ziegler-Nichols

e. si calcolano i guadagni secondo le formule:

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$0.5K_u$		
<b>PI</b>	$0.45K_u$	$T_u/1.2$	
<b>PID</b>	$0.6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

Tabella 3.1: Calcolo guadagni mediante taratura PID

(C. Fannuzzi, *Controllori standard - PID*, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, gennaio 2004 - <http://www.ladispe.polito.it/corsi/contrautoinf270/>, M. Tartagna, M. Indri, M. Canale, *Controlli Automatici*, Politecnico di Torino)

Sebbene la trattazione in tale contesto sia molto limitata ed appartenga per definizione ad ambiti dell'ingegneria prettamente meccatronici ed informatici, si evince come le potenzialità di un sistema di controllo di questa tipologia, applicati al contesto di cava ed all'estrazione del lapideo in generale, possano totalmente modificare le condizioni di sicurezza del settore dell'estrazione e di come sia necessario un forte incremento di cooperazione di conoscenze tra l'ingegneria mineraria e quella meccatronica-informatica. Risulta infatti opportuno sottolineare come l'ambiente di cava sia totalmente differente da quello asettico in cui tali soluzioni tecnologiche vengono progettate ed implementate: si pensi ad esempio alla polvere di marmo depositata su una cella di carico che ne infici la sensibilità o i cicli di gelo e disgelo cui sono sottoposti i trasduttori elettrici delle tagliatrici. D'altra parte, una macchina tagliatrice a filo diamantato sviluppata con implementazione PID accoppiata ad un sistema di acquisizione istantanea dei dati di taglio (mediante cella di carico a cuscinetto) permetterebbe di conoscere e gestire automaticamente, e quindi senza lasciare margine di errore all'operatore, il tiraggio

del filo diamantato considerandolo come input principale del sistema, evitando di considerare l'assorbimento elettrico del motore della puleggia motrice il solo parametro da prendere in considerazione per l'arretramento della macchina stessa (e quindi del taglio). Inoltre, sarebbe possibile gestire in tempo reale la disalimentazione della macchina in caso di pericolo: ad esempio in caso di rottura del filo diamantato o di apertura del blocco di schianto (come descritto nell'esempio precedente riguardante i sistemi ad anello aperto). La messa a punto di sistemi del genere, a parere dello scrivente, dovrà essere al centro degli sforzi tecnici ed economici negli anni a venire, da parte dei produttori, per incrementare in maniera sostanziale il livello di sicurezza degli operatori nell'estrazione di lapidei.

## ***CAPITOLO 4 – L'ESPERIENZA DI CAVA***

---

Quanto esposto finora appartiene ad un retaggio tecnico-scientifico imprescindibile, senza il quale le osservazioni critiche che seguiranno non avrebbero alcuna valenza. Risulta altresì importante effettuare un'analisi per lo meno qualitativa delle condizioni di lavoro in cava che, insite nel processo produttivo, possono contribuire alla sicurezza collettiva degli operatori. Si ricorda inoltre che tali pratiche sono radicate nella professione di cavatore e che quindi sono gestite in maniera ottimale qualora si presentino delle criticità nei tagli. Tale capitolo non rappresenta affatto una critica né si prefigge l'obiettivo di demonizzare alcune pratiche di uso comune in cava, tantomeno è presente la volontà di "insegnare" un mestiere a persone di esperienza come i cavatori conosciuti a Gioia. Si tratta di una mera descrizione dello stato dell'arte del lavoro di cava, per quanto osservato durante la permanenza dello scrivente, che possiede pratiche talvolta inevitabili, ma che costituiscono il contesto vero dell'utilizzo delle macchine e delle tecnologie disponibili. Si descriveranno inoltre alcuni elementi fondamentali osservati nella pratica di taglio che, purtroppo, sono poco seguiti in ambito scientifico e necessiterebbero di ulteriore approfondimento tecnico in quanto strettamente correlati alla sicurezza delle operazioni di taglio e soprattutto degli operatori (ad esempio le sollecitazioni a fatica nei punti di giunzione del filo diamantato); si effettueranno infine alcune considerazioni di carattere puramente economico.

## 4.1 CONSIDERAZIONI SUL FILO DIAMANTATO

Le analisi quantitative effettuate fino ad ora circa le sollecitazioni agenti sul filo diamantato (Cap. 3.3) sono derivanti dal retaggio scientifico proprio dalla meccanica delle macchine, e si basano su semplificazioni ingegneristiche di notevole entità. L'esperienza di cava ha permesso allo scrivente di effettuare valutazioni sul campo di come queste debbano essere rapportate alla realtà di cantiere e che risulti molto complesso, soprattutto dal punto di vista rigorosamente ingegneristico, effettuare delle analisi quantitative che contemplino tutte le condizioni al contorno che compromettano il taglio e la sicurezza degli operatori. Organizzando per punti si cercherà di effettuare un'analisi delle situazioni riscontrate in cava.

## 4.2 QUESTIONE FILO TRADIZIONALE – FILO COPERTO

In cava permane tutt'oggi la questione di quale sia il filo diamantato migliore (e più sicuro) tra quello tradizionale a molle e quello coperto plastificato o gommato. Tenendo presente la norma UNI EN 15163:2017, che non menziona nemmeno più il filo tradizionale, è possibile effettuare una breve analisi sulle criticità delle due tipologie di filo.

Per quanto riguarda il filo tradizionale, alcuni cavatori sostengono che esso è facilmente controllabile dal punto di vista dell'usura della fune interna in acciaio mediante una semplice analisi visiva, spostando le molle ed i distanziali tramite l'applicazione di una forza: elemento che renderebbe più immediata la decisione di sostituirlo e comunque lo renderebbe più monitorabile dal punto di vista della durabilità. Un filo diamantato che all'osservazione risulta "nero" (Figura 4.1) sarebbe quindi da sostituire. Il colore scuro è dovuto all'usura del cavo e alla fuoriuscita del lubrificante interno all'anima dello stesso; le misurazioni tramite calibro hanno evidenziato anche una diminuzione di diametro di circa 1 mm di una fune usata rispetto ad una fune nuova, dovuta all'attrito che perline diamantate, molle e distanziali imprimono alla fune durante il taglio.



Figura 4.1: Anima del filo diamantato usurata a sinistra, nuova a destra.

D'altra parte il filo diamantato tradizionale possiede l'enorme limite di proiettare, qualora avvenga uno strappo in una zona diversa dal punto di giunzione (che è compreso tra due pressatori), 5 perline diamantate, 5 molle e 10 distanziali compresi tra due fermi, scagliandoli a velocità elevatissime contro i pannelli di protezione o, nei casi più gravi, in cava. In Figura 4.2 a,b,c,d si riportano gli effetti di uno strappo avvenuto in cava, in presenza dello scrivente, durante un taglio di riquadratura con macchina tagliatrice Lochtmans. Gli effetti delle proiezioni sono ben visibili sui pannelli in acciaio di protezione, i quali erano opportunamente montati ed attivi. Per quantificare qualitativamente la velocità di impatto è possibile osservare come la lastra protettiva del carter in acciaio sia stata quasi bucata dall'impatto ed il volano motore in alluminio danneggiato, e come il nastro in tessuto di protezione sia stato evitato dalla traiettoria delle perline diamantate.





Figura 4.2 a, b, c, d: effetti di uno strappo con filo diamantato tradizionale a molle

Per quanto riguarda il filo coperto, nonostante sia poco monitorabile dal punto di vista della fune interna (poiché ricoperta di materiale polimerico), un aspetto positivo da sottolineare, e suggerito dagli operatori di cava, è contrariamente al caso precedente la limitazione delle proiezioni di elementi costituenti il filo diamantato. Le prove a strappo condotte dall'Università di Pisa (*Tantussi, 2007*) hanno dimostrato come avvengano proiezioni anche per il filo coperto, contrariamente a quanto si possa pensare e a quanto questo pensiero sia radicato in cava, e che le proiezioni siano di singole perline in prossimità della zona in cui è avvenuto lo strappo o di interi spezzoni di filo che urtando contro i carter protettivi subiscono un tranciamento. In Figura 4.3 si osserva uno spezzone di filo diamantato coperto che ha subito uno strappo: si nota come la perline in prossimità del tranciamento non sia presente e che quindi sia stata proiettata, nonostante il filo fosse di tipo gommato.



Figura 4.3: Spezzone di filo gommato dopo uno strappo

Da un punto di vista prettamente sicuristico, semplificando il problema e tralasciando alcune condizioni al contorno infatti è possibile definire il rischio come:

$$R = (PR \cdot ED \cdot FC) \cdot n$$

Essendo:

R = rischio, numero compreso tra 0 ed 1;

PR = livello di frequenza attesa di accadimento

ED = entità del danno espressa in giornate lavorative perdute/7500 (dove 7500 corrisponde al totale medio di giornate lavorative di un uomo);

FC = fattore di contatto, ossia la possibilità di interferenza, funzione della durata percentuale dell'esposizione a situazioni od operazioni potenzialmente pericolose rispetto al ciclo di produzione;

n = numero di eventi;

L'utilizzo di questa formulazione in un sistema complesso ed eterogeneo come quello di cava risulta essere di notevole complessità. È possibile inizialmente pensare che, considerando gli eventi "proiezioni" del filo tradizionale come statisticamente indipendenti, essi costituiscano una sommatoria al termine n della relazione precedente incrementando, indiscutibilmente, il rischio e che quindi sia da preferire il filo plastificato rispetto a quello tradizionale, in ogni situazione.

L'ultimo incidente mortale in cava causato dalla proiezione di una perlina si è verificato con l'utilizzo del filo coperto, a seguito della proiezione di una singola boccia diamantata. Si evince come, poter esprimere un parere oggettivo della reale sicurezza dell'una o dell'altra tipologia di fili diamantati sia tutt'altro che semplice. Un dato che non può prescindere da tale analisi è la considerazione che sia avvenuto o meno il colpo di frusta a seguito della rottura. Nei casi in cui si verifichi uno strappo, la perlina diamantata del filo plastificato, mantiene la sua posizione in quanto legata ad esso dalla matrice polimerica; nei casi in cui avvenga il colpo di frusta, però, l'energia elastica e cinetica che si sviluppa nell'istante della "frustata" è tale da espellere la perlina diamantata a enormi velocità, nonostante la matrice in gomma o plastica. In tal senso si avrebbe un incremento sostanziale del valore di entità del danno (formulazione precedente), con sensibile aumento del rischio. Nei casi in cui non si verifichi il colpo di frusta, invece, la matrice polimerica di

fissaggio delle perline diamantate sul filo coperto risulta essere sufficiente, nella maggior parte dei casi, ad evitare l'espulsione della stessa.

In base a quanto asserito, il filo diamantato coperto, soggetto a strappo ed in assenza del verificarsi del colpo di frusta è, a parere dello scrivente, da preferire al filo tradizionale. Ciò nonostante le criticità intrinseche del filo diamantato, di tutte le tipologie, lo rendono un elemento intrinsecamente non esente da rischio, il quale va gestito e pensato, oltre che dal punto di vista tecnico, anche dal punto di vista dell'interazione con le macchine preposte al taglio.

### 4.3 MORSETTI DI GIUNZIONE

Un aspetto molto dibattuto in cava e che necessiterebbe di più "standardizzazione" da parte del mondo scientifico, riguarda le giunzioni del filo diamantato. Esse costituiscono il vero e proprio punto di debolezza del filo, nonostante le tecniche di pressatura effettuate al fine di una miglior tenuta durante il taglio. Inoltre, se il problema del taglio di lapidei con tagliatrice riguardasse solamente aspetti relativi a sollecitazioni di trazione cui il filo (e di conseguenza le giunzioni) è sottoposto, sarebbe ipoteticamente possibile gestire le macchine tagliatrici con sistemi come quelli visti al Cap. 3.5.3.1, tali da non consentire una trazione superiore ad un certo valore imposto. Ciò che accade nelle giunzioni però risulta, dal un punto di vista delle sollecitazioni imposte, assai differente da quello che succede nella restante porzione del filo diamantato. Le funi, come noto, sono soggette unicamente a sforzi di trazione ed al loro interno non si sviluppano, per gli usi industriali cui sono soggette, sollecitazioni di taglio o momento flettente. Il punto di giunzione risulta invece rigido e conferisce alla zona in cui è inserito una rigidità intrinseca e con caratteristiche proprie dell'acciaio (o del rame) di cui è costituito. La zona quindi, oltre ad essere soggetta a sforzi di trazione, è soggetta anche a sollecitazioni di tenso-flessione che ne inficiano la resistenza; in aggiunta, la porzione di giunzione sottoposta a pressatura impedisce lo scorrimento relativo dei trefoli interni del cavo di acciaio, anima del filo diamantato. I movimenti ciclici a differenti curvature cui la zona di giunzione è sottoposta portano quindi allo sviluppo di zone di fatica molto importanti nel punto di immorsamento della giunzione sul filo, con decadimento della resistenza dello stesso, già in fase di preparazione al taglio e potenzialmente

con filo e giunzione nuovi. Il retaggio tecnico-scientifico dell'ingegneria meccanica in tema di sollecitazioni a fatica sugli acciai è vastissimo, ma è sempre applicato allo studio di materiali omogenei come funi in acciaio o componenti metalliche; gli studi pubblicati a riguardo e consultati dallo scrivente risultano molto specifici e si concentrano in maniera particolare sull'instaurazione di cricche a livello millimetrico o addirittura micrometrico che sottoposte a cicli di fatica inficiano in maniera sostanziale il comportamento di un componente meccanico. Il filo diamantato, nel momento stesso in cui viene giuntato e pressato, non può più essere considerato come elemento singolo (ad esempio come fune di acciaio sottoposta a cicli flessionali) ma deve essere trattato come un composito avente caratteristiche tecniche e meccaniche a sé stanti e che come tali devono essere valutate. Tuttavia, in letteratura tecnica non sono stati rinvenuti studi su questo argomento, aventi una base statistica significativa.

In cava, durante la pratica lavorativa, la questione subisce una ulteriore complicazione dovuta alla mancanza di basi tecnico-scientifiche adeguate ed i cavaatori cercano di lavorare al meglio delle loro conoscenze dettate dall'esperienza. Lo scrivente infatti, intervistando diversi operatori circa le tempistiche di rifacimento della giunta ha ricevuto spesso risposte differenti e caratterizzate dal riferimento all'esperienza maturata negli anni e dall'analisi visiva: tale elemento, sebbene denoti la professionalità di molti operatori, implica la non conoscenza di uno standard di sostituzione delle giunte dopo un certo valore di  $m^2$  di taglio effettuati (problematica la cui causa non risulta attribuibile ai cavaatori, che non hanno altra indicazione a riguardo se non l'appellarsi alla loro esperienza e professionalità). Si riporta in Figura 4.4 il confronto tra due morsetti di giunzione in diversi stati di usura che esplicitano le condizioni in cui queste devono essere sostituite: il tutto è lasciato all'analisi visiva in cava e non si riferisce a dati tecnici forniti agli operatori da esperti qualificati del settore.



Figura 4.4: Morsetti di giunzione in diversi stati di usura

Si nota come il morsetto di giunzione a sinistra (nuovo) abbia tra la zona di pressatura e quella di filettatura che si congiunge all'altro spezzone di filo diamantato una sorta di scalino di acciaio di dimensioni sub-millimetriche, non presente nella giunta di destra (usurata) poiché consumato durante il taglio per abrasione.

Un altro aspetto, già accennato, riguardante i morsetti di giunzione è rappresentato dalla zona di rigidità che si crea nel filo diamantato in prossimità di questi componenti. Tale zona sottopone il filo a sforzi ciclici di fatica flessionale che, a causa delle plausibili micro-cricche che si formano sulla fune del filo diamantato all'atto della pressatura della giunzione, ne inficiano pesantemente la resistenza. In Figura 4.5a e b è presente un filo diamantato che ha subito una rottura per fatica flessionale in prossimità del punto di giunzione. Il filo diamantato era di tipologia tradizionale e la macchina usata una Lochtmans LGR.



Figura 4.5 a, b: Strappo di un filo diamantato in prossimità della giunzione

La zona di “rigidità” del filo diamantato presente in prossimità del morsetto di giunzione, possiede per il filo tradizionale un'altra criticità; infatti man mano che la giunzione viene sostituita, la porzione di cavo di acciaio libera di inflettersi nelle zone di cambio di curvatura diminuisce provocando una tensione, dal punto di vista flessionale, progressivamente superiore nella zona di giunzione. Tale elemento, ad una prima analisi, potrebbe risultare secondario, ma l'esperienza di cava ha evidenziato come una delle cause che concorrono alla rottura del filo diamantato sia proprio questo fattore. Anche in questo caso, le giunzioni vengono rifatte iterativamente e senza indicazioni da parte di terzi, come tecnici o ingegneri, sul fatto di lasciare un margine di cavo in acciaio scoperto in prossimità della zona di raccordo; il tutto è nuovamente lasciato all'esperienza dei cavatori, i quali conoscono bene questa problematica e, per quanto visto in cava, tendono sempre lasciare un certo margine di sicurezza. Si riporta in Figura 4.6 a, b una esemplificazione del problema esposto mostrando la zona di “rigidità” nell'immediata vicinanza della giunzione prima e dopo il rifacimento della stessa.



Figura 4.6 a, b: Zona di rigidità del morsetto di giunzione, filo tradizionale

Diverso è il discorso per quanto riguarda le giunzioni effettuate su filo ricoperto plastificato o gommato, in quanto la non presenza dei pressatori permette al filo una maggior flessione della zona in esame, riducendo al minimo la lunghezza del tratto rigido (Figura 4.7).



Figura 4.7: Giunzione in filo ricoperto gommato

#### 4.4 SOLLECITAZIONI E USURA DEL FILO DIAMANTATO

L'osservazione costante del lavoro degli operatori in cava ha permesso allo scrivente di individuare alcuni aspetti della pratica lavorativa che contribuiscono all'usura del filo diamantato in maniera più o meno considerevole. Tali attività risultano importanti soprattutto da un punto di vista conoscitivo utile alla produzione degli utensili di taglio e delle macchine tagliatrici. Come già osservato precedentemente, la progettazione degli strumenti utilizzati in cava dovrebbe contenere una base teorica di ciò che realmente avviene all'atto della produzione dei blocchi per migliorarne le caratteristiche tecniche e quindi sicuristiche, nell'ottica delle BAT (best available technology).

Si elencheranno ora alcuni aspetti legati alla pratica lavorativa, che gli operatori gestiscono al meglio, connessi alla vita utile del filo diamantato.

##### 4.4.1 Avvio e fine taglio

I momenti più "delicati" dal punto di vista delle sollecitazioni cui il filo diamantato è sottoposto durante l'attività di taglio sono, per quanto osservato, gli istanti di inizio e fine del taglio.

Per quanto riguarda la fase iniziale del taglio, riferendosi in maniera più mirata ai tagli di riquadratura sul piazzale di cava, un elemento di forte sollecitazione cui è sottoposto il filo diamantato è la presenza degli spigoli vivi del blocco sui quali le perline tendono ad incagliarsi sollecitando a trazione e tenso-flessione la giunzione che tende a sfilarsi, nonostante la pressatura. I cavatori, per evitare tale

inconveniente, effettuano mediante martello e scalpello un alloggiamento per l'avvio del taglio (Figura 4.8); in tal modo, grazie anche alla tecnologia inverter di cui le macchine sono provviste, è possibile avviare la tagliatrice conferendo al filo una velocità limitata in modo da ampliare l'alloggiamento iterativamente prima di impostare la velocità massima e dare il taglio di produzione. Tale operazione, seppur in prima analisi banale, fa sì che il taglio proceda nel senso imposto e soprattutto che non avvengano sfilamenti del filo diamantato dalla traiettoria di taglio una volta impostata la macchina tagliatrice alla velocità massima di taglio, minimizzando i rischi dovuti all'espulsione del filo diamantato, ad una velocità lineare mediamente superiore a 35 m/s, dalla gola della puleggia motrice.



Figura 4.8: Alloggiamento del filo diamantato a inizio taglio

Per quanto riguarda la fase finale del taglio, la criticità più importante è stata riscontrata nella progressiva diminuzione del raggio di curvatura che il filo diamantato descrive nel lapideo: si richiama a tal proposito la Figura 3.2. Come descritto in Cap. 4.4, la zona di giunzione possiede una rigidità intrinseca che sottopone il filo diamantato a sollecitazioni di tenso-flessione e fatica flessionale, diminuendone la resistenza considerevolmente; ciò viene acuito ogni qualvolta tale porzione di filo è sottoposta a repentini cambi di direzione, situazione che si verifica molto più frequentemente nelle fasi di fine taglio. Il filo diamantato infatti, avendo un percorso più “breve” da percorrere, è soggetto ad un numero di cicli flessionali a ridotta curvatura maggiore rispetto alle fasi precedenti. Talvolta, per quanto osservato, il raggio di curvatura sembrerebbe addirittura inferiore a quanto il tratto di rigidità della giunzione possa inflettersi, provocando così sollecitazioni cicliche ad alta frequenza nel punto di maggior debolezza dell'intera stesa di filo, ossia la

giunta. Si riporta a tal proposito, in Figura 4.9 a, b, una esemplificazione di quanto appena descritto.



Figura 4.9a, b: Raggio di curvatura descritto dal filo diamantato a fine taglio

Oltre al possibile sfilamento della giunzione o alla rottura per cicli di fatica flessionale, portare il taglio a dei limiti di questa tipologia può essere fonte di un altro pericolo che occorre menzionare: qualora infatti il blocco fosse poco regolare (in cava viene definito “informe”) è possibile che questo ceda di schianto in quanto mantenuto unito solamente da un piccolo ponte di roccia: tale elemento fa sì che il filo diamantato possa restare pizzicato tra i due blocchi formatisi e strapparsi, con gli annessi problemi di sicurezza già citati.

Non esiste al momento alcuna regolamentazione che si riferisca alla disalimentazione della tagliatrice in condizioni limite di taglio, come quelle appena descritte, poiché risulta quanto mai difficile individuare un istante esatto in cui il taglio vada interrotto. In relazione a ciò si osserva l'importanza dell'implementazione di sistemi ad anello chiuso, descritti al Cap. 3.5.3, in grado di aggirare il problema e delegare al sistema di controllo lo spegnimento del motore elettrico della puleggia motrice qualora le forze di trazione in gioco sul filo diamantato siano troppo elevate e tali da compromettere la sicurezza in cava.

#### 4.4.2 Dimensione e numero dei blocchi

Strettamente connesso al discorso precedente è la valutazione oggettiva dell'usura del filo diamantato e la decisione che questo vada sostituito. Ad oggi il compito è lasciato ai cavatori che, grazie alla loro esperienza, tramite un'analisi visiva decidono quando un filo diamantato debba essere rigenerato o vada sostituito. Tale valutazione, seppur tempestiva e precisa per quanto osservato in cava, possiede alcune lacune tecnico-scientifiche non attribuibili ai cavatori. Non esiste un limite di ore o superficie di taglio per cui si abbia l'obbligo di sostituzione del filo, elemento non di secondaria importanza per quanto riguarda la sicurezza collettiva in cava. Per onestà intellettuale è anche doveroso ricordare come la vita di cava sia tutt'altro che "esatta" dal punto di vista delle dimensioni dei tagli, e delle statistiche riguardanti questi ultimi, come talvolta succede nei libri di ingegneria mineraria, motivo per cui un'analisi oggettiva e statisticamente significativa sia molto difficile. Si porta ad esempio, in Figura 4.10, un taglio osservato in cava avente problematiche di gestione dimensionale, di stesa di filo, di usura, di spigoli vivi nel blocco e di sollecitazioni flessionali a fine taglio.



Figura 4.10: Taglio di riquadratura blocco in piazzale di cava

Come si può osservare, la gestione di un taglio di riquadratura come quello soprastante contiene intrinseche complessità, sia dal punto di vista di gestione, che dal punto di vista operativo: sostituire il filo diamantato prima o dopo una

riquadratura del genere non è così scontato, nemmeno per cavatori con pluriennale esperienza.

Un altro aspetto che occorre menzionare circa le sollecitazioni cui è sottoposto il filo diamantato è il numero di blocchi simultanei in fase di taglio (Figura 4.11). Quest'operazione consiste nell'affiancare più blocchi in sequenza in modo da evitare più manovre degli escavatori per la preparazione del taglio, aumentando la produttività.



Figura 4.11: Allineamento di più blocchi da riquadrare iterativamente

Tale attività, seppur proficua da un punto di vista produttivo, necessita di un livello di attenzione da parte degli operatori superiore rispetto al taglio di riquadratura del singolo blocco, in quanto, giunti in prossimità della fine della prima riquadratura, il filo diamantato ha, da un lato, già prodotto un alloggiamento nel secondo blocco, dall'altro prosegue descrivendo raggi di curvatura via via inferiori nel primo. Una minima disattenzione sulla cessazione della prima riquadratura o il cedimento di schianto del primo blocco riquadrato può dar luogo a situazioni di pericolo come strappi, sfilamenti del morsetto di giunzione o sfilamento del filo diamantato dalla gola della puleggia motrice, con annessi rischi anche gravi per la sicurezza degli operatori. Risulta ovvio menzionare, anche in questa situazione, i sistemi di controllo ad anello chiuso in grado di gestire la disalimentazione della macchina basandosi unicamente sui dati istantanei di taglio rilevati dai sensori, eliminando l'arbitrarietà decisionale dell'operatore che, seppur attento, non può fisicamente percepire le forze di trazione agenti istantaneamente sul filo diamantato.

#### 4.4.3 Usura asimmetrica, acqua di raffreddamento, piegature

Alcuni aspetti che concorrono all'usura precoce del filo diamantato in cava, aumentandone il rischio di strappo, sono costituiti da una sommatoria di comportamenti che, all'apparenza banali, definiscono la vita utile dell'utensile in modo sostanziale. Ponendo il caso di un taglio di riquadratura poco "problematico", di dimensioni standard, omogeneo, con spigoli vivi limitati, vi sono alcune accortezze seguite dai cavaatori, ed appartenenti ad un retaggio empirico maturato negli anni, che occorre menzionare in quanto, qualora non rispettate, potrebbero essere fonte di rischi per la sicurezza di cava anche gravi.

##### - USURA ASIMMETRICA

Una regola non scritta, ma applicata da ogni cavatore in maniera più o meno efficace, al fine di ottenere un'usura del filo diamantato simmetrica durante il taglio, è l'applicazione di alcune torsioni (in cava chiamate "cariche") al filo diamantato prima di chiuderlo a cappio attorno al blocco da riquadrare. Tale processo fa sì che il filo chiuso a cappio attorno al blocco possieda una forza di torsione costante (in altre parole, tenda a svolgersi) che permette di attivare iterativamente i microutensili striscianti su tutta la superficie della perlina diamantata, evitando inoltre l'usura del polimetro (o delle molle) che ricopre il cavo. Anche in questo caso non esiste uno standard del numero di torsioni da applicare al filo diamantato prima del taglio: i produttori suggeriscono mediamente una torsione/m di filo diamantato. Per quanto osservato in cava, la tendenza è quella di rispettare tale valore per i tagli di riquadratura nel piazzale (aventi stese di filo comprese tra i 15 ed i 30 m), mentre per i tagli di stacco delle bancate, per i quali talvolta si arriva a stese di 90 m, il numero di torsioni è più arbitrario ed è di competenza di un cavatore più anziano e con più esperienza. Si riporta in Figura 4.12, l'esempio di un filo diamantato che presenta usura asimmetrica dovuta al conferimento di un numero non sufficiente di torsioni; è possibile osservare inoltre che la limitata forza torsionale impressa ha determinato la rottura di una perlina diamantata, inficiando le caratteristiche tecniche del filo. Oltre al rischio di strappo, ciò può essere un errore valutabile anche in termini economici in quanto la vita utile del filo diamantato diminuisce.



Figura 4.12: Usura asimmetrica di filo diamantato

#### - ACQUA DI RAFFREDDAMENTO

Poiché la temperatura delle perline diamantate durante il taglio è molto elevata, un procedimento obbligatorio e fondamentale per evitare l'usura del filo diamantato in tempi brevissimi è l'adduzione costante di acqua, la quale ha il compito di mantenere la temperatura costante e facilitare l'espulsione del detrito di marmo in fase di taglio. Ciò risulta ancora più importante per quanto riguarda i fili diamantati ricoperti plastificati o gommati in quanto, oltre all'usura delle perline, le alte temperature fanno sì che il materiale polimerico inizi a fondere, rendendo del tutto inutilizzabile il filo il quale va sostituito, con annessi problemi di sicurezza ed ancor più economici. L'adduzione di acqua procede seguendo il taglio a mano a mano che, ad occhio, questo inizia a “fumare”, termine cantieristico che identifica il momento in cui il detrito di marmo appena tagliato non viene più espulso come fanghiglia ma tende a disperdersi come pulviscolo nella direzione di taglio. Il quantitativo di acqua necessario, per quanto appreso in cava e suggerito dai produttori di filo diamantato (*Mega Diamant S.r.l.*), si aggira in un intervallo di variazione compreso tra 12 e 25 l/min. Vista la quantità ingente di acqua necessaria, la cava Gioia si è munita di un complesso sistema di pompe idrauliche per il ricircolo dell'acqua di taglio a cui sono associate più filtropresse grazie alle quali la fanghiglia di risulta non viene espulsa nell'ambiente circostante, ma inviata a trattamenti terzi di riuso. Si riporta in Figura 4.13 una filtropressa con annesso sistema di raccolta fanghi.



Figura 4.13: Filtropressa Cava Gioia

- PIEGATURE

Un filo diamantato che ha subito uno strappo non sempre viene sostituito completamente. Qualora infatti risulti ancora utilizzabile, ossia il consumo di perline non sia ancora tale da doverlo sostituire o la fune interna non sia del tutto consumata, si procede al rifacimento del morsetto di giunzione e si riavvia il taglio. Un aspetto che occorre tener presente di un filo diamantato che ha subito una rottura è che le proprietà meccaniche di quest'ultimo sono state modificate dall'evento, e quel filo necessita di un particolare livello di attenzione per i tagli successivi. Imporre la sostituzione immediata, a parere dello scrivente, potrebbe essere dal punto di vista economico poco proficuo, tuttavia la vita utile del filo diamantato permane irrimediabilmente alterata. Infatti, a seguito dello strappo, soprattutto per quanto riguarda i fili ricoperti, si sviluppano nello stesso piegature che ne modificano le proprietà flessionali. Queste (che in gergo cantieristico sono definite "torte"), derivano dalla modificazione irrimediabile delle componenti del filo come molle, distanziali e fune interna; si riporta a tal proposito un esempio in Figura 4.14 a, b.

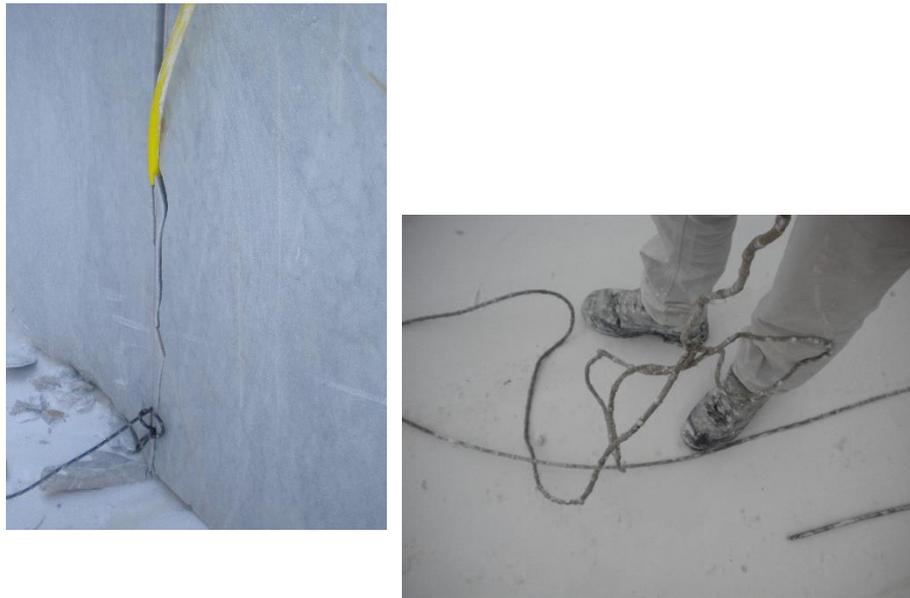


Figura 4.14 a, b: Condizioni filo diamantato coperto a seguito di strappo

Risulta pertanto ovvio che le caratteristiche di taglio di un filo diamantato come quello soprastante siano diverse da quelle di un filo nuovo o per lo meno avente specifiche tecniche longitudinali costanti. Sebbene, come detto, una sostituzione immediata possa essere controproducente dal punto di vista economico, dal punto di vista della sicurezza una situazione del genere va monitorata con molta più attenzione rispetto alle normali condizioni di taglio.

#### 4.5 TAGLI OBLIQUI E VERSO ROVESCIO

In cava talvolta si verificano situazioni di taglio di una certa complessità, come ad esempio la riquadratura di un blocco particolarmente informe, per cui il taglio debba essere gestito dai cavaatori in maniera differente rispetto a situazioni “standard”. Tali condizioni sono senza dubbio quelle di maggior pericolosità rilevate in cava a causa, appunto, della diversità della tipologia di taglio, in particolar modo in quanto possono non essere studiate a dovere in termini di valutazione dei rischi e che quindi potrebbero presentare necessità differenti dal punto di vista delle misure di prevenzione e/o protezione da attuare.

I cavaatori sono infatti chiamati, spesso, ad eseguire tagli di riquadratura tali da permettere l'ottenimento di blocchi "vendibili" ossia gestiti, in fase di taglio, in maniera tale che l'acquirente sia facilitato nel posizionamento di questi ultimi all'interno dei telai per la produzione di lastre. Tale requisito, prettamente di carattere economico, rende necessario il posizionamento della tagliatrice a filo diamantato in configurazioni molteplici a seconda della tipologia di riquadratura da effettuare. Nei casi di maggior rischio la configurazione della macchina è obliqua (Figura 4.15) e tale da creare una superficie di appoggio del blocco (in gergo di cava detto appunto "piano", mentre le restanti superfici sono dette "secondo" e "contro") che, nell'ottica della successiva creazione di lastre, escluda imperfezioni o impurezze del marmo.



*Figura 4.15: Configurazione di taglio obliqua*

Come si evince dalla fotografia di Figura 4.15 (effettuata dallo scrivente in totale sicurezza) tali condizioni di taglio sono più rischiose rispetto ad una riquadratura "standard" e come tali andrebbero studiate in campo sicuristico. Si nota come il telo di protezione in tessuto, pur essendo solidale alla puleggia motrice, tenda ad inflettersi diminuendo la superficie entro la quale il filo diamantato, in caso di strappo, dovrebbe arrestare la sua corsa o, nel caso di proiezioni di elementi costituenti il filo, di intercettazione di questi ultimi. Partendo dal presupposto che riquadrature di questo tipo sono assolutamente inevitabili in quanto le imperfezioni da gestire nel marmo sono di varia tipologia, occorrerebbe definire particolari regolamentazioni in termini di analisi di rischio per stabilire opportune procedure di gestione di tali criticità.

La situazione appena descritta raggiunge un livello di rischio massimo, a parere dello scrivente, qualora si presenti la necessità di portare a compimento il taglio mediante verso di rotazione del filo diamantato “rovescio”, ossia quando il filo diamantato si avvolge sulla puleggia motrice dalla zona inferiore di quest'ultima (Figura 4.16).

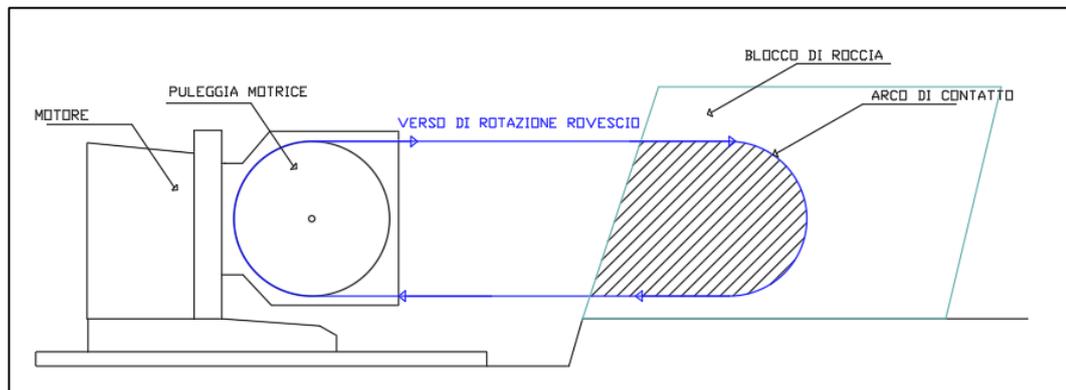


Figura 4.16: Verso di rotazione macchina "rovescio"

In condizioni di taglio “standard” si ha infatti il verso di rotazione in direzione opposta ed in caso di strappo ciò è fondamentale in quanto tutte le misure protettive sono state studiate e progettate nella misura in cui il filo tenda a proseguire nella direzione tangente al verso di rotazione. Risulta peraltro ovvio che, avvalendosi dello stesso principio, in configurazione di taglio rovescio, le proiezioni sono difficilmente controllabili e, in caso di possibile di rottura in zona di monte, le perline avrebbero un raggio d'azione potenzialmente dell'intera cava, qualora non venissero intercettate dal nastro protettivo.

#### 4.6 COSTI DEL FILO DIAMANTATO

Un aspetto di non secondaria importanza all'interno della gestione di una cava e nel quale possono essere riscontrati anche aspetti connessi con la sicurezza, sono sicuramente i costi del filo diamantato utilizzato per i tagli. Se da un lato infatti, dal punto di vista dell'economia di cava, sarebbe auspicabile limitare al minimo le sostituzioni del filo stesso, dall'altro ciò implicherebbe una drastica diminuzione delle condizioni di sicurezza degli operatori che, al fine di mantenere una resa alta in termini di estensione areale tagliata, potrebbero ritardarne la sostituzione

incrementando il rischio di strappo per usura. Al fine di comprendere quanto possa incidere il costo del filo diamantato nella gestione di una cava come Gioia (estensione coltivata di 50.000 m<sup>2</sup>), sono state effettuate dallo scrivente alcune indagini sia presso i produttori che nell’officina di cava dove avviene lo smistamento dei fili per i vari fronti di coltivazione. Non si riporteranno nel seguito indicazioni di prezzo dettagliate in quanto i vari produttori, per una stessa tipologia di filo, hanno richieste differenti. Si riporteranno tuttavia dei valori indicativi ai fini di comprendere l’ordine di grandezza di quanto il solo filo diamantato incida sul “sistema cava”.

Si riportano in Tabella 4.1 i valori medi di prezzo delle varie tipologie di filo diamantato.

	<b>FILO TRADIZIONALE [€/m]</b>	<b>FILO COPERTO [€/m]</b>	<b>FILO COPERTO RIGENERATO [€/m]</b>
<b>PERLA ELETTRODEPOSTA</b>	42 ÷ 45	≅ 45	≅ 10
<b>PERLA SINTERIZZATA</b>	60 ÷ 62	≅ 54	≅ 20

Tabella 4.1: Prezzi medi del filo diamantato

Il prezzo delle perline diamantate singole è di 1.50 € per quanto riguarda la perlina elettrodeposta, mentre di 2.15 € per quanto riguarda la perlina sinterizzata.

Per una produzione di centinaia di migliaia di t/anno di materiale estratto, con stese di filo per i tagli di bancate che raggiungono anche i 90 m, è indicativo osservare quanto il solo costo del filo possa influire sull’economia di cava. Tenendo presente ciò, risulta altrettanto importante osservare che un discorso meramente economico non può e non deve essere l’unico spunto di riflessione riguardo alla bontà di un filo diamantato che debba essere sostituito.

#### 4.7 BANCA DATI DI CAVA

Un elemento di rilevante importanza dal punto di vista sicuristico, sulla base del quale sarebbe possibile effettuare valutazioni statistiche significative sulle problematiche proprie del sistema “taglio in cava”, è sicuramente la messa a punto

di una banca dati di monitoraggio dei tagli. Tale criticità si è palesata allo scrivente durante l'esperienza in cava e precisamente durante la richiesta indicativa a svariati operatori dei valori medi di durata temporale di un filo diamantato. Posto il fatto che è totalmente impossibile rispondere ad un quesito del genere in termini assoluti, ciò che ne è emerso è stato estremamente disparato. La problematica è stata manifestata successivamente sia dai produttori di filo diamantato, che dai produttori di macchine tagliatrici da cava i quali per uno stesso filo diamantato ed a parità di macchina utilizzata e tipologia di taglio, si trovano a giustificare rese di filo (in termini di metri quadrati di taglio effettuato) che variano anche più del 100%. Sebbene possa sembrare un elemento di secondaria importanza in quanto la gestione del filo potrebbe continuare ad essere effettuata a vista dagli operatori, ciò denota la mancanza di una componentistica fondamentale propria dell'ingegneria della sicurezza: la sistematizzazione e registrazione degli eventi cosiddetti *near misses*. Viene definito *near miss* un incidente mancato, ovvero un qualsiasi evento che in circostanze avverse potrebbe determinare un incidente o infortunio. Un'analisi, in termini securistici, di tali eventi può essere ovviamente estesa a tutte le procedure che comportino rischi in cava, tuttavia in tale contesto se ne analizzano solamente gli aspetti relativi al taglio mediante macchina tagliatrice a filo. Ciò che accade di norma in tutte le cave, per quanto appreso dagli operatori, è ragionevolmente riassumibile nel concetto di "è andata bene". Nei casi di strappo del filo diamantato, per i quali nessun operatore ha subito danni, ciò che accade è sostanzialmente un rifacimento della giunzione (per quanto osservato, il punto di rottura più frequente) ed un riavvio del taglio. Non esiste al momento memoria di casistiche registrate e sistematizzate di eventi potenzialmente dannosi in cava. La creazione di un database di questa tipologia, condivisa con i produttori di filo diamantato e macchine tagliatrici, potrebbe portare ad un incremento delle misure di prevenzione da sviluppare per il taglio del lapideo in generale, in quanto potrebbe essere valutata una progettazione degli elementi coinvolti nel taglio del marmo in termini securistici che parta dalle case costruttrici e non da misure di ripiego a seguito del verificarsi di eventi di infortunio. Si potrebbero ad esempio catalogare strappi avvenuti per cause diverse nella giunta per fatica flessionale, o lontano da essa a causa dell'usura eccessiva o dall'erronea adduzione di acqua di raffreddamento. Si potrebbe quindi effettuare un'opera di formazione, informazione, addestramento per errori scaturiti dalla mancanza di esperienza

(pensando ai cavaatori più giovani), qualora la causa possa essere ricondotta ad una errata pratica in cava; oppure sarebbe possibile avere dalle aziende produttrici dei prodotti progettati in base alle esigenze reali di cava e pensati per le “reali” criticità che si sviluppano sul campo durante la pratica lavorativa. Dal punto di vista pratico, occorrerebbe fornire ai cavaatori uno schema da compilare anonimamente (in modo da non creare l'effetto opposto a quello auspicato, ossia una sorta di competizione di chi usa di più un filo diamantato) analogo a quello riportato in Tabella 4.2:

A cadenza settimanale occorrerebbe inserire tali dati in un database ed in base a questi valutare tutte le possibili casistiche di rischio inerenti il taglio.

È chiaro che ciò rappresenterebbe una vera e propria rivoluzione, anche culturale, nell'industria del taglio dei lapidei ed è altrettanto vero che quando lo scrivente ha illustrato questa idea ad alcuni operatori questi non l'hanno accolta benevolmente, ma soprattutto come una perdita di tempo; nonostante questo approccio al problema, a parere dello scrivente, possa veramente costituire un passo avanti nella prevenzione dei rischi in cava e nell'industria estrattiva in generale.

TIPOLOGIA FILO		TIPOLOGIA DI MACCHINA		LUNGHEZZA FILO USATO	
TRDIZIONALE	PLASTIFICATO	.....		.....	

TAGLIO N°	DATA		TIPO TAGLIO P/M	ORE MACCHINA		TOT ORE	LARGHEZZA	LUNGHEZZA	TOT m2	m2/h	STRAPPO?		RIFACIEMTO GIUNTA?	
	Inizio	Fine		Inizio	Fine						NO	SI	NO	SI
1														
2														
3														
...														

Tabella 4.2: Esempio di monitoraggio tagli (su consiglio Mega Diamant S.r.l)

## CAPITOLO 5 – PROVE DI LABORATORIO

Al fine di ottenere un quadro completo circa gli utensili utilizzati per il taglio e la riquadratura del marmo in cava, sono stati effettuati alcuni test di resistenza in laboratorio. Questi ultimi sono stati impostati tenendo presente la già citata *Norma europea UNI EN 13236:2016*. Quest'ultima impone, come menzionato in precedenza, alcune restrizioni che riguardano:

- MORSETTI DI GIUNZIONE: la massima tensione registrata all'atto dello sfilamento ha raggiunto almeno il 30% della capacità di carico del cavo di supporto.
- PRESSATORI: la massima tensione registrata all'atto dello sfilamento ha raggiunto almeno 1/12 della capacità di carico del cavo di supporto senza muoversi.

Poiché il cavo di supporto fornito, di diametro 5 mm e formazione 6 x 7 + 19, possiede una capacità di carico certificata di 1800 kg circa, i valori limite di resistenza sono stati definiti come: 540 kg per quanto riguarda la resistenza a sfilamento delle giunzioni e 150 kg per quanto riguarda i pressatori.

### 5.1 STRUMENAZIONE UTILIZZATA

Il laboratorio presso il quale sono state condotte le prove di resistenza a trazione di pressatori e morsetti di giunzione (*MarmoTest s.a.s*) ha messo a disposizione dello scrivente le seguenti attrezzature:

- PRESSA IDRAULICA: modello MT tipo BP, avente portata massima 3 t.  
La componentistica principale è quella di una generica pressa idraulica; si

ha infatti un serbatoio d'olio, una pompa idraulica, un motore elettrico di azionamento della pompa, una valvola a due vie per la gestione dei flussi di olio nel pistone idraulico a doppio effetto (eseguiti mediante tubi con innesti a baionetta) ed uno stelo mediante il quale le forze vengono trasmesse all'esterno. L'azionamento è comandato elettronicamente da un sistema software il quale a sua volta controlla le valvole di immissione o espulsione del fluido idraulico dal pistone. Si riporta in Figura 5.1 la pressa idraulica utilizzata durante le prove di trazione in laboratorio.



Figura 5.1: Pressa idraulica

- CELLA DI CARICO A TRAZIONE E COMPRESSIONE: produttore *Allemano* serie TCE in acciaio inox, rientra nei requisiti della norma OIML R60 (Organizzazione Internazionale di Metrologia Legale) la quale stabilisce tutti i test che le celle di carico devono superare per rientrare in determinate classi di precisione. Il carico nominale massimo di lettura è di 2.5 t, mentre l'uscita in termini di tensione elettrica è di 2 mV/V. La cella è inoltre certificata ATEX (zona 1 e 21), per quanto riguarda il rischio correlato all'utilizzo di apparecchiature in ambiente esplosivo (gas e poveri) e possiede un livello di protezione IP67 contro l'ingresso di polveri e liquidi. L'errore di misura certificato è di  $\pm 0.03\%$ , ossia 0.75kg. Si riporta in figura 5.2 la cella di carico utilizzata durante le prove di trazione in laboratorio.



Figura 5.2: Cella di carico a compressione e trazione

- SISTEMA DI ACQUISIZIONE: produttore *National Instruments*, il sistema di acquisizione in tempo reale si compone, dal punto di vista hardware, principalmente di un controller su piattaforma CompactRIO, installato su apposito chassis, il quale permette di gestire la temporizzazione, la sincronizzazione e il trasferimento dati tra un computer (nel caso del laboratorio dove sono state effettuate le prove, esterno) e i moduli I/O (fino a un massimo di 14). Tali moduli (C Series) forniscono misure ad elevata accuratezza per applicazioni di acquisizione dati avanzata. Si riporta in Figura 5.3 il sistema di acquisizione utilizzato durante le prove di trazione in laboratorio.

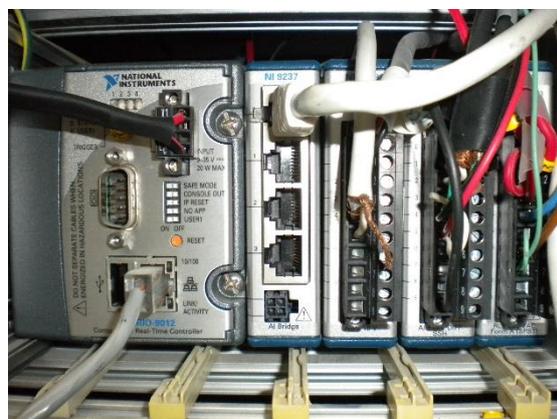


Figura 5.3: Sistema di acquisizione dati

Dal punto di vista software, il sistema è gestito mediante programmazione in ambiente LabVIEW. L'interfaccia finale che ne deriva e con la quale sono stati effettuati i test in laboratorio è presente in Figura 5.4.



Figura 5.4: Interfaccia grafica sistema di acquisizione

## 5.2 MATERIALE UTILIZZATO

Tutti i materiali testati con la strumentazione precedentemente descritta sono stati forniti dall'azienda *Mega Diamant S.r.l.* Si elencano i più rilevanti.

- PRESSA IDRAULICA 5t: produttore *Cembre*, modello HT 45. Si tratta di una pressa oleodinamica ad azionamento manuale adatta all'installazione di connettori (come ad esempio i morsetti di giunzione) mediante compressione; la forza sviluppata è pari a 50 kN, mentre la pressione nominale è di 600 bar. Si riporta in Figura 5.5 la pressa utilizzata per la preparazione dei provini per effettuare i test di laboratorio.



Figura 5.5: Pressa idraulica manuale 5t

- TRANCE: produttore *Felco*, modello C9, visibili in Figura 5.6.



Figura 5.6: Trancia

- CAVO DI ACCIAIO: sono stati forniti 50 m di cavo di acciaio zincato di formazione 6 x 7 + 19 di diversi produttori. In tutti i casi la resistenza a trazione è stata certificata mediante schede tecniche (allegate), attestandosi su valori compresi tra 1770 e 1850 kg. Il contenuto in carbonio è stato certificato in una forbice di valori compresi tra 0.40 e 0.72%. In Figura 5.7 è presente uno spezzone del cavo fornito.



Figura 5.7: Cavo di acciaio zincato

- GIUNZIONI E PRESSATORI: sono state fornite diverse tipologie di giunzioni: in particolare, due tipologie di morsetti a “tubetto” in acciaio di dimensioni (in mm) rispettivamente 9 x 20 e 9 x 25, essendo la prima cifra riferita al diametro esterno e la seconda riferita alla lunghezza del morsetto di giunzione, una tipologia di morsetti “avvitabili” in acciaio di dimensioni (in mm) 9 x 25 ed infine una tipologia di morsetti a “tubetto” in rame di dimensioni (in mm) 9 x 30. Si riportano in Figura 5.8 alcune delle giunzioni utilizzate durante le prove in laboratorio.



Figura 5.8: Giunzioni

### 5.3 MODALITÀ OPERATIVE

Poiché i cavi, e le funi in generale, possiedono unicamente resistenza a trazione, il principale obiettivo per una corretta esecuzione dei test di sfilamento di giunzioni e pressatori è stato quello di conferire al cavo d'acciaio la totale verticalità nel senso di applicazione della forza di trazione trasmessa dalla pressa idraulica. I sistemi di ritenuta del cavo sono stati gestiti in maniera duplice per quanto riguarda la connessione filo/pressa e filo/elemento di ritenuta lato piastra e differente per quanto riguarda le prove eseguite sulle giunzioni e quelle eseguite sui pressatori.

- *Pressatori*: concordemente con UNI EN 13236:2016 le prove sui pressatori sono state eseguite inducendone lo sfilamento tramite l'applicazione di una rampa lineare di carico uniassiale di trazione. Il filo è stato fissato, lato pressa, mediante un gancio direttamente collegato alla cella di carico e quindi alla pressa tramite connessioni filettate, mentre la parte opposta, lato piastra, è stata fissata mediante un meccanismo di ritenuta appositamente tornito e fornito allo scrivente dal laboratorio in cui sono stati effettuati i test. I pressatori sono stati pressati con la pressa oleodinamica manuale precedentemente descritta. Si riportano, in Figura 5.9a, 5.9b, 5.9c, i sistemi di ritenuta descritti.

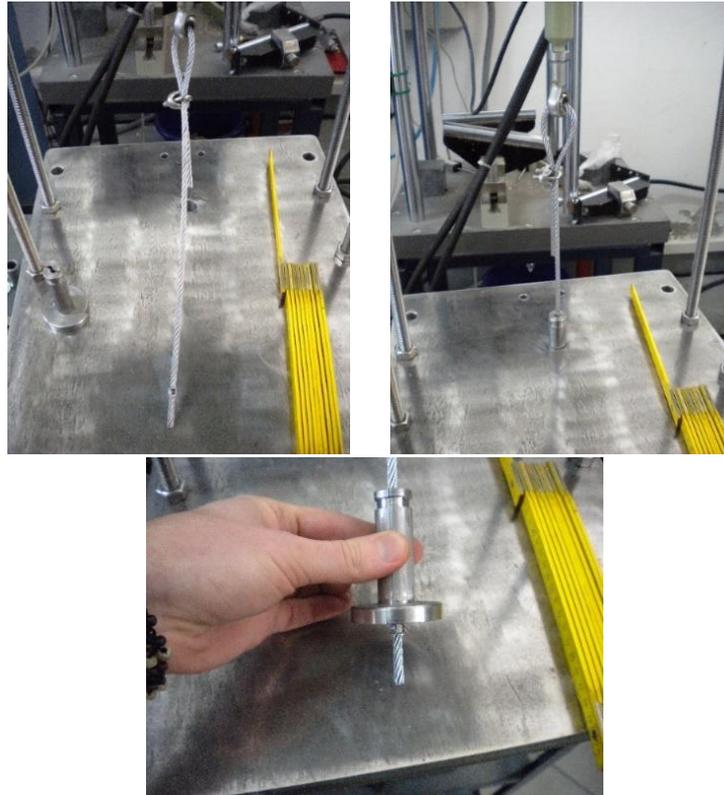


Figura 5.9a, b, c: Configurazione per prove su pressatori

- *Morsetti di giunzione:* la prova di sfilamento è stata condotta in configurazione simile alla precedente, per quanto riguarda il fissaggio del filo lato pressa, ossia mediante un gancio direttamente collegato alla cella di carico e quindi alla pressa tramite connessioni filettate. Per quanto riguarda la ritenuta, lato piastra, il filo è stato interposto ad un dispositivo di bloccaggio tale da impedirne lo sganciamento in fase di test e atto a permettere la trasmissione delle forze interamente nel punto di giunzione. Le giunzioni sono state pressate mediante la pressa idraulica manuale precedentemente descritta. Si riportano, in Figura 5.10a, 5.10b, i sistemi di ritenuta descritti.

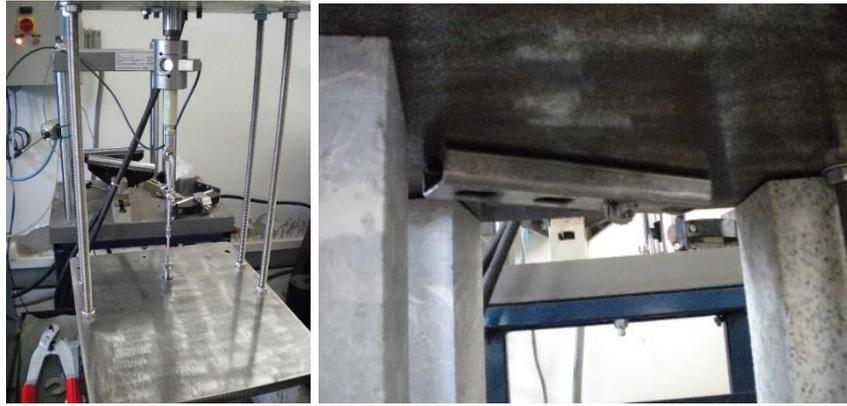


Figura 5.10a, b: Configurazione per prove su giunzioni

## 5.4 TEST SUI PRESSATORI

Sono stati effettuati 15 test di sfilamento sui pressatori impostando un tempo di acquisizione dell'elaboratore di 10 ms. La Norma Europea UNI EN 13236:2016 impone che il valore tensionale di picco sia da attribuirsi al massimo valore di resistenza raggiunto prima dello spostamento assiale del pressatore di 2.5 cm dalla sede di pressatura. Il valore minimo imposto dalla Norma equivale, come osservato in precedenza e per quanto riguarda i materiali utilizzati per le prove, ad un carico massimo di 150 kg. I dati sperimentali hanno tuttavia permesso allo scrivente di verificare come tale valore sia ampiamente superato, con i materiali testati ed utilizzando la strumentazione, nuova, messa a disposizione e non soggetta a usura (elemento di possibile discrepanza con l'ambiente riscontrato in cava). Si riporta in Figura 5.11a, 5.11b la configurazione assunta dal pressatore prima e dopo la prova di sfilamento.



Figura 5.11a, 5.11b: Posizione del pressatore prima (a sinistra) e dopo (a destra) la prova di sfilamento

I risultati ottenuti dalle prove sono consultabili in maniera completa in Allegato 2; si riportano in tale contesto, in Figura 5.12, i valori di resistenza di picco ottenuti, confrontandoli con quanto prescritto dalla Norma UNI di riferimento.

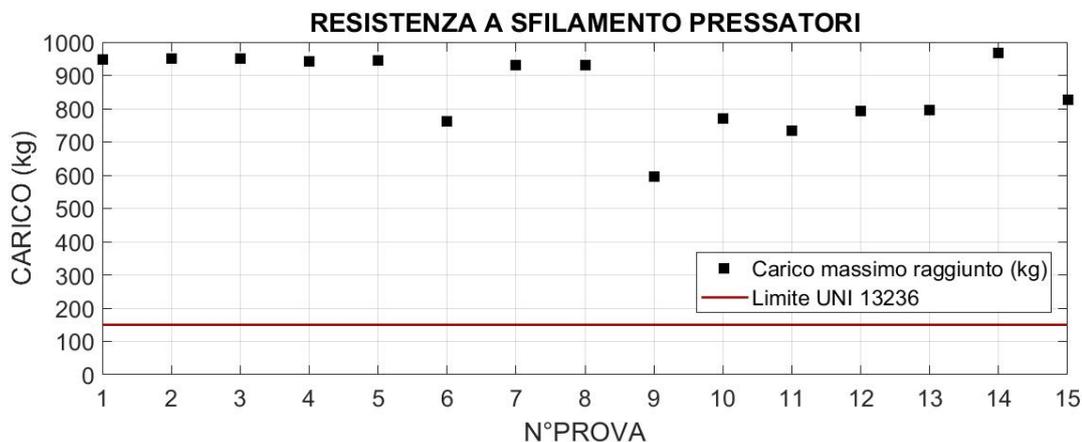


Figura 5.12: Resistenze di picco dei pressatori, pressati con pressa nuova

Come è possibile osservare (Figura 5.12), i valori di resistenza a sfilamento dei pressatori, utilizzando materiali e strumentazioni nuove hanno soddisfatto, durante tutte le prove eseguite, il minimo carico richiesto dalla Norma UNI 13236:2016.

Al fine di avere un quadro completo ed effettuare i test di sfilamento in una configurazione il più possibile simile a quanto accade in cava, sono stati effettuati alcuni test (in modalità del tutto analoga a quanto appena descritto) utilizzando, per la pressatura del fermo, una pressa idraulica manuale usata in cava (Figura 5.13), per valutarne l'eventuale differenza di comportamento a sfilamento a seguito dell'utilizzo di strumentazione soggetta a sporcizia ed usura (elementi che in laboratorio non inficiavano la prova).



Figura 5.13: Pressa idraulica manuale di cava

Sono stati testati 6 fermi, pressati con pressa manuale revisionata circa 3 mesi antecedenti ai test (indicativamente 200 pressate) e 6 fermi pressati con pressa manuale revisionata circa 4 mesi antecedenti ai test (indicativamente 250 pressate). I risultati ottenuti sono visibili in Figura 5.14a, 5.14b ed in maniera completa in Allegato 3.

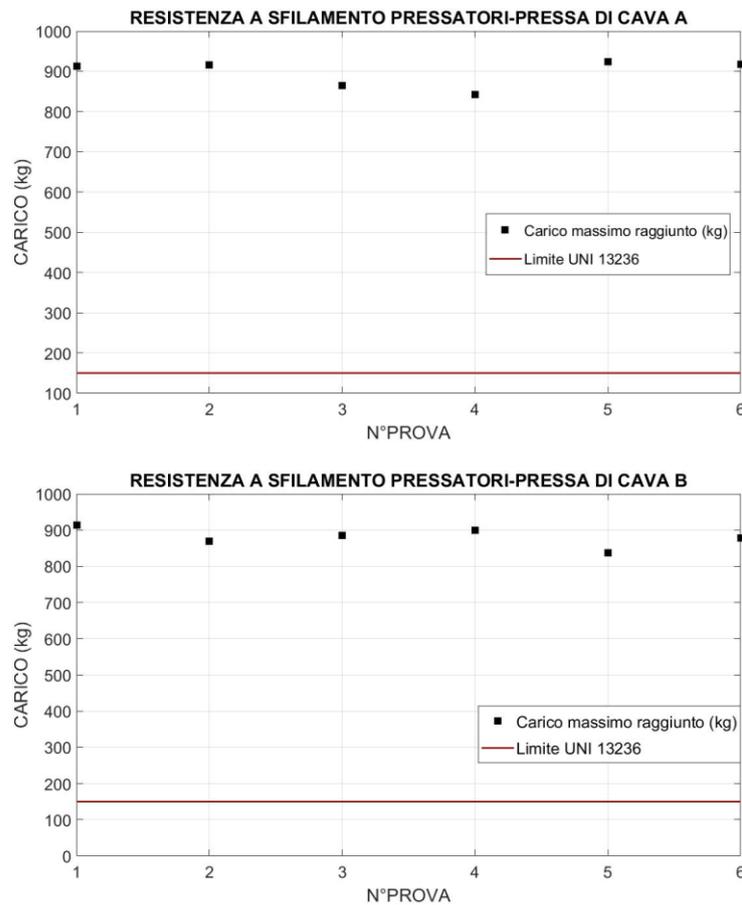


Figura 5.14a, b: Resistenza a sfilamento di picco pressatori, pressati con pressa di cava

Come si osserva, i valori di picco di resistenza a sfilamento dei pressatori ottenuti si attestano su carichi pressoché simili ai risultati precedenti, ottenuti con una pressa idraulica manuale nuova. Lo scarso numero di prove effettuate non permette di poter asserire con certezza che le presse idrauliche manuali da cava usate abbiano lo stesso rendimento di quelle nuove. Tuttavia, è possibile asserire che, indicativamente, qualora la manutenzione delle presse in cava venga fatta in maniera costante e attenta, il rendimento della pressatura mantenga dei buoni livelli prestazionali.

## 5.5 TEST SUI MORSETTI DI GIUNZIONE

Sono state testate diverse tipologie di morsetti di giunzione mediante prove di sfilamento. Ogni prova è stata effettuata in numero di 15 unità (ad eccezione delle giunzioni in acciaio avvitabili, molto utilizzate nel taglio di riquadratura dei blocchi, per le quali si aveva una disponibilità di 7 provini), suddividendo i morsetti di giunzione per composizione chimica. Il tempo di acquisizione dell'elaboratore è stato fissato a 10 ms; le chiusure delle giunzioni sono state fatte mediante la pressa idraulica manuale di laboratorio, precedentemente descritta. La Norma Europea UNI EN 13236:2016 impone che il valore tensionale di picco minimo che le giunzioni devono poter rispettare sia da attribuirsi al massimo valore di resistenza raggiunto durante la prova di sfilamento e che questo valore non sia inferiore al 30% della resistenza uniassiale del cavo costituente l'anima del filo diamantato. Il valore minimo imposto dalla Norma equivale, come asserito in precedenza e per quanto riguarda i materiali utilizzati per le prove, ad un carico di 540 kg. Si riporta in Figura 5.15a, 5.15b la configurazione assunta dal morsetto di giunzione (nel caso in figura, in acciaio) prima e dopo la prova di sfilamento.

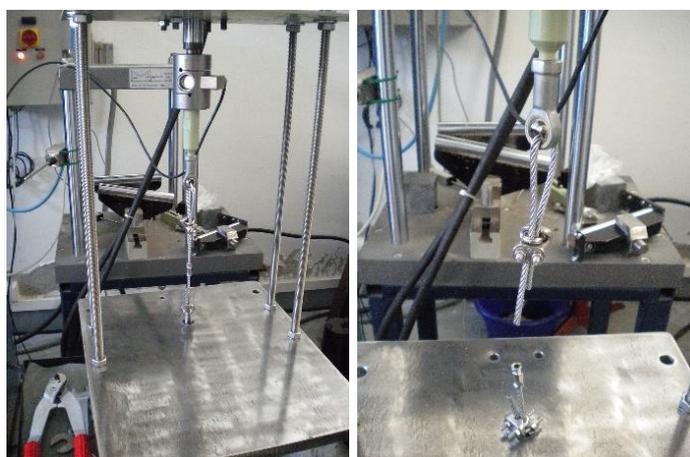


Figura 5.15a, 5.15b: Configurazione della giunzione prima (a sinistra) e dopo (a destra) la prova di sfilamento

### 5.5.1 Giunzioni in acciaio 9x20 mm

I risultati ottenuti durante le prove di sfilamento delle giunzioni in acciaio 9x20 mm sono consultabili in maniera completa in Allegato 4. Si riportano in tale contesto,

in Figura 5.16, i valori di resistenza di picco ottenuti, confrontandoli con quanto prescritto dalla Norma UNI di riferimento.

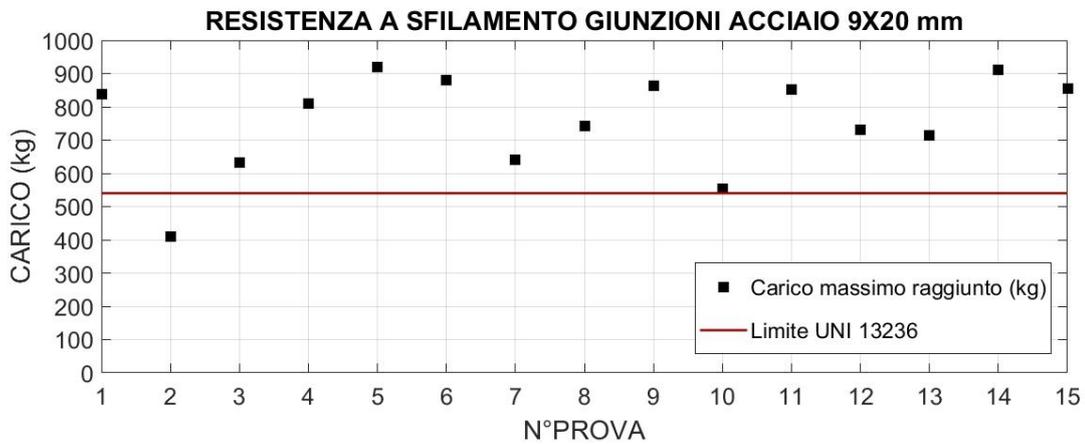


Figura 5.16: Resistenza a sfilamento di picco delle giunzioni in acciaio 9x20 mm, pressate con pressa nuova

Come si può osservare, i valori ottenuti si sono attestati in maniera preponderante al di sopra di quanto prescritto dalla Norma UNI 13236:2016. In un solo caso (prova n°2) la prescrizione non è stata soddisfatta. Tale elemento, più che un fatto di carenza di omogeneità dei materiali testati, è valutabile in termini di esecuzione, da parte dello scrivente, della pressatura mediante pressa idraulica manuale; sebbene le prove siano state eseguite cercando di mantenere la totale omogeneità di esecuzione per tutti i campioni testati, il provino n°2, osservato dopo la rottura ha evidenziato una zona di pressatura di circa 1 mm decentrata rispetto al punto in cui viene normalmente eseguita in cava. Tale elemento è da considerarsi importante nell’ottica della enorme differenza prestazionale che offre la giunzione a seguito di una errata pressatura, in termini di posizionamento della pressa idraulica. La formazione dei cavatori più giovani non deve quindi prescindere, come per altro avviene per quanto osservato, anche da aspetti che nella pratica lavorativa di cava potrebbero sembrare marginali, quali la pressatura di un morsetto di giunzione.

### 5.5.2 Giunzioni in acciaio 9x25 mm

I risultati ottenuti durante le prove di sfilamento delle giunzioni in acciaio 9x25 (mm) sono consultabili in maniera completa in Allegato 5. Si riportano in tale

contesto, in Figura 5.17, i valori di resistenza di picco ottenuti, confrontandoli con quanto prescritto dalla Norma UNI di riferimento.

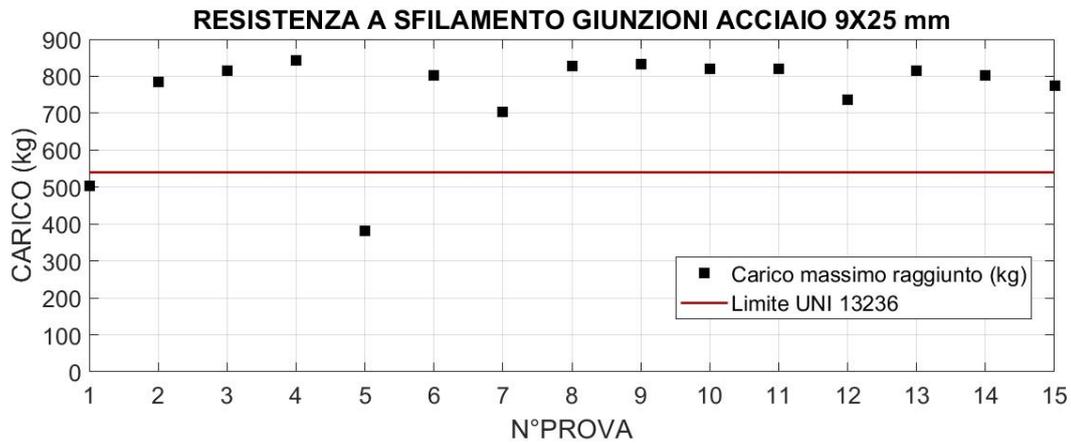


Figura 5.17: Resistenza a sfilamento di picco delle giunzioni in acciaio 9x25 mm, pressate con pressa nuova

### 5.5.3 Giunzioni in rame 9x30 mm

I risultati ottenuti durante le prove di sfilamento delle giunzioni in rame 9 x 30 mm sono consultabili in maniera completa in Allegato 6. Si riportano in tale contesto, in Figura 5.18, i valori di resistenza di picco ottenuti, confrontandoli con quanto prescritto dalla Norma UNI di riferimento.

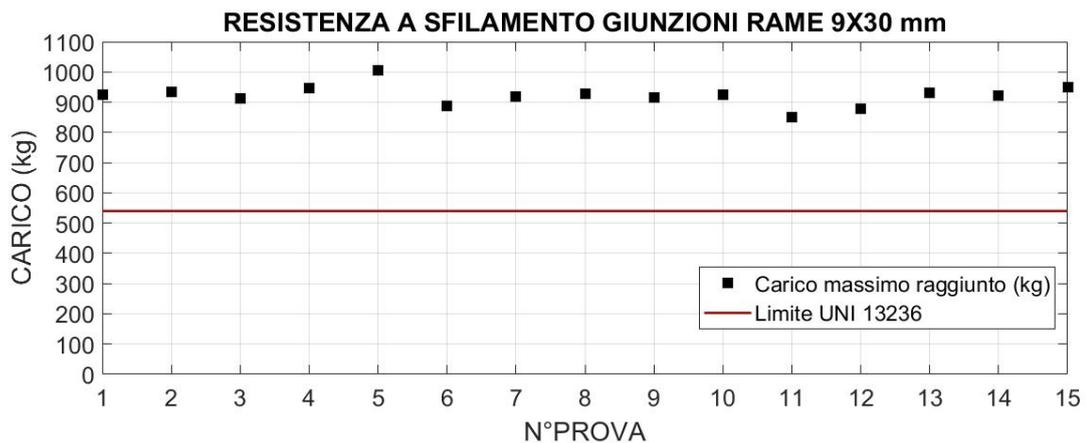


Figura 5.18: Resistenza a sfilamento di picco delle giunzioni in rame 9x30 mm, pressate con pressa nuova

#### 5.5.4 Giunzioni in acciaio “avvitabili” 9x25 mm

I risultati ottenuti durante le prove di sfilamento delle giunzioni in acciaio “avvitabili” 9x25 mm sono consultabili in maniera completa Allegato 7. Si riportano in tale contesto, in Figura 5.19, i valori di resistenza di picco ottenuti, confrontandoli con quanto prescritto dalla Norma UNI di riferimento.

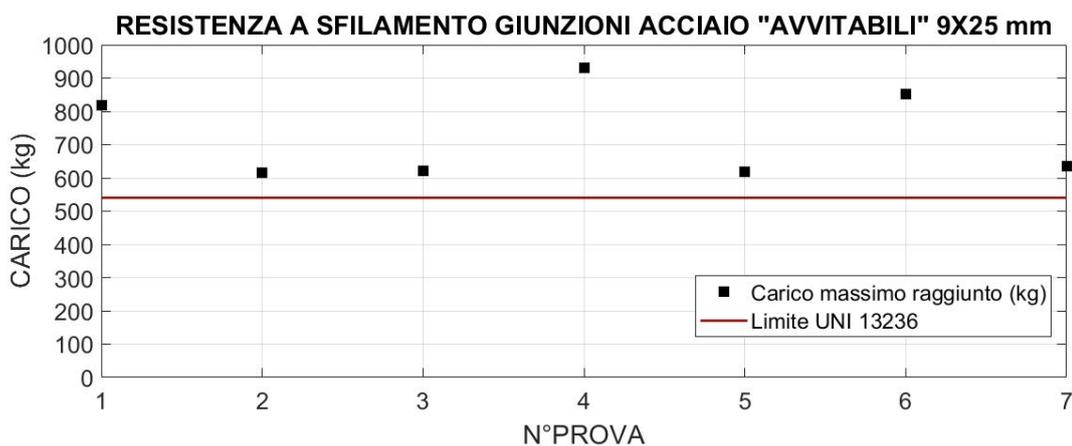


Figura 5.19: Resistenza a sfilamento di picco delle giunzioni in acciaio “avvitabili” 9x25 mm, pressate con pressa nuova

#### 5.5.5 Giunzioni pressate con doppia pressatura

Talvolta in cava, qualora vengano utilizzati i morsetti di giunzione di misure 9x25 mm in acciaio o 9x30 mm in rame (quelli più “lunghi”, tra quelli analizzati finora), accade che, essendo più ampia la superficie della giunzione “pressabile” si effettuino più di una pressatura simultanea per incrementare, secondo alcuni operatori, la resistenza a sfilamento della giunzione; è possibile osservare quanto appena asserito in Figura 5.20.



Figura 5.20: Giunzione in rame sottoposta a doppia pressatura

A scopo conoscitivo, sono state effettuate delle prove di sfilamento mediante l'applicazione di carico uniassiale (del tutto analoghe in termini pratici a quelle precedentemente descritte) effettuando una doppia pressatura sui morsetti di giunzione mediante la pressa idraulica manuale di laboratorio precedentemente descritta (due per entrambi i capi di cavo pressato) per verificare, seppur in maniera statisticamente poco consistente, se questa prassi abbia un fondamento tecnico o se la sua attuazione non porti in realtà a dei miglioramenti in termini di resistenza a sfilamento del filo diamantato durante le operazioni di taglio.

Sono state testate in tale modalità di esecuzione: giunzioni di acciaio 9x25 mm e giunzioni in rame 9x30 mm.

I risultati ottenuti durante le prove di sfilamento delle giunzioni in acciaio 9x25 mm sono consultabili in maniera completa in Allegato 8. Si riportano in tale contesto, in Figura 5.21, i valori di resistenza di picco ottenuti, confrontandoli con quanto prescritto dalla Norma UNI di riferimento.

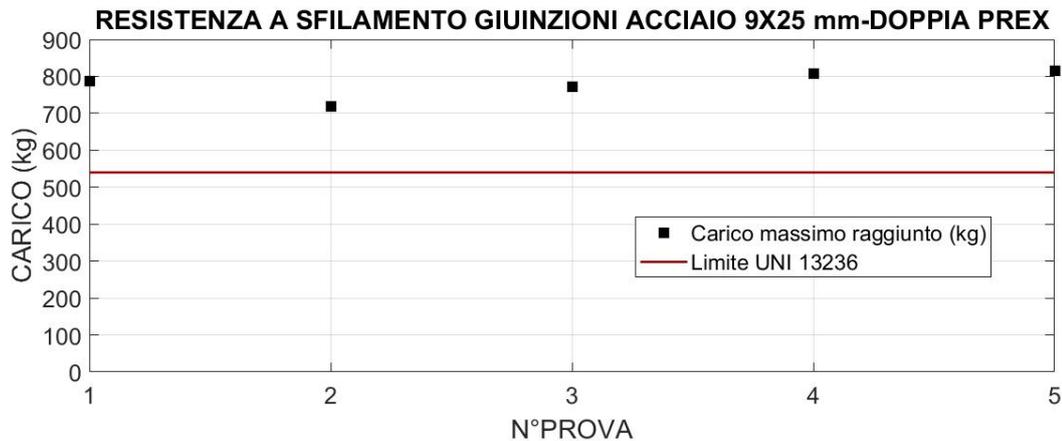


Figura 5.21: Resistenza a sfilamento di picco delle giunzioni in acciaio 9x25 mm a seguito di doppia pressatura

I risultati ottenuti durante le prove di sfilamento delle giunzioni in rame 9x30 mm sono consultabili in maniera completa in Allegato 9. Si riportano in tale contesto, in Figura 5.22, i valori di resistenza di picco ottenuti, confrontandoli con quanto prescritto dalla Norma UNI di riferimento.

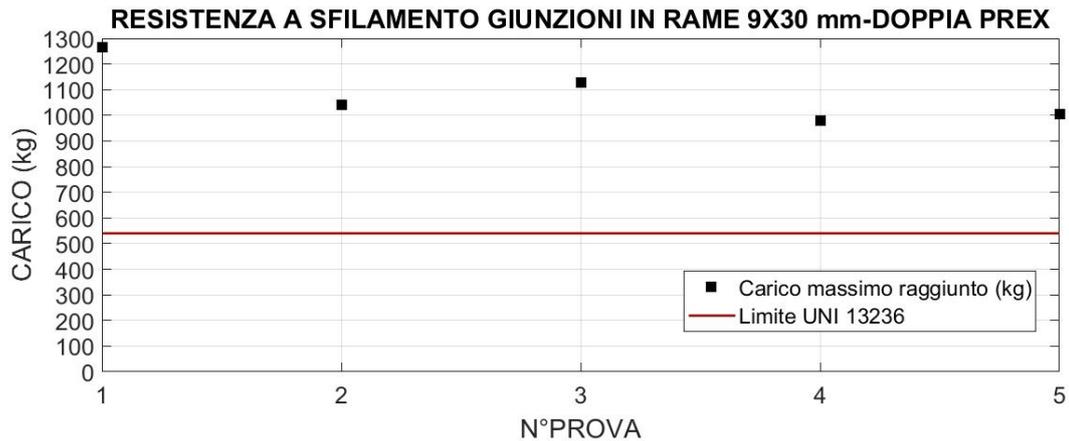


Figura 5.22: Resistenza a sfilamento di picco delle giunzioni in rame 9x30 mm a seguito di doppia pressatura

Come si osserva nelle figure precedenti, nonostante vengano effettuate più pressature sui morsetti di giunzione, i valori di resistenza a sfilamento di picco rimangono mediamente gli stessi (nonostante il numero di campioni inferiore per test effettuati con doppia pressatura) per quanto riguarda le giunzioni in acciaio, mentre vengono incrementati, seppur di poco, per quanto riguarda le giunzioni in rame; tale elemento verrà meglio evidenziato nel seguito, in fase di analisi statistica dei risultati. Elemento da segnalare, inoltre, è che la giunzione in rame (prova n° 2) del test con doppia pressatura, ha ceduto di schianto prima dello sfilamento del cavo di acciaio. Si evidenzia tale situazione in Figura 5.23.

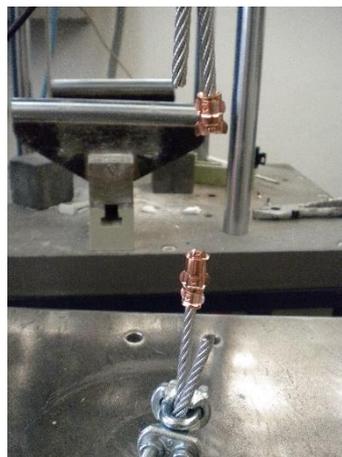


Figura 5.23: Cedimento di schianto giunzione in rame

La doppia pressatura ha evidentemente portato ad un incrudimento del metallo della giunzione, rendendolo più fragile.

## 5.6 TEST DI SFILAMENTO DELLE PERLINE

Pur non avendo disposizioni specifiche derivanti dalla Norma UNI EN 13236:2016, sono stati effettuati dei test di sfilamento delle perline diamantate su filo gommato e plastificato. Si è stato ritenuto necessario impostare tale tipologia di analisi in quanto, seppur come asserito più volte, il filo coperto tenda a espellere un numero limitato di componenti in caso di strappo, qualora si verifichi il colpo di frusta avviene ugualmente la proiezione di almeno una perlina diamantata, se non di un vero e proprio spezzone di filo. La pratica lavorativa di cava prevede che all’atto del rifacimento della giunzione, lavorando con filo coperto, si lasci in posto sul filo diamantato una porzione di polimero, utile alla protezione della prima perlina disponibile al taglio. La configurazione che si avrebbe, dopo il rifacimento della giunzione, è quindi: giunzione, porzione di polimero, perlina (Figura 5.24).



*Figura 5.24: giunzione nuova e porzione di copertura polimerica prima delle perline diamantate.*

Talvolta, tuttavia, la porzione polimerica di fissaggio della prima perlina diamantata, utile alla limitazione della proiezione della stessa in caso di strappo, viene eliminata, assumendo una configurazione, dopo il rifacimento della giunzione, del tipo: morsetto di giunzione, perlina (Figura 5.25). La giustificazione addotta dagli operatori di cava riguardo a tale pratica è la migliore “protezione” della giunzione all’usura per attrito, qualora questa sia affiancata direttamente dalla

perlina diamantata, e non da una porzione polimerica di diametro inferiore. Nel seguito verranno analizzate le resistenze a sfilamento delle perline diamantate nelle due configurazioni descritte.



Figura 5.25: giunzione senza porzione di copertura polimerica prima delle perline diamantate.

La configurazione operativa dei test è stata del tutto simile a quanto effettuato per le giunzioni ed i pressatori e la strumentazione utilizzata è la medesima. Il dispositivo di bloccaggio del filo diamantato è stato prodotto su misura per lo scopo (Figura 5.26).



Figura 5.26: Dispositivo di bloccaggio del filo coperto per prove sfilamento perline

5.6.1 Sfilamento perline configurazione gomma-perla-gomma

I risultati ottenuti durante le prove di sfilamento delle perline su filo gommato in configurazione gomma-perla-gomma sono consultabili in Allegato 10. Si riportano in tale contesto, in Figura 5.27, i valori di picco raggiunti all’atto dello sfilamento.

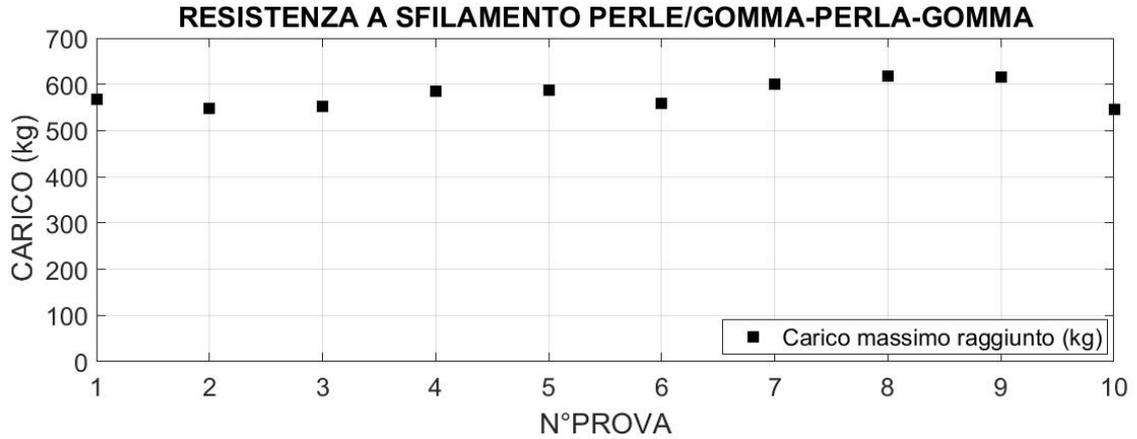


Figura 5.27: Resistenza a sfilamento di picco delle perline diamantate in configurazione gomma-perla-gomma

5.6.2 Sfilamento perline configurazione solo perla (filo gommato)

I risultati ottenuti durante le prove di sfilamento delle perline su filo gommato in configurazione solo perla sono consultabili in Allegato 11. Si riportano in tale contesto, in Figura 5.28, i valori di picco raggiunti all’atto dello sfilamento.

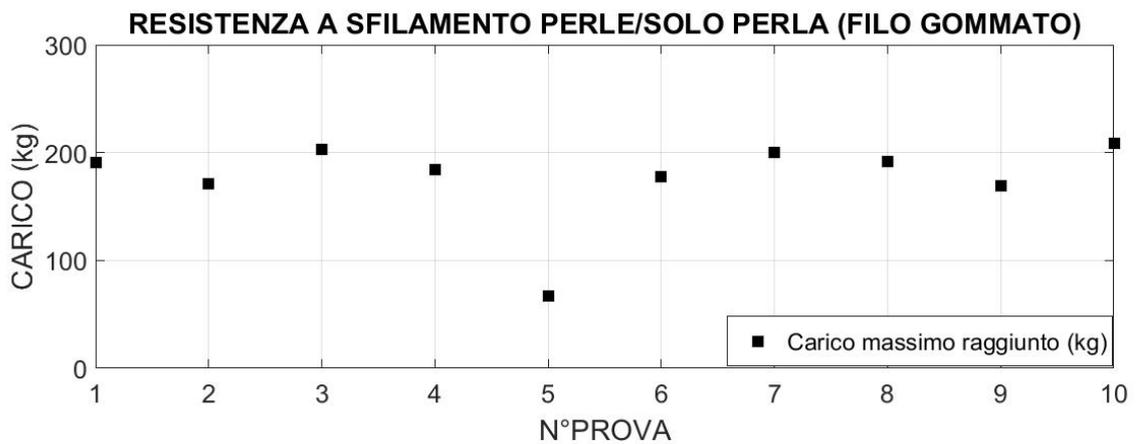


Figura 5.28: Resistenza a sfilamento di picco delle perline diamantate in configurazione solo perla (filo gommato)

### 5.6.3 Sfilamento perline configurazione plastica-perla-plastica

I risultati ottenuti durante le prove di sfilamento delle perline su filo plastificato in configurazione plastica-perla-plastica sono consultabili in Allegato 12. Si riportano in tale contesto, in Figura 5.29, i valori di picco raggiunti all'atto dello sfilamento.

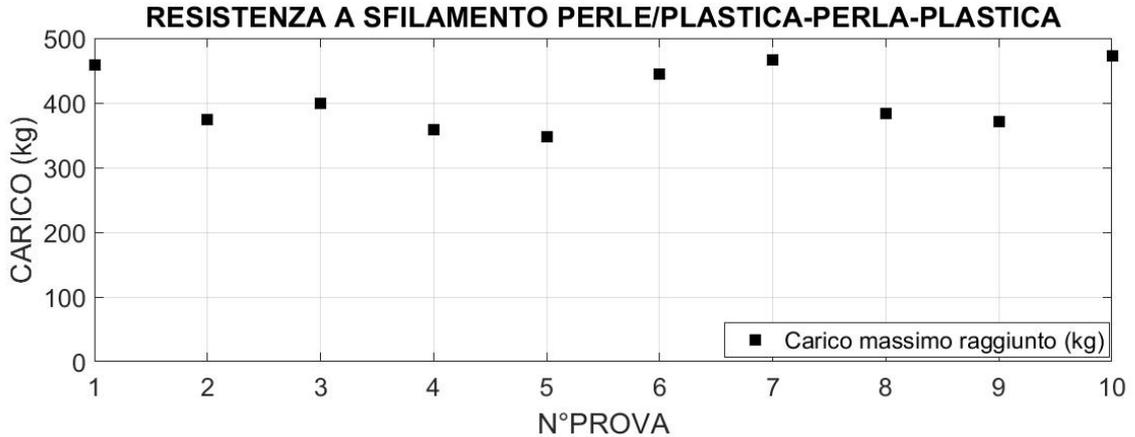


Figura 5.29: Resistenza a sfilamento di picco delle perline diamantate in configurazione plastica-perla-plastica

### 5.6.4 Sfilamento perline configurazione solo perla (filo plastificato)

I risultati ottenuti durante le prove di sfilamento delle perline su filo plastificato in configurazione solo perla sono consultabili in Allegato 13. Si riportano in tale contesto, in Figura 5.30, i valori di picco raggiunti all'atto dello sfilamento.

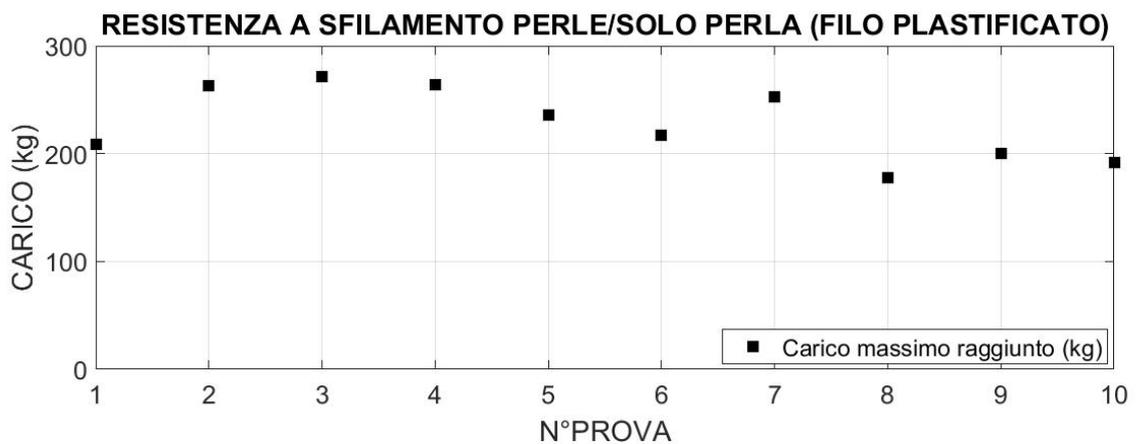


Figura 5.30: Resistenza a sfilamento di picco delle perline diamantate in configurazione solo perla (filo plastificato)

## 5.7 ANALISI DEI RISULTATI

Si effettua, in tale contesto, una breve analisi dei risultati ottenuti mediante le prove di sfilamento di pressatori e morsetti di giunzione. Occorre quindi menzionare alcune basilari formule statistiche utilizzate nell'interpretazione dei test discussi nei paragrafi precedenti.

In statistica descrittiva si definiscono dati un insieme di osservazioni relative ad un carattere (variabile) analizzato in una popolazione o in un campione da essa estratto.

Gli indici di posizione (o tendenza centrale) più utilizzati sono:

$$\text{Media:} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{Mediana: valore} & \quad \frac{x_{\frac{n+1}{2}} \text{ se } n \text{ dispari} \\ \text{centrale dei dati} & \quad \text{media aritmetica tra } \frac{x_n}{2} \text{ e } \frac{x_{n+1}}{2} \\ \text{ordinati} & \quad \text{se } n \text{ pari} \end{aligned} \quad (25)$$

Gli indici di variabilità (o dispersione) più utilizzati sono:

$$\text{Varianza:} \quad s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (26)$$

$$\text{Deviazione Standard:} \quad s = \sqrt{s^2} \quad (27)$$

Essendo:

n: numero di elementi del campione

$x_i$ : valore dell'elemento  $i$ -esimo del campione

5.7.1 Test sui pressatori

Si riportano in Tabella 5.1 i valori di resistenza a sfilamento di picco raggiunti dai pressatori a seguito dei test effettuati in laboratorio ed utilizzando sia la pressa idraulica manuale fornita che le presse di cava soggette ad usura e deterioramento dovuto alla sporcizia.

RESISTENZA A SFILAMENTO PRESSATORI (kg)		
PR. NUOVA	PR-A	PR-B
947	912	914
951	916	869
950	865	885
943	842	900
944	924	837
762	917	878
932		
931		
596		
771		
735		
792		
797		
968		
826		

Tabella 5.1: Valori di resistenza a sfilamento di picco dei pressatori ottenuti durante i test in laboratorio

Ricordando la (24), i valori di resistenza medi ottenuti sono:

PRESSA MANUALE NUOVA:  $\bar{x} = 856 \text{ kg}$

PRESSA MANUALE USATA – A:  $\bar{x} = 896 \text{ kg}$

PRESSA MANUALE USATA – B:  $\bar{x} = 880 \text{ kg}$

Ricordando la (25) i valori di resistenza mediani ottenuti sono:

PRESSA MANUALE NUOVA:  $x_{\text{mediana}} = 931 \text{ kg}$

PRESSA MANUALE USATA – A:  $x_{\text{mediana}} = 914 \text{ kg}$

PRESSA MANUALE USATA – B:  $x_{\text{mediana}} = 881 \text{ kg}$

Ricordando la (27) i valori di deviazione standard ottenuti sono:

PRESSA MANUALE NUOVA:  $s = 111 \text{ kg}$

PRESSA MANUALE USATA – A:  $s = 34 \text{ kg}$

PRESSA MANUALE USATA – A:  $s = 27 \text{ kg}$

I risultati rilevati dalle prove di sfilamento dei pressatori si sono attestati su valori concordanti sia utilizzando la pressa manuale nuova che quelle di cava; tale elemento da solo non costituisce sicuramente uno stato assiomatico delle condizioni di tutte le presse idrauliche presenti in cava, tuttavia permette di asserire che, nonostante le condizioni di lavoro, per definizione diverse da quelle di un laboratorio, e per quanto riguarda le presse testate, è possibile mantenere un buon rendimento delle pressature eseguendo le dovute manutenzioni dello strumento. Per quanto riguarda inoltre la variabilità dei dati ottenuti, risulta chiaro come, per le prove effettuate con presse idrauliche di cava tali valori, contenuti, di deviazione da quelli medi siano essenzialmente da attribuirsi al ridotto numero di provini disponibili, mentre la deviazione dal valor medio dei risultati ottenuti in laboratorio sia stato di gran lunga più elevato visto il maggior numero di campioni testati. Una deviazione dal valor medio di circa il 10% va comunque interpretata come elemento di allarme dato dalla non omogeneità dei risultati ottenuti e quindi dei pressatori stessi e vista l'importanza di questo elemento all'interno del filo diamantato. I valori mediani (non influenzati da outliers, per definizione) sono stati tutti di gran lunga più elevati di quanto la Norma UNI EN 13236:2016 prescriva.

### 5.7.2 Test sulle giunzioni

Si riportano in Tabella 5.2 i valori di resistenza a sfilamento di picco raggiunti dalle giunzioni a seguito dei test effettuati in laboratorio ed utilizzando la pressa idraulica manuale fornita.

RESISTENZA A SFILAMENTO GIUNZIONI (kg)			
ACCIAIO 9x20 mm	ACCIAIO 9x25 mm	RAME 9x30 mm	ACCIAIO 9x25 mm "AVVITABILI"
839	503	926	817
410	784	934	616
632	814	913	621
811	843	946	932
921	382	1005	617
879	803	889	853
642	703	920	636
741	829	927	
864	832	915	
553	819	925	
853	819	850	
730	737	880	
713	814	931	
912	802	922	
855	775	950	

Tabella 5.2: Valori di resistenza a sfilamento di picco delle giunzioni ottenuti durante i test in laboratorio

Ricordando la (24) i valori di resistenza medi ottenuti sono:

GIUNZIONI ACCIAIO 9x20 mm:  $\bar{x} = 757 \text{ kg}$

GIUNZIONI ACCIAIO 9x25 mm:  $\bar{x} = 751 \text{ kg}$

GIUNZIONI ACCIAIO 9x25 mm "AVVITABILI":  $\bar{x} = 727 \text{ kg}$

GIUNZIONI RAME 9x30 mm:  $\bar{x} = 922 \text{ kg}$

Ricordando la (25) i valori di resistenza mediani ottenuti sono:

GIUNZIONI ACCIAIO 9x20 mm:  $x_{\text{mediana}} = 811 \text{ kg}$

GIUNZIONI ACCIAIO 9x25 mm:  $x_{\text{mediana}} = 803 \text{ kg}$

GIUNZIONI ACCIAIO 9x25 mm "AVVITABILI":  $x_{\text{mediana}} = 636 \text{ kg}$

GIUNZIONI RAME 9x30 mm:  $x_{\text{mediana}} = 925 \text{ kg}$

Ricordando la (27) i valori di deviazione standard ottenuti sono:

GIUNZIONI ACCIAIO 9x20 mm:  $s = 146 \text{ kg}$

GIUNZIONI ACCIAIO 9x25 mm:  $s = 132 \text{ kg}$

GIUNZIONI ACCIAIO 9x25 mm "AVVITABILI":  $s = 135 \text{ kg}$

GIUNZIONI RAME 9x30 mm:  $s = 35 \text{ kg}$

I dati ottenuti mediante le prove di sfilamento delle giunzioni si attestano, per quanto riguarda quelle in acciaio (di tutte le tipologie testate), su valori medi compresi tra 730 e 760 kg, mentre leggermente più alti sono i valori mediani (non influenzati da outliers). Anche in questa situazione è peraltro necessario porre attenzione alla variabilità dei campioni testati, che raggiunge i 146 kg per le giunzioni 9x20 mm in acciaio (quasi 1/6 del valore mediano). Per quanto riguarda le giunzioni in rame i valori di resistenza a sfilamento si sono dimostrati, contrariamente a quanto appreso in cava, maggiori rispetto a quelle in acciaio, con una resistenza media ed una mediana quasi identiche rispettivamente di 922 e 925 kg; colpisce anche la variabilità del campione, assai ridotta rispetto alle altre giunzioni testate, di soli 35 kg.

In virtù di quanto ottenuto mediante le prove in laboratorio e data la non estrema chiarezza della composizione chimica delle giunzioni stesse (da schede tecniche), considerato il paradosso che una giunzione definita in rame abbia ottenuto valori di resistenza sia quantitativi che in termini di omogeneità migliori rispetto ad una di acciaio, si ritiene che tale aspetto debba ulteriormente essere indagato mediante analisi di dettaglio, programmate a breve termine.

Si riportano in Tabella 5.3 i valori di resistenza a sfilamento di picco raggiunti dalle giunzioni a seguito dei test effettuati in laboratorio, utilizzando la pressa idraulica manuale fornita e agendo sui morsetti con una doppia pressatura.

RESISTENZA A SFILAMENTO GIUNZIONI (kg) DOPPIA PRESSATURA	
ACCIAIO 9x25 mm	RAME 9x30 mm
786	1264
718	1041
773	1128
807	978
816	1004

Tabella 5.3: Valori di resistenza a sfilamento di picco delle giunzioni ottenuti durante i test in laboratorio, doppia pressatura

Ricordando la (24) i valori di resistenza medi ottenuti sono:

GIUNZIONI ACCIAIO 9x25 mm:  $\bar{x} = 780 \text{ kg}$

GIUNZIONI RAME 9x30 mm:  $\bar{x} = 1083 \text{ kg}$

Ricordando la (25) i valori di resistenza mediani ottenuti sono:

GIUNZIONI ACCIAIO 9x25 mm:  $x_{mediana} = 786 \text{ kg}$

GIUNZIONI RAME 9x30 mm:  $x_{mediana} = 1041 \text{ kg}$

Ricordando la (27) i valori di deviazione standard ottenuti sono:

GIUNZIONI ACCIAIO 9x25 mm:  $s = 39 \text{ kg}$

GIUNZIONI RAME 9x30 mm:  $s = 116 \text{ kg}$

Come osservato precedentemente, i risultati ottenuti mediante doppia pressatura dei morsetti di giunzione non si sono rivelati, in termini di resistenza a sfilamento, migliori rispetto a quelli ottenuti mediante pressatura singola. Il valore medio di resistenza, per le giunzioni in acciaio è stato di 780 kg, rispetto ai 751 kg rilevati mediante pressatura singola, mentre per quanto riguarda le giunzioni in rame il valore medio di resistenza a sfilamento è stato di 1083, rispetto ai 922 kg registrati mediante pressatura singola. Per quanto riguarda la dispersione dei dati, essendo esiguo il numero di test effettuati nella configurazione di doppia pressatura, risulterebbe un azzardo effettuare assunzioni.

Dal punto di vista normativo, in riferimento alla UNI EN 13236:2016, la resistenza delle giunzioni è sempre stata superiore al limite imposto, ad eccezione di un singolo caso, rispetto ai 15 totali, per quanto riguarda le giunzioni in acciaio 9x20 mm e due test effettuati sulle giunzioni in acciaio 9x25 mm, rispetto ai 15 totali.

### 5.7.3 Test di sfilamento delle perline diamantate

Si riportano in Tabella 5.4 i valori di resistenza a sfilamento di picco raggiunti dalle perline diamantate a seguito dei test effettuati in laboratorio.

RESISTENZA A SFILAMENTO PERLINE SU FILO COPERTO (kg)			
GOMMATO GOMMA-PERLA- GOMMA	GOMMATO SOLO PERLA	PLASTIFICATO PLASTICA-PERLA- PLASTICA	PLASTIFICATO SOLO PERLA
568	191	459	209
548	171	374	263
553	203	399	271
585	184	358	264
587	67	348	236
560	178	445	217
601	200	493	253
619	192	384	178
615	169	394	200
546	209	473	192

Tabella 5.4: Valori di resistenza a sfilamento di picco delle perline diamantate ottenuti durante i test in laboratorio, in varie configurazioni

Ricordando la (24) i valori di resistenza medi ottenuti sono:

FILO GOMMATO, CONFIGURAZIONE GOMMA-PERLA-GOMMA:

$$\bar{x} = 578 \text{ kg}$$

FILO GOMMATO, CONFIGURAZIONE SOLO PERLA:  $\bar{x} = 176 \text{ kg}$

FILO PLASTIFICATO, CONFIGURAZIONE PLASTICA-PERLA-PLASTICA:

$$\bar{x} = 410 \text{ kg}$$

FILO PLASTIFICATO, CONFIGURAZIONE SOLO PERLA:  $\bar{x} = 228 \text{ kg}$

Ricordando la (25) i valori di resistenza mediani ottenuti sono:

FILO GOMMATO, CONFIGURAZIONE GOMMA-PERLA-GOMMA:

$$x_{\text{mediana}} = 577 \text{ kg}$$

FILO GOMMATO, CONFIGURAZIONE SOLO PERLA:  $x_{\text{mediana}} = 188 \text{ kg}$

FILO PLASTIFICATO, CONFIGURAZIONE PLASTICA-PERLA-PLASTICA:

$$x_{\text{mediana}} = 397 \text{ kg}$$

FILO PLASTIFICATO, CONFIGURAZIONE SOLO PERLA:

$$x_{\text{mediana}} = 227 \text{ kg}$$

Ricordando la (27) i valori di deviazione standard ottenuti sono:

FILO GOMMATO, CONFIGURAZIONE GOMMA-PERLA-GOMMA:

$$s = 27 \text{ kg}$$

FILO GOMATO, CONFIGURAZIONE SOLO PERLA:  $s = 41 \text{ kg}$

FILO PLASTIFICATO, CONFIGURAZIONE PLASTICA-PERLA-PLASTICA:  
 $s = 71 \text{ kg}$

FILO PLASTIFICATO, CONFIGURAZIONE SOLO PERLA:  $s = 34 \text{ kg}$

Si riporta in Figura 5.31 e 5.32 un confronto tra le resistenze allo sfilamento delle perline diamantate nelle due configurazioni e per le due tipologie di filo diamantato. Si ricorda che non vi è correlazione tra i risultati ottenuti per quanto riguarda il numero della prova, tuttavia risulta maggiormente intuitiva e di facile leggibilità la diminuzione di resistenza.

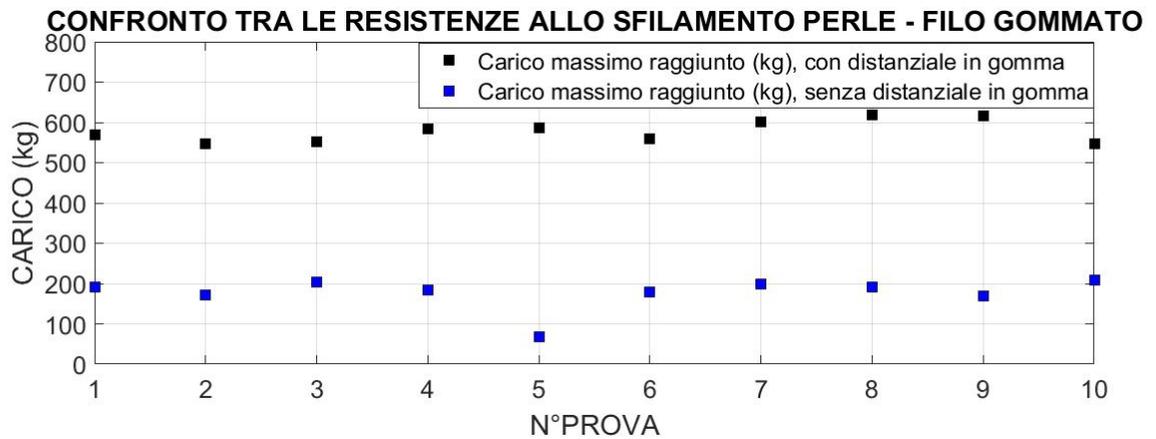


Figura 5.31: Confronto tra resistenze allo sfilamento perle diamantate con e senza distanziale in gomma

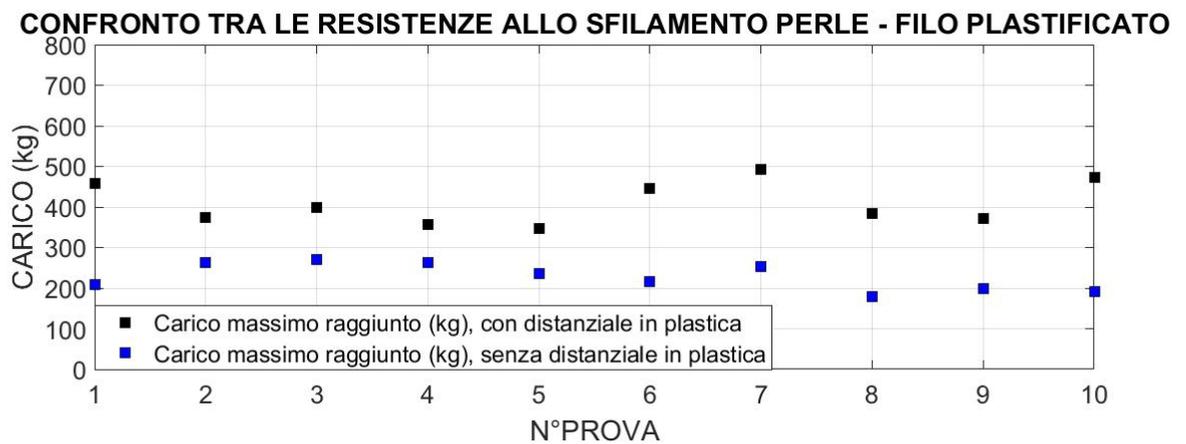


Figura 5.32: Confronto tra resistenze allo sfilamento perle diamantate con e senza distanziale in plastica

I risultati ottenuti dalle prove di sfilamento delle perline diamantate su due tipologie di filo coperto (gommato e plastificato), mettono in risalto un aspetto sostanziale dell'utilizzo di tale utensile. Se, infatti, per quanto riguarda i valori medi delle configurazioni in cui è mantenuto il distanziale polimerico le resistenze si attestano

su valori di 577 kg (filo gommato) e 397 kg (filo plastificato), per quanto riguarda, invece, la configurazione in cui il distanziale polimerico è assente, si registrano brusche diminuzioni di resistenza allo sfilamento delle perline diamantate: 188 kg (filo gommato) e 227 kg (filo plastificato). È indicativo il fatto di come ci sia una differenza della resistenza allo sfilamento mediana di circa un terzo per quanto riguarda il filo gommato (nelle due differenti configurazioni) e di quasi un mezzo, per quanto riguarda il filo plastificato. In tali condizioni, è appena ovvio che, in caso di strappo con colpo di frusta, il filo diamantato coperto in configurazione simile alla Figura 5.25, abbia più probabilità di proiettare la perlina diamantata adiacente al punto di giunzione.

A completamento di quanto detto, occorre ricordare che le prove di sfilamento sono state tutte eseguite in laboratorio ed a temperatura ambiente. In cava, durante l'utilizzo, il filo diamantato si riscalda a causa dell'attrito generato dal movimento relativo tra blocco e filo stesso. È plausibile pensare che le condizioni di sfilamento, ponendo come ipotesi una adeguata adduzione di acqua refrigerante, possano modificarsi a causa del surriscaldamento dei materiali polimerici di copertura e che le resistenze ultime a sfilamento possano subire un ulteriore decremento.

## *CAPITOLO 6 – ANALISI DI DUREZZA DELLE GIUNZIONI*

---

I test di sfilamento mediante l'applicazione di un carico uniassiale sulle giunzioni metalliche dei fili diamantati hanno fatto emergere un comportamento delle stesse, sottoposte a sollecitazione, alquanto eterogeneo. Le giunzioni testate e vendute come "rame" hanno addirittura fatto registrare valori di resistenza di picco superiori all'acciaio, nonostante la duttilità del primo sia indiscutibilmente superiore rispetto all'acciaio. Si è quindi presentata la necessità di indagare in modo più approfondito le caratteristiche di durezza e la struttura metallografica delle giunzioni, per avere un quadro conoscitivo più ampio dei materiali comunemente utilizzati in cava. Sono quindi state fornite alcune giunzioni al DISAT del Politecnico di Torino, per effettuare test di durezza ed analisi metallografiche al microscopio, al fine di indagare con maggior dettaglio la loro composizione. In particolare, sono state fornite le giunzioni di tipologia: acciaio 9x20 mm, acciaio 9x25 mm, rame 9x30 mm ed un'altra tipologia di giunzione, anch'essa in rame 10x30 mm, fornita dalla Cava Gioia e, a detta del fornitore, di tipologia meno recente di quelle utilizzate in ambito dei test in laboratorio (Cap. 5).

### 6.1 PROVE DI MICRODUREZZA VICKERS

Le prove di microdurezza Vickers sono utilizzate per definire la composizione di un dato materiale, correlando quest'ultima alla resistenza da esso opposta alla penetrazione da parte di un penetratore. Il penetratore utilizzato durante le prove Vickers è costituito da una punta di diamante a forma piramidale retta a base

quadrata con angolo al vertice di 136°. Dal punto di vista procedurale sono state seguite tutte le specifiche contenute nella Norma standardizzata UNI EN ISO 6507:2006. Sostanzialmente il penetratore è stato assoggettato ad una forza nota  $F = 20$  gf per quanto riguarda le giunzioni in rame ed  $F = 100$  gf per quanto riguarda le giunzioni in acciaio per un tempo  $t = 15$  s; successivamente, mediante un microscopio di precisione è stata determinata la lunghezza delle diagonali dell'impronta lasciata sul metallo dal penetratore.

In formule, la durezza Vickers (HV) è definita come:

$$HV = Cost \times \frac{F}{Area\ indentazione} = 0.102 \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (28)$$

essendo:

Cost = 0.102: fattore di conversione da kgf a N

F: forza conferita al penetratore dal microdurimetro (N)

d: media aritmetica tra le lunghezze delle diagonali di indentazione (mm)

Essendo il materiale da testare metallico e quindi omogeneo per definizione, il numero di indentazioni per provino è stato limitato a 3 in quanto già statisticamente significativo (contrariamente a quanto accade nei test di microdurezza per rocce eterogenee).

## 6.2 RISULTATI PROVE DI MICRODUREZZA VICKERS

I risultati ottenuti dalle prove di microdurezza Vickers sono riportati in Tabella 6.1 e 6.2.

Microdurezze	HV (25 g)	HV (25 g)	HV (25 g)	HV (25 g) - Media dei valori
Cu 10x30 mm	101	93	94	96
Cu 9x30 mm	90	96	90	92

Tabella 6.1: Risultati da microdurezza Vickers, giunzioni in rame

Microdurezze	HV (100 g)	HV (100 g)	HV (100 g)	HV (100 g) - Media dei valori
Ac 9x25 mm	153	156	152	154
Ac 9x30 mm	181	206	198	195

Tabella 6.2: Risultati da microdurezza Vickers, giunzioni in acciaio

Come è possibile osservare dai risultati ottenuti, le giunzioni in rame, di entrambe le tipologie, hanno fatto registrare valori di durezza Vickers inferiore rispetto alle giunzioni in acciaio, come prevedibile, che si sono attestati su valori simili, confermando una certa omogeneità. Per quanto riguarda le giunzioni in acciaio, si sono registrati, invece, valori medi leggermente discordanti, probabilmente dovuti alla differente metodologia di produzione delle due giunzioni (fatto su cui si entrerà nel merito al paragrafo successivo).

### 6.3 IMMAGINI AL MICROSCOPIO METALLOGRAFICO

Sono state successivamente condotte delle analisi al microscopio metallografico in maniera tale da poter effettuare una valutazione visiva delle caratteristiche dei metalli costituenti i morsetti di giunzione.

Dal punto di vista operativo, la preparazione metallografica è stata eseguita in fasi successive: le giunzioni sono state inizialmente sezionate trasversalmente (Figura 6.1) e trattate con materiali abrasivi a grana iterativamente inferiore; successivamente lo stesso procedimento è stato effettuato mediante panni con pasta diamantata, per ottenere una superficie quasi a specchio. Il materiale è stato poi attaccato con NITAL (acido nitrico in alcool con diluizione al 3%) per circa 10 s in maniera tale che l'effetto a specchio del trattamento precedente venisse limitato e rendendo il materiale tale da poterne osservare la microstruttura al microscopio.



Figura 6.1: Preparazione delle giunzioni per microscopio metallografico

### 6.3.1 Giunzioni in acciaio 9x20 mm

In Figura 6.2 a e b si riportano le immagini ottenute al microscopio metallografico delle giunzioni in acciaio 9x20 mm a due ingrandimenti differenti: (a sinistra) e 500x (a destra).

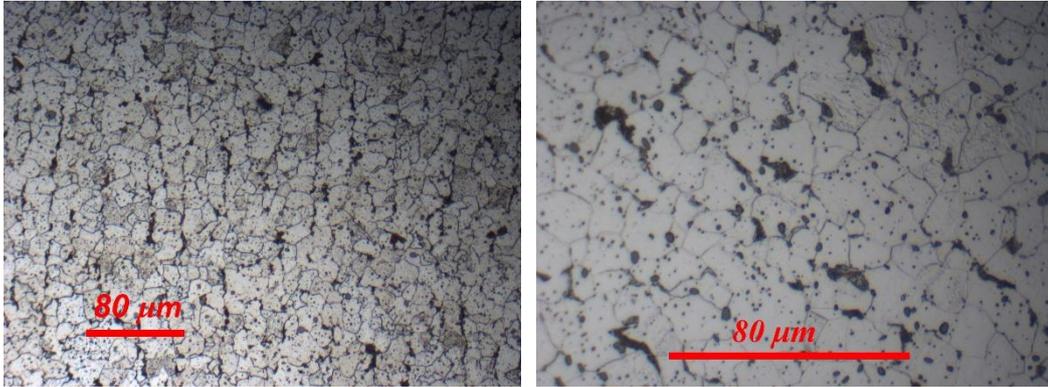


Figura 6.2a,b: Immagini al Microscopio metallografico giunzioni acciaio 9x20 mm

Come è possibile osservare, la matrice del materiale è sostanzialmente ferritica (basso tenore in C) con presenza visibile di bordi di grano; si evidenzia inoltre la presenza di piccoli noduli grigi di seconda fase (plausibilmente ossidi) di matrice non metallica. È presente infine una percentuale di circa il 5% di perlite (miscela metallografica di ferrite e cementite, in conformazione lamellare).

La produzione di tali morsetti di giunzione può plausibilmente essere derivante da metallurgia delle polveri: processo che si basa sulla sinterizzazione di polveri ad alta temperatura. Tale affermazione è motivata dalla presenza costante di noduli di seconda fase di natura non metallica, tipici di tale procedura di produzione.

### 6.3.2 Giunzioni in acciaio 9x25 mm

In Figura 6.3 a, b, c si riportano le immagini ottenute al microscopio metallografico delle giunzioni in acciaio 9x25 mm a due ingrandimenti differenti: 200x (a sinistra) e 500x (a destra).

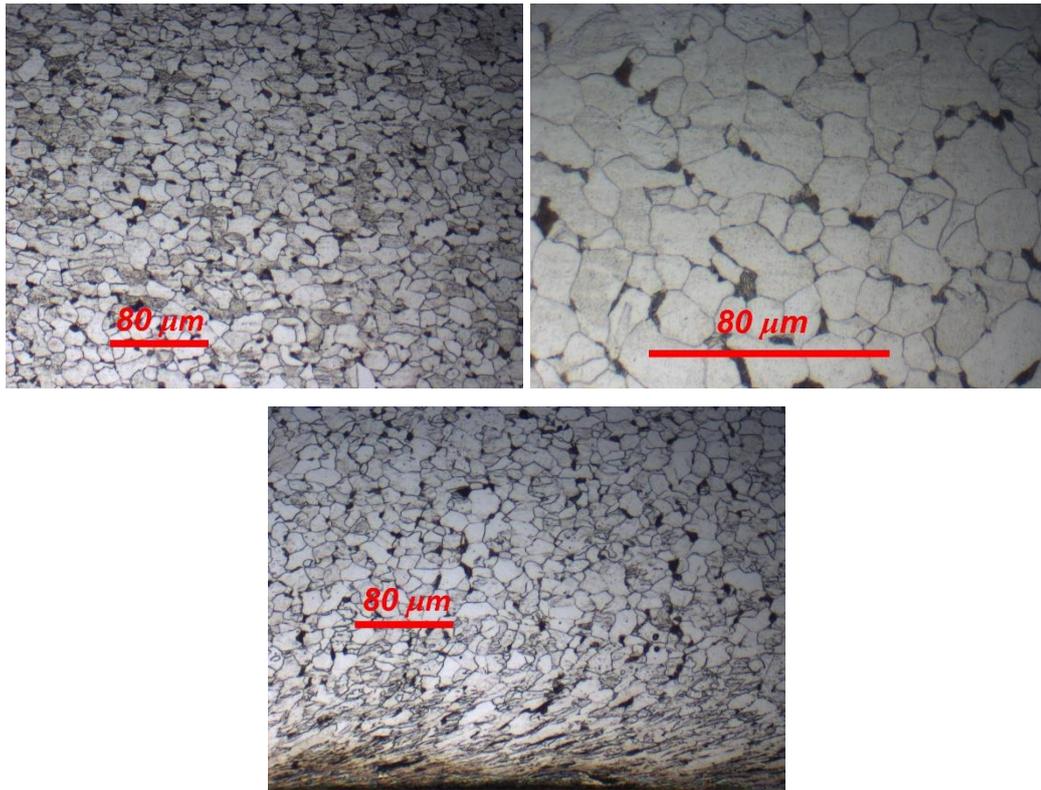


Figura 6.3a,b,c: Immagini al Microscopio metallografico giunzioni acciaio 9x25 mm

Anche in questo caso la matrice risulta ferritica (basso tenore in C), con presenza di bordi di grano e perlite in quantità inferiore al 5%. La differenza sostanziale rispetto al caso precedente è l'assenza di noduli di seconda fase, chiaro indicatore di una tipologia di produzione differente, plausibilmente trafilatura.

Un aspetto da sottolineare, per quanto riguarda tale morsetto di giunzione, è ben visibile in Figura 6.3 c, dove si nota, nella zona interna della giunzione, una porzione in cui viene meno l'isotropia dei grani, arrivando addirittura alla decoesione di una porzione della giunzione. Tale caratteristica palesa la presenza di un incrudimento intrinseco del materiale in quella zona che, a causa del processo produttivo, che nei casi più gravi perde anche la sua continuità chimica. Nell'ottica dell'utilizzo in cava, questo aspetto può influire negativamente sulle caratteristiche meccaniche del materiale il quale, a seguito di pressatura, offre al cavo a trefoli (anima del filo diamantato) una superficie di aggancio non perfettamente continua.

### 6.3.3 Giunzioni in rame 9x30 mm

In Figura 6.4 a e b si riportano le immagini ottenute al microscopio metallografico delle giunzioni in rame 9x30 mm allo stesso livello di ingrandimento: 200x.

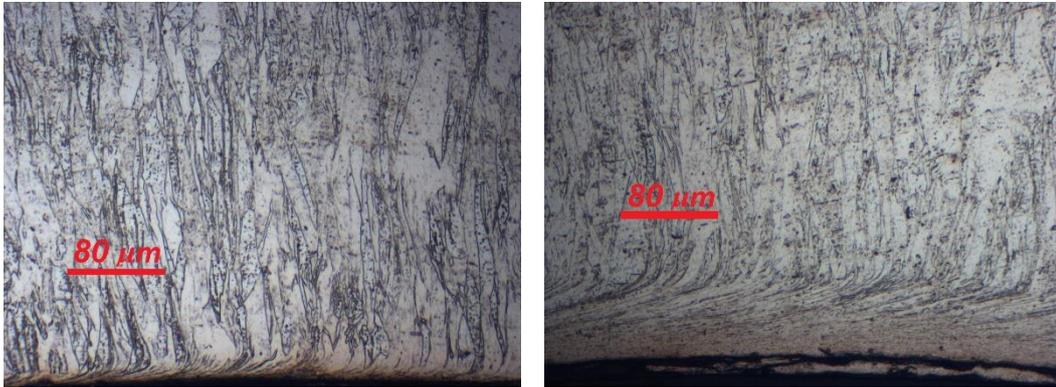


Figura 6.4 a,b: Immagini al Microscopio metallografico giunzioni rame 9x30 mm

La matrice del materiale in questo caso si presenta come simil-austenitica con cristalli allungati e orientati radialmente rispetto all'asse di simmetria della giunzione: aspetto direttamente correlato alla tipologia di produzione del morsetto (plausibilmente laminazione o trafilazione) che ha prodotto uno schiacciamento in direzione normale a quella di allungamento dei cristalli ed una trazione in direzione opposta. Un aspetto fondamentale è che il materiale della giunzione non corrisponde a rame puro (come riportato dal produttore), bensì ad una lega al rame. L'esatta composizione chimica sarà oggetto di approfondimenti futuri.

Anche in questo caso è possibile osservare una zona interna della giunzione di forte incrudimento, nella quale si perde addirittura la disposizione dei cristalli e si genera decoesione superficiale a livello micrometrico, con le stesse conseguenze meccaniche citate precedentemente.

Si osserva ancora la presenza di alcuni geminati: piani cristallografici identici, ma ruotati di un angolo definito in base al reticolo cristallino (in questo caso 62 – 69°).

### 6.3.4 Giunzioni in rame 10x30 mm

In Figura 6.5 a e b si riportano le immagini ottenute al microscopio metallografico delle giunzioni in rame 10x30 mm a due ingrandimenti differenti: 200x (a sinistra) e 1000x (a destra).

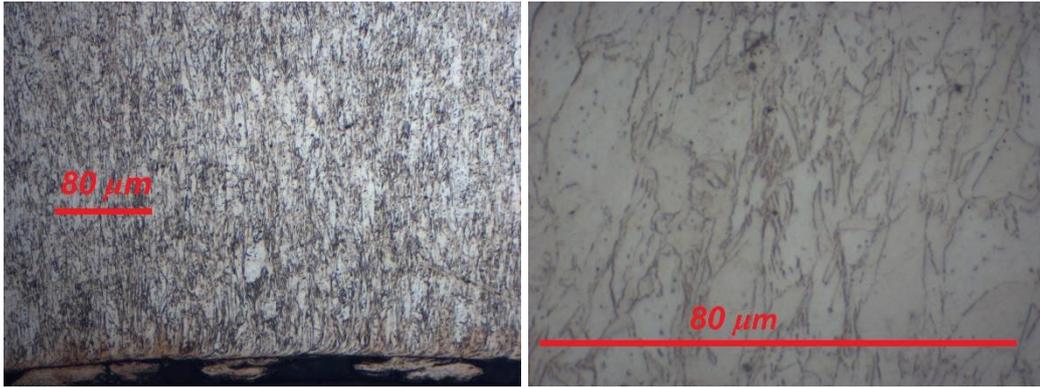


Figura 6.5a,b: Immagini al Microscopio metallografico giunzioni rame 10x30 mm

Anche in questo caso la matrice del materiale è simil-austenitica con disposizione radiale dei grani, i quali, a differenza della giunzione precedente, si presentano a grana più fine. Il materiale non è rame puro, ma una lega monofasica al rame, come nel caso precedente.

Si nota, anche in questo caso, in Figura 6.5a, la presenza di una zona di distacco di materiale dovuta all'eccessivo incrudimento della zona in esame.

## *CAPITOLO 7 – CAMPAGNA SPERIMENTALE IN CAVA*

---

Dopo aver determinato sperimentalmente in laboratorio le resistenze di alcune componenti fondamentali del filo diamantato (giunzioni e pressatori), al fine di individuare le effettive forze in gioco cui esso è sottoposto durante il taglio, sono state effettuate alcune prove in cava atte alla determinazione congiunta di forze agenti sul filo e spostamenti della tagliatrice a filo durante la fase di taglio. In tal modo è stato possibile valutare un aspetto fondamentale del taglio del marmo, che in letteratura risulta non essere stato molto approfondito, ossia l'arretramento della tagliatrice a filo in base ai carichi agenti sul filo diamantato stesso. La conoscenza di tale elemento è fondamentale in quanto permette di effettuare la giusta progettazione elettronica delle tagliatrici, le quali, a parere dello scrivente, devono essere progettate in modo tale da tener conto dello stato di avanzamento del taglio e delle forze in gioco agenti sul filo diamantato.

### **7.1 ANALISI TEORICA DELLE FORZE IN GIOCO**

Riprendendo le formule citate al Capitolo 3, si fornirà nel seguito un'analisi quantitativa delle forze agenti sul filo diamantato in fase di taglio di due tipologie differenti di tagliatrice a filo, mediante alcune assunzioni teoriche. In tal modo sarà possibile effettuare un confronto tra i valori teorici e quelli rilevati mediante la campagna sperimentale in cava. Verrà considerata una schematizzazione di taglio statica dal punto di vista dell'arretramento della tagliatrice a filo diamantato ( $X = 0$  nella formula (16)). Tale assunzione, seppur apparentemente banale, risulta essere

di non secondaria importanza in quanto il tiraggio del filo diamantato è conferito sia dalla puleggia motrice, sia (ed in maniera maggioritaria) dal motore di arretramento della tagliatrice stessa. L'analisi effettuata risulta quindi incompleta, da un punto di vista meccanico, ed è presentata al solo fine accademico.

Si riporta in Figura 7.1 la configurazione di taglio analizzata, valutando le differenti inclinazioni del filo diamantato durante la fase di taglio.

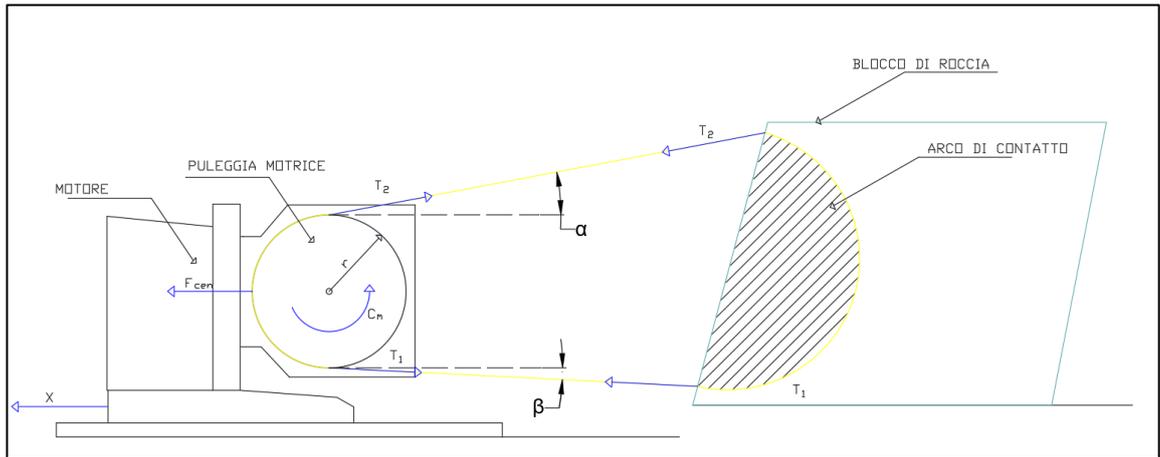


Figura 7.1: Configurazione di taglio analizzata

Verrà analizzata una macchina con potenza pari a 55 kW (circa 75 CV) ed una velocità lineare del filo di 40 m/s (massima velocità consentita per legge). La coppia trasmessa alla puleggia motrice risulta valutabile mediante la semplice formula:

$$P = C_m \cdot \omega \quad (29)$$

essendo:

P: potenza assorbita dal motore (kW)

$C_m$ : coppia motrice erogata dalla puleggia motrice (Nm)

$\omega$ : velocità angolare della puleggia (rad/s)

La velocità angolare è ricavabile mediante la relazione  $V = R \cdot \omega$ , essendo R il raggio della puleggia motrice, il quale per ipotesi è stato posto pari a 0.45 m. Operando le dovute sostituzioni si ottiene  $\omega \cong 89 \text{ rad/s}$  e quindi  $C_m \cong 620 \text{ Nm}$ . Assumendo un'efficienza di trasmissione del moto pari a  $\eta = 90\%$ , la coppia motrice effettiva trasmessa al filo diamantato risulta  $C_{me} \cong 560 \text{ Nm}$ .

Riferendosi alla Figura 7.1, l'equazione di equilibrio dei momenti, ponendo come polo il centro della puleggia motrice, fornisce la seguente equazione:

$$C_m = (T_2 \cos \alpha - T_1 \cos \beta) R \quad (30)$$

Ricordando la (7) ed introducendo una correzione alla condizione di non slittamento dovuta alla forza centrifuga agente sul filo diamantato posto in rotazione dalla puleggia motrice, si ottiene:

$$\frac{T_2 \cos \alpha - F_{cen}}{T_1 \cos \beta - F_{cen}} \leq e^{f \alpha} \quad (31)$$

Considerando, quindi, un avvolgimento sulla puleggia variabile e pari a  $(\pi - \alpha - \beta)$  rad, come mostrato in Figura 7.2, un coefficiente di aderenza medio plausibile, rilevato in bibliografia scientifica, pari a 0.35 (valore massimo per le cinghie di trasmissione) e ponendo il valore limite di non slittamento si ottiene:

$$\frac{T_2 \cos \alpha - F_{cen}}{T_1 \cos \beta - F_{cen}} = e^{f \alpha (\pi - \alpha - \beta)} \quad (32)$$

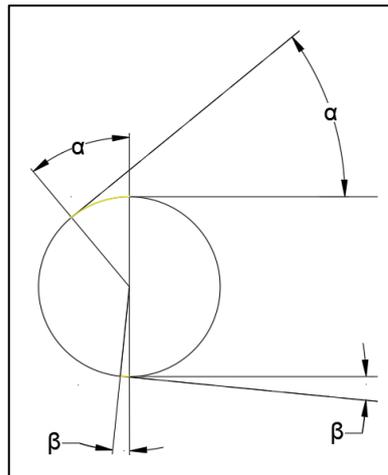


Figura 7.2: Variazione progressiva dell'avvolgimento sulla puleggia motrice

La forza centrifuga, ricordando la (10), considerando una velocità di rotazione costante, tralasciando le fasi transitorie di accelerazione e decelerazione del filo

diamantato (inizio e fine azionamento tagliatrice) e considerando un peso lineare medio del filo diamantato di 0.325 kg/m, è pari a circa 410 N. Mettendo a sistema (30) e (32) si ottiene un problema a 2 equazioni in due incognite ( $T_1$  e  $T_2$ ), con variabilità degli angoli ( $\alpha$  e  $\beta$ ) in base alla fase di taglio raggiunta dalla tagliatrice a filo. Si riporta in Figura 7.3 l'entità delle tensioni ottenute mediante la risoluzione del sistema. In Allegato 14 sono riportati i valori tabulati numerici del grafico.

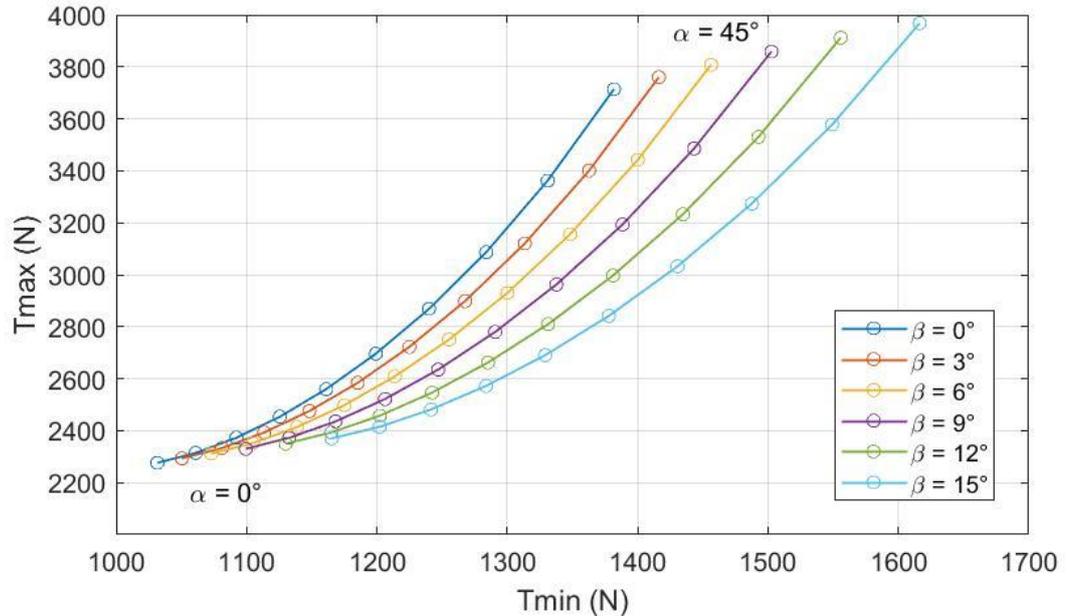


Figura 7.3: Valori teorici delle tensioni agenti sulla puleggia motrice

Come è possibile osservare, il valore di tensione massima raggiunto sulla porzione di filo entrante nella puleggia motrice si attesta intorno a 4000 N (400 kg) ottenuto con angolazione del ramo di filo uscente dalla puleggia di 15° e angolazione del ramo di filo entrante di 45°; è importante notare che tale valore è puramente teorico e difficilmente realizzabile in condizioni di taglio reali, dal punto di vista della geometria del problema, per lo meno per quanto riguarda la riquadratura dei blocchi sul piazzale di cava (caso analizzato). È possibile notare come i carichi agenti sul filo diamantato siano inferiori per condizioni in cui il taglio procede orizzontalmente, mentre vi è un progressivo incremento delle tensioni all'aumentare delle angolazioni di ingresso e uscita del filo dalla puleggia.

## 7.2 RILEVAMENTO SPERIMENTALE IN CAVA DELL'ARRETRAMENTO Istantaneo DELLA TAGLIATRICE

Sono stati predisposti in cava dei rilevamenti empirici circa gli arretramenti istantanei della tagliatrice a filo diamantato durante il taglio del marmo. A tal fine, è stata utilizzata una tagliatrice Apuania Corsi (modello MF5000) sulla quale è stato installato un encoder a nastro sulla parte mobile della tagliatrice (che impone l'arretramento del taglio) al fine di valutare gli spostamenti effettuati dalla macchina. Il materiale utilizzato, nel dettaglio, è stato:

- tagliatrice a filo diamantato: produttore Apuania Corsi, modello MF5000 (già descritta al Cap. 3.4.2)
- Encoder: produttore Kubler, modello A 40, lunghezza massima di svolgimento 1 m, tensione di alimentazione 24 V, tensione in uscita 0-10 V
- Sistema di acquisizione: unità National Instruments Hi-speed USB-9162
- Computer dello scrivente
- Alimentatore: produttore Murr Elektronik, tensione in ingresso 220 V, tensione in uscita 24 V

La configurazione dell'encoder montato sulla macchina è presente in Figura 7.4.



Figura 7.4: Encoder installato su tagliatrice a filo diamantato in cava

Il taglio seguito è stato effettuato per il ribaltamento di una bancata di dimensioni 6x8 m. La durata dell'acquisizione è stata di 4800 s. In figura 7.5 si riportano i risultati ottenuti.

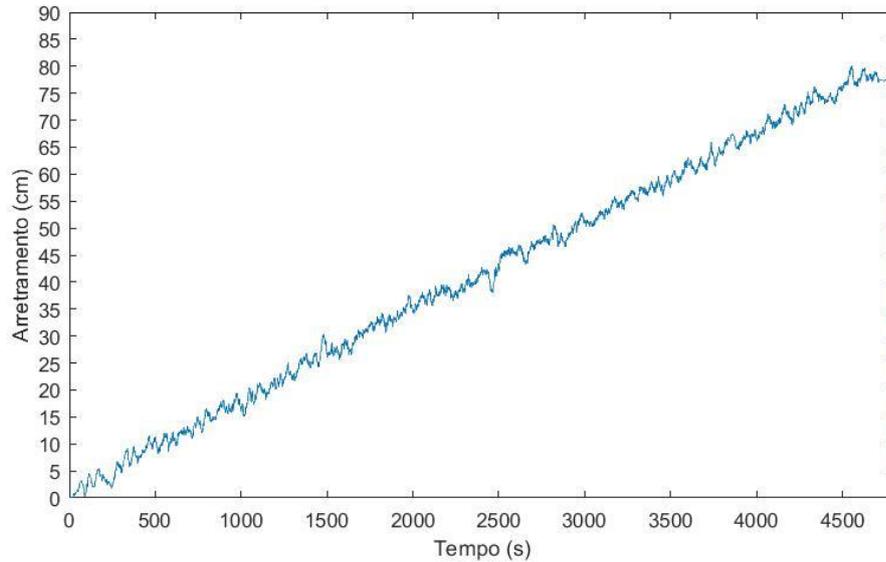


Figura 7.5: Dati istantanei di arretramento della tagliatrice a filo diamantato

Un aspetto interessante da sottolineare è la presenza ad alta frequenza di picchi di arretramento, i quali, seppur di modulo limitato, sottopongono costantemente il filo a sollecitazioni ad intensità variabile. I cicli di fatica di questa tipologia hanno il loro maggior effetto, a parere dello scrivente, sulla resistenza a sfilamento della giunzione, la quale è sottoposta continuamente a stati di tensionamento uniassiale di differente entità.

Un aspetto fondamentale per rendere questo studio completo, è quello di effettuare la correlazione istantanea dei dati di spostamento con il carico istantaneo agente sul filo diamantato, mediante l'installazione di una cella di carico montata su cuscinetti e posta in prossimità del filo durante la fase di taglio. Tale verifica è stata effettuata dallo scrivente, con scarsi risultati dovuti alla rottura della cella di carico stessa. Sarà quindi necessario, nell'ottica della conoscenza completa delle caratteristiche delle tagliatrici a filo diamantato, effettuare tali analisi, sulle diverse tipologie di tagliatrici a filo diamantato, per trarne le dovute considerazioni in termini di sicurezza e controllo della macchina stessa. Un dato che occorre infine menzionare, nonostante non vi sia stata la possibilità di effettuare misurazioni di trazione del filo diamantato complete è che la cella di carico possedeva una certificazione di protezione per sovraccarichi fino a 10 volte la sua forza di misura nominale (50 kg). Successivi studi chiariranno se i carichi effettivamente agenti sulla cella abbiano superato i 500 kg.

## *CONCLUSIONI*

---

Il presente lavoro svolto ha permesso allo scrivente di individuare notevoli criticità del filo diamantato in fase di taglio. In particolare, le modalità di rottura del filo sono state suddivise in tre grandi categorie:

- schiacciamento del filo dovuto a cedimento di parte del blocco o della bancata;
- rottura per sfilamento del cavo d'acciaio dalla giunzione;
- tranciamento del filo in prossimità della giunzione, a causa di fatica flessionale;

Per quanto riguarda la prima tipologia di rottura, è molto complesso stabilire adeguate contromisure, dal punto di vista della prevenzione dello strappo generato dallo schiacciamento; risultano, in tal caso, fondamentali due aspetti che possono concorrere alla riduzione del rischio per gli operatori: l'esperienza dei singoli nell'impostazione del taglio e l'utilizzo di tagliatrici a filo diamantato provviste almeno di un sistema di disalimentazione istantanea a seguito di un repentino incremento o decremento della resistenza agente sul filo. Tale tipologia di rottura è l'unica che, per quanto osservato in cava, può portare ad uno strappo in una zona diversa da quella di giunzione od in prossimità di essa.

La seconda tipologia di rottura è la più frequente e, al fine di individuare le caratteristiche dei materiali che concorrono a tale criticità, sono stati effettuati diversi test di sfilamento sulle giunzioni per valutarne la resistenza a trazione (secondo quanto prescritto da UNI EN 13236:2016). I risultati hanno dimostrato come la resistenza, mediamente, per i nuovi materiali testati, sia superiore al valore

imposto (540 kg, calcolati in base ai materiali utilizzati). Alcuni outlayers, che hanno presentato resistenza a sfilamento drasticamente inferiore e non conforme alle prescrizioni normative, si sono verificati probabilmente a causa di una pressatura decentrata di qualche mm rispetto alla condizione ideale: tale elemento, comunque, non è da sottovalutare nell'ottica della formazione dei cavatori giovani i quali, non hanno ancora acquisito piena manualità degli strumenti di cava. Un'altra motivazione plausibile dell'elevata frequenza di rotture per sfilamento è emersa dalle analisi al microscopio metallografico, nelle quali si è evidenziato a ridosso delle zone interne delle giunzioni (tranne quelle in acciaio 9x25mm) un layer di forte incrudimento, con la presenza, talvolta, di un distacco chimico di alcune porzioni di materiale: tale condizione può determinare un peggioramento delle caratteristiche meccaniche delle giunzioni.

Inoltre, sono stati effettuati alcuni test di resistenza a sfilamento sui pressatori (presenti nel filo tradizionale) i quali hanno fatto registrare valori di soglia superiori a quanto la norma prescrive; il problema di tali elementi è probabilmente causato, più che dalla resistenza a sfilamento, dalla tendenza a rottura dovuta al tranciamento del filo a causa del rilascio energetico che si sviluppa nel colpo di frusta.

Per quanto riguarda la terza tipologia di rottura, gli elementi a disposizione per effettuare un'analisi oggettiva e ad ampio spettro sono stati limitati ed occorrerebbe una sperimentazione mirata all'analisi del problema. Si può peraltro asserire con buona attendibilità la fondamentale importanza della verifica dello stato delle giunzioni a seguito di un numero di tagli congruo, dettato dall'osservazione costante. Particolare attenzione va posta durante il taglio di blocchi informi, i quali costringono il filo a percorsi con limitati raggi di curvatura che tendono ad inflettere il morsetto di giunzione con frequenza molto elevata. Un ulteriore fatto di aggravamento delle condizioni di fatica flessionale sulle zone di giunzione del filo è dato dai rinvii cui talvolta è necessario ricorrere per effettuare alcuni tagli (soprattutto per lo stacco di bancate); in tali situazioni è necessario prestare la massima attenzione alle condizioni di usura del filo e delle giunzioni ogni qualvolta il taglio viene interrotto, addurre una congrua quantità d'acqua di refrigerazione e ricorrere, se possibile, a volani di rinvio di diametri adeguati, tali da non produrre sollecitazioni elevate nel punto di giunzione.

La resistenza a sfilamento delle perline diamantate su filo coperto ha, in aggiunta, evidenziato che la presenza del manicotto in materiale polimerico, in prossimità

della zona di giunzione, contribuisce ad aumentare il fissaggio della perlina diamantata: tale fatto è dibattuto in cava, ma le evidenze sperimentali ottenute, dimostrano, con i dati a disposizione, che si tratta di un problema innegabile.

Le tagliatrici a filo diamantato analizzate hanno messo in evidenza come alcune di esse siano state progettate mediante un'analisi dei rischi adeguata in funzione delle condizioni di cava, mentre altre, dovrebbero essere riviste in adeguamento ai RES, in ottemperanza alla "Direttiva Macchina", condizione indispensabile per apporre la marcatura CE alla macchina stessa.

Un altro aspetto rilevante è la gestione dei dati istantanei di taglio, nell'ottica di un adeguato controllo delle energie in gioco durante tale processo: è grave che molte macchine di comune utilizzo, soprattutto di vecchia generazione, non siano in grado di percepire, dal punto di vista elettronico, lo stato di avanzamento del taglio, arrivando al paradosso di accelerare l'arretramento istantaneo nelle fasi di fine taglio (non considerando che il minor assorbimento elettrico può comportare limitate dimensioni dei ponti di roccia, per cui filo risulta sollecitato a fatica flessionale in modo anomalo).

La naturale prosecuzione di questo lavoro riguarderà l'analisi istantanea in campo delle forze agenti sul filo diamantato mediante l'ausilio di una cella di carico e la correlazione di tali valori con quelli di arretramento della tagliatrice al fine di comprendere le reali forze agenti sugli utensili. Unitamente a ciò sarà necessario effettuare degli studi riguardanti la fatica flessionale cui è sottoposto il filo diamantato durante il taglio, per ogni tipologia di operazione (stacco al monte o riquadratura), caratterizzato da una struttura che non può in alcun modo essere paragonato a materiali già studiati in altri settori dell'ingegneria (come ad esempio le funi di sollevamento). Solo mediante questo tipo di correlazioni empirico-sperimentali, e con la volontà vera di industriali e produttori, si potrà raggiungere un maggiore livello di sicurezza per gli operatori di cava.

I risultati ottenuti forniscono in ogni caso un contributo preliminare alle indagini da effettuare per l'approccio e la soluzione ad un problema indiscutibilmente molto complesso.

## BIBLIOGRAFIA

### Pubblicazioni citate

- BRADLEY F. (2008) – *Le cave di marmo di Carrara* – Panorama
- BLASI, P., CRISCUOLO, A., LISI, S. (1998) – *Il Marmo Di Carrara: Aspetti Geologici, Merceologici E Minerari* – Eurominerals and the Society of Mining Professors
- CANNELLA D. (2004) – *Determinazioni sperimentali di forze ed energia specifica di taglio nella segazione con il filo diamantato* – Tesi di laurea, Torino
- CALDERALE P. M. (1989) – *Analisi delle sollecitazioni, fatica e rigidità delle funi metalliche*, tratto da Testimonianze – 75° Compleanno di Franco Levi, Editrice Levrotto & Bella
- CARDU M., – Slides Corso di *Ingegneria degli scavi 2015* – Politecnico di Torino
- CARMIGNANI L., CONTI P., FANTOZZI P., MANCINI S., MASSA G., MOLLI G., VASELLI L. (2007) – *I marmi delle Apuane* – Geoitalia
- COMITATO PARITETICO MARMO (2000) – *Studio sul filo diamantato a cavo protetto e materiali di corredo al taglio*, – Pietrasanta (LU), Italia
- COMITATO PARITETICO MARMO (1998) – *Relazione tecnica relativa alle analisi e prove di laboratorio eseguite sui giunti D<sub>3</sub> e D<sub>5</sub>* – Pietrasanta (LU), Italia
- CRIVELLO V. – *Coltivazione delle pietre ornamentali mediante splitting dinamico: analisi di tre cave di gneiss Piemontesi e relativi confronti* – Tesi di laurea, Torino
- DAL PRÀ M. (2005) – *Inverter per motori asincroni trifasi*
- FANTUZZI C., EMILIA R. (2004). *Controllori standard - PID*.
- GIOVANNOZZI R. (1980) – *Costruzione di macchine, Vol. II*, Patron Editore, Bologna
- GRECO C., INDRI M. (2011) – *Corso di Controlli automatici* – Politecnico di Torino
- MICHELOTTI E. – (2001), *Caratterizzazione tecnologica del filo diamantato nel taglio di strutture*, Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino

- PASQUINELLI A. – *Analisi e valutazione delle prestazioni del filo diamantato in due bacini di estrazione del marmo* – Tesi di laurea, Torino
- TANTUSSI G. (2007) – *Studio del comportamento del filo diamantato a seguito di rottura*, Università di Pisa
- TARTAGNA M., INDRI M., CANALE M. – *Controlli Automatici* – Politecnico di Torino

### **Norme Citate**

- NORMA ITALIANA – Decreto Legislativo 81/08 e s.m.i: *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*
- NORMA ITALIANA – Decreto Legislativo 17/10 e s.m.i: *Direttiva macchine*
- NORMA EUROPEA UNI EN 13236:2016: *Requisiti di sicurezza per prodotti superabrasivi*
- NORMA EUROPEA UNI EN 15163:2017: *Macchine e impianti per l'estrazione e la lavorazione delle pietre naturali – Sicurezza – Requisiti per le tagliatrici a filo diamantato*
- NORMA EUROPEA UNI EN 13849-1:2016: *Sicurezza del macchinario – Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza – Parte 1: Principi generali per la progettazione*
- NORMA EUROPEA UNI EN 12385-4:2008: *Funi di acciaio - Sicurezza - Parte 4: Funi a trefoli per usi generali nel sollevamento*
- NORMA EUROPEA UNI EN ISO 6507-1:2006: *Prove di microdurezza Vickers*

### **Siti internet consultati**

[www.pruneta.com/it/la-geologia-delle-alpi-apuane/](http://www.pruneta.com/it/la-geologia-delle-alpi-apuane/)

[www.palmerio.com](http://www.palmerio.com)

[www.aliotogroup.com](http://www.aliotogroup.com)

[www.lochtmans.it](http://www.lochtmans.it)

[www.apuaniacorsi.com](http://www.apuaniacorsi.com)

[www.atlascopco.com](http://www.atlascopco.com)

[www.regione.toscana.it](http://www.regione.toscana.it)

[www.teci.it](http://www.teci.it)

[www.ladispe.polito.it/corsi/contrautoinf270/](http://www.ladispe.polito.it/corsi/contrautoinf270/)

[www.corsiadistanza.polito.it/on-line/FdA/index.htm](http://www.corsiadistanza.polito.it/on-line/FdA/index.htm)

[www.allemano.it](http://www.allemano.it)

[www.ni.com](http://www.ni.com)

[www.siemens.com](http://www.siemens.com)

## ALLEGATO 1

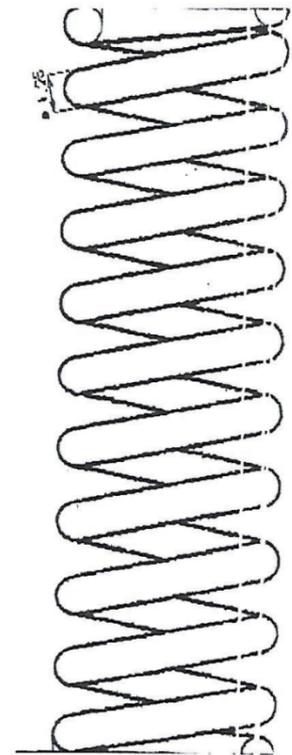
Schede tecniche componenti del filo diamantato

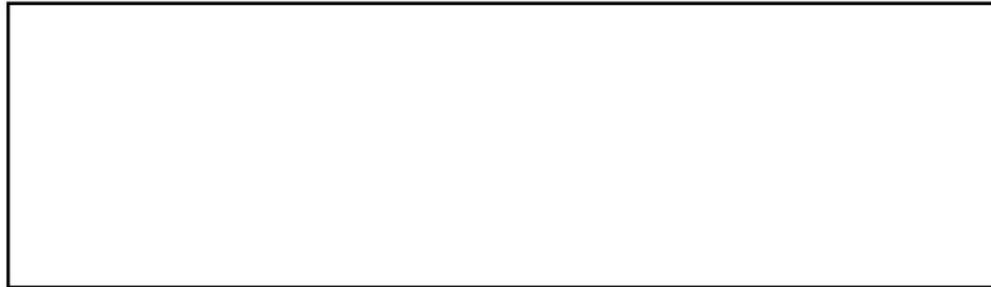
Scheda tecnica molle distanziatrici



### Molle

Lunghezza standard 12-15-20-25-30  
diametro standard filo 1,25  
diametro su richiesta 0,8 -1- 1,3-1,4  
sacchetto nr 5000 pz  
scatola nr 10.000 pz





DENOMINAZIONE DEL PRODOTTO		QUANTITA':	DISEGNO N°	
<u>MOLLA</u>			[ ]	
TIPO DI CONSEGNA		LOTTO N°:	MATERIALE	
<input type="checkbox"/> CAMPIONATURA <input checked="" type="checkbox"/> PRODUZIONE		9215	SH Ø 1,25 mm	
			VS ORDINE	
			N°: DEL:	

**CERTIFICAZIONE**

	CARATTERISTICHE CONTROLLATE	VALORI PRESCRITTI	TOLLERANZA			VALORI RISCONTRATI SU SINGOLI ELEMENTI
			INF.	NOM.	SUP.	
1	DIAMETRO FILO	1,25 mm		1,25		1,25
2	DIAMETRO L'INTERNO	7,00 mm	7,70	7,50		7,78 7,78 7,80 7,79 7,78
3	NUMERO SPIRE	7		7		7
4	LUNGHEZZA LIBERA	25,00 mm		35,00	25,30	25,18 25,18 25,20 25,23 25,20
5	SENSO ELICA	DESTRO				DESTRO
6	PASSO	4,25				4,25
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						

RELAZIONI ALLEGATE:  CERTIFICATO DEL TRATTAMENTO SUPERFICIALE ESEGUITO  
 ALTRO.....

**DICHIARAZIONE DI CONFORMITA' DEL PRODOTTO**  
 LA CONFORMITA' DELLE FORNITURE ALLE PRESCRIZIONI (CONTENUTE NEI DISEGNI CAPTOI ALL CAMPIONI NORME TECNICI)  
 ASSICURATA DA SISTI MATRICI CONTROLLA CUI IL PRODOTTO VIENE SOTTOPOSTO





DENOMINAZIONE DEL PRODOTTO		QUANTITA':	DISEGNO N°
<u>MOLLA</u>			<div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>
TIPO DI CONSEGNA		LOTTO N°:	MATERIALE
<input type="checkbox"/> CAMPIONATURA		<b>12015</b>	SH Ø 1,25 mm
<input checked="" type="checkbox"/> PRODUZIONE			VS ORDINE
		N°:	
		DEL:	

**CERTIFICAZIONE**

	CARATTERISTICHE CONTROLLATE	VALORI PRESCRITTI	TOLLERANZA			VALORI RISCONTRATI SU SINGOLI ELEMENTI
			INF.	NOM.	SUP.	
1	DIAMETRO ESTERNO	1,25 mm		1,25		1,25
2	DIAMETRO INTERNO	7,00 mm	7,70	7,80		7,78 7,80 7,78 7,77 7,80
3	NUMERO SPIRE	5,80	5,70	5,80		5,75
4	LUNGHEZZA LIBERA	20,00 mm		20,00	20,30	20,30 20,25 20,30 20,30 20,20
5	SENSO ELICA	DESTRO				DESTRO
6	PASSO	4,25				4,25
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						

RELAZIONI ALLEGATE:  CERTIFICATO DEL TRATTAMENTO SUPERFICIALE ESEGUITO  
 ALTRO .....

**DICHIARAZIONE DI CONFORMITA' DEL PRODOTTO**  
 LA CONFORMITA' DELLE FORNITURE ALLE PRESCRIZIONI (CONTENUTE NEI DISEGNI, CAPITOLI ALI, CAMPIONI, NORME, ETC.) E' ASSICURATA DA SISTEMATICI CONTROLLI A CUI IL PRODOTTO VIENE SOTTOPOSTO

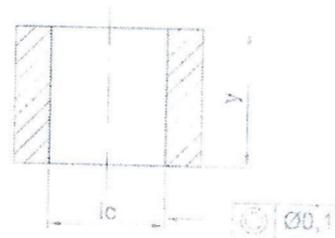
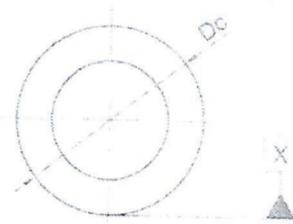


Scheda tecnica pressatori



**PRESSATORI ferro**

Lunghezza 6  
 diametro esterno 8 / 9 mm  
 diametro interno 5  
 terminali svasati  
 zincatura esterna  
 sacchetto nr 5000 pz



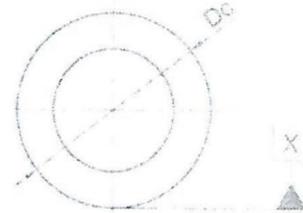
Chemická zloženie - <i>Chemical composition - Composizione chimica</i>		C	Mn	Si	P	S
[ % ]		[ % ]	[ % ]	[ % ]	[ % ]	[ % ]
Číslo typu artikulu číslo št. / kód	Prípisy - <i>Remarks - Note</i>					
	min					
	max	0,7	1,20	0,35	0,025	0,015
70072		0,17	0,40	0,22	0,007	0,011



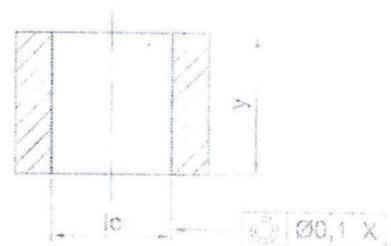
Scheda tecnica distanziali



DISTANZIALI. ferro



Lunghezza 3 / 4  
 diametro esterno 8 mm  
 diametro interno 5  
 terminali svasati  
 zincatura esterna  
 sacchetto nr 5000 pz



Chemische Analyse in %													
*)SA = Schmelzanalyse,DR = Stückanalyse													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V	W
SA*	0,0466	0,0440	0,3794	0,0104	0,0102	0,0231	0,0224	0,0157	0,0436	0,0019	0,0056	0,0019	0,0013
DR*													
	Sn	B	N	Nb	O	As	Sb	Zr	Pb	Co	Ca	Ta	H[ppm]
SA*	0,0012	0,0001	0,0060	0,0004		0,0034	0,0000		0,0009	0,0021	0,0035	0,0000	0,0000
DR*													

Ergebnis der Prüfungen										
	ReH [N/mm <sup>2</sup> ]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	A [%]	Z [%]	IST-Dim [mm]	Kernhärte	Härte-Temp. [°C]	Phosphatdicke [g/m <sup>2</sup> ]	Einformung [%]	Reinheitsgrad
Mittel	255	364	41,3	77,4						
Min										
Max										
					Umf [%]	Q-index	Korngröße	Rißtiefe	Entkohlung	Jominy



## ALLEGATO 2

Prove di sfilamento del pressatore, pressa manuale nuova.

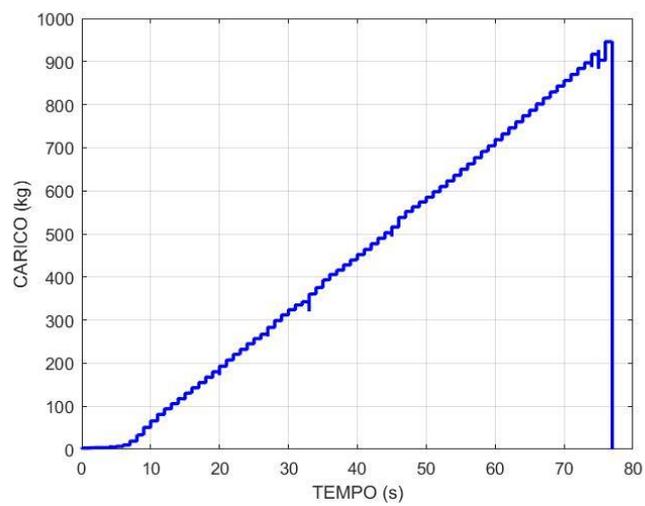


Figura A2.1: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 1

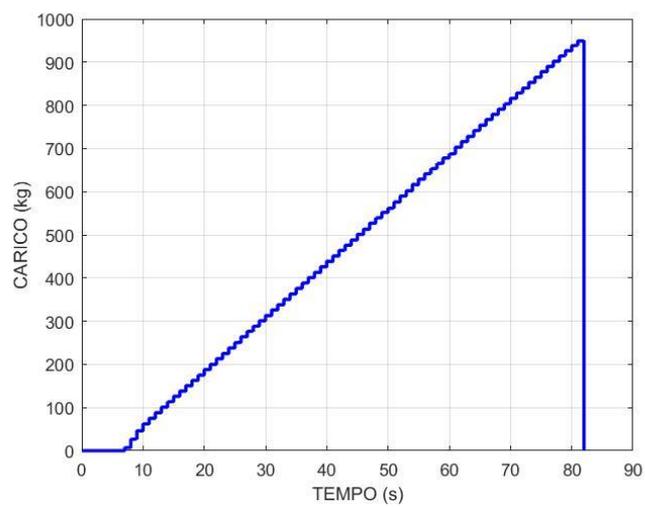


Figura A2.2: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 2

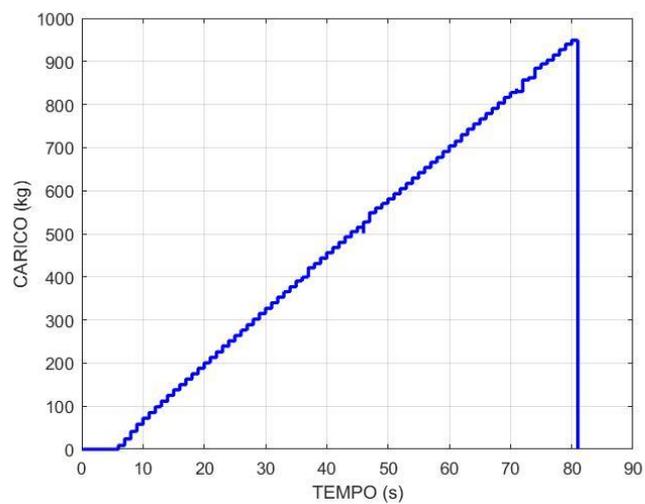


Figura A2.3: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 3

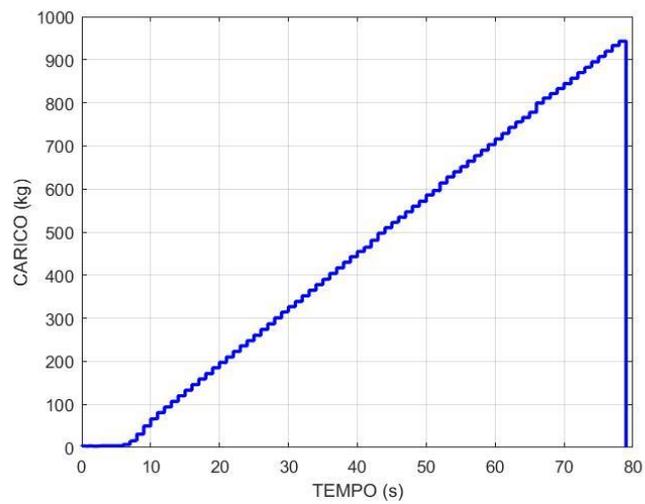


Figura A2.4: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 4

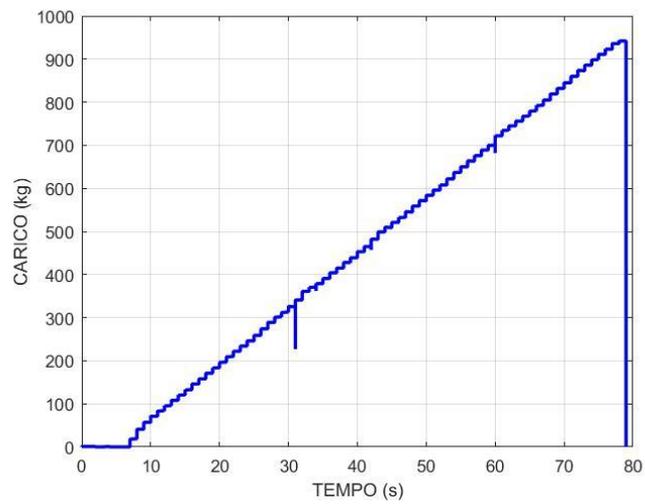


Figura A2.5: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 5

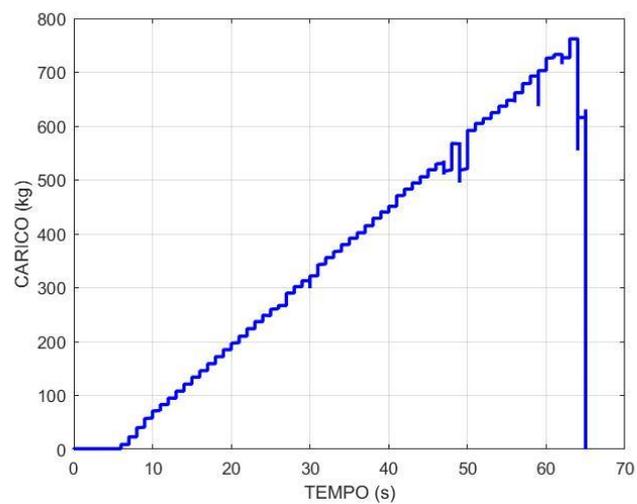


Figura A2.6: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 6

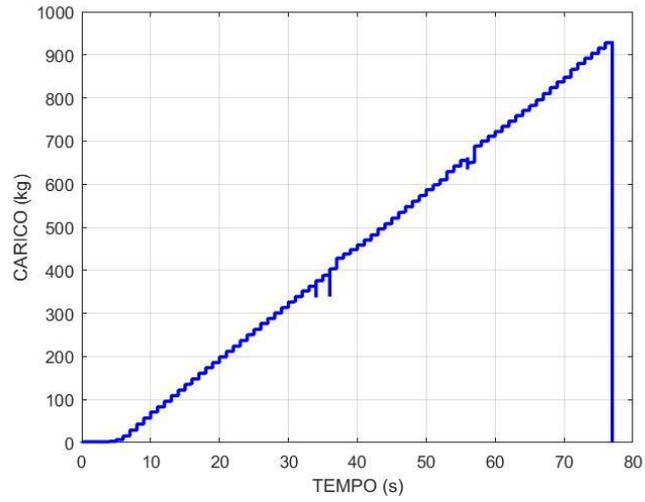


Figura A2.7: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 7

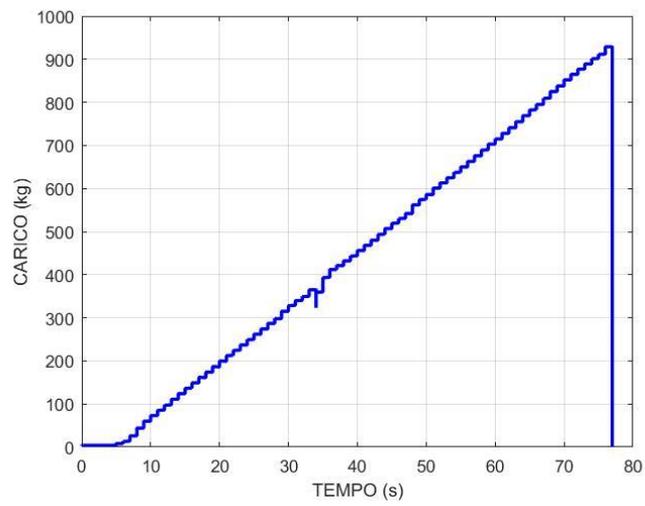


Figura A2.8: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 8

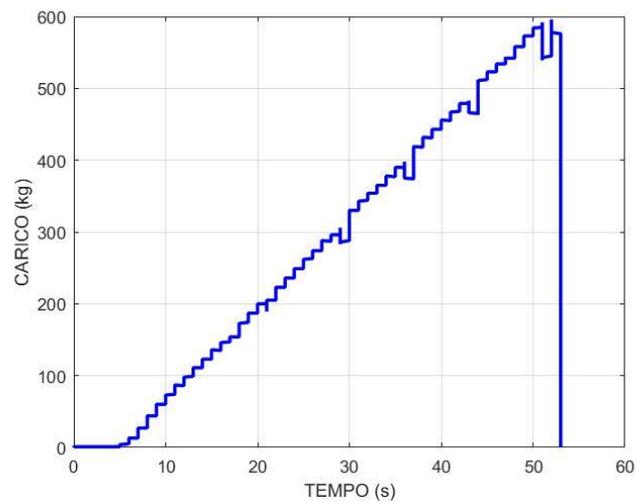


Figura A2.9: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 9

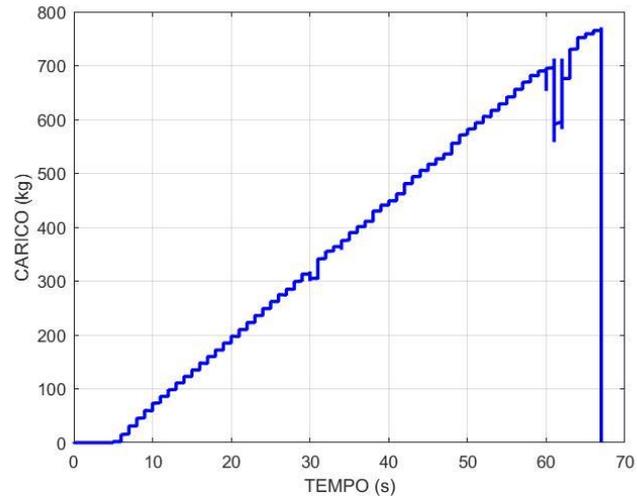


Figura A2.10: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 10

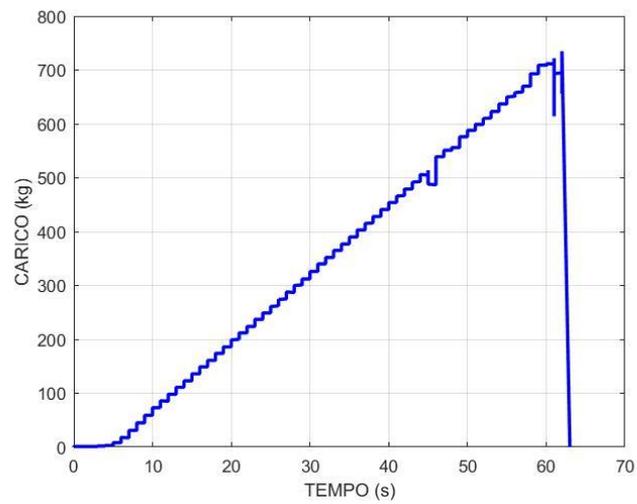


Figura A2.11: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 11

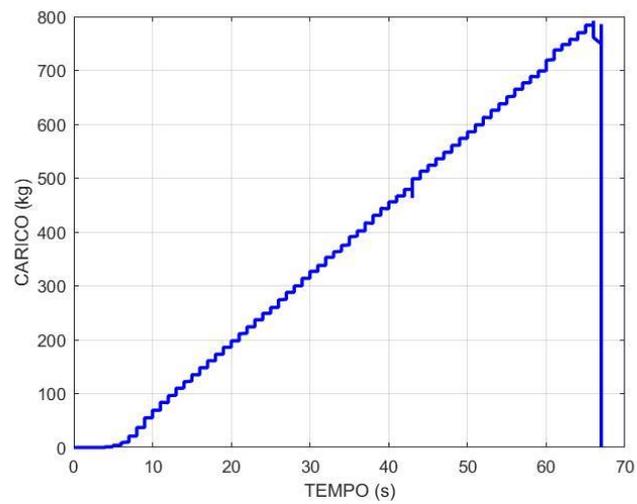


Figura A2.12: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 12

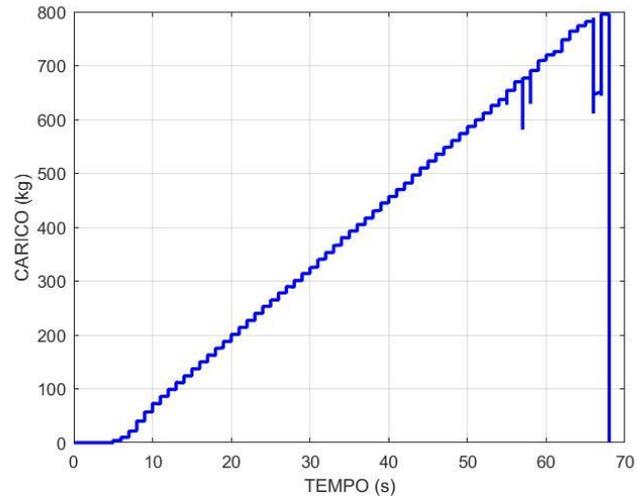


Figura A2.13: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 13

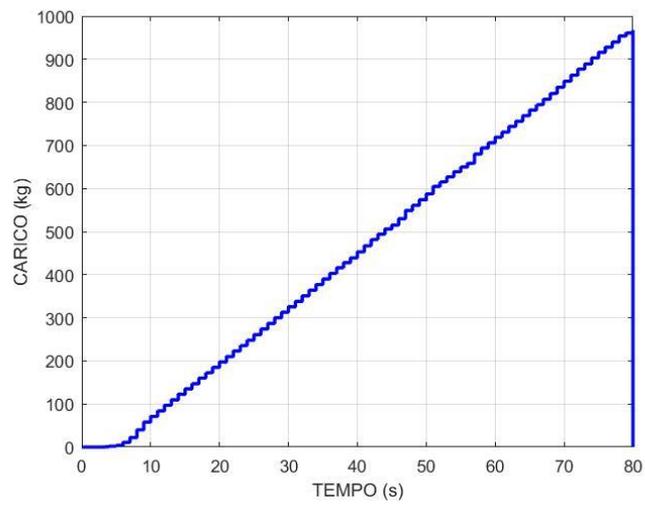


Figura A2.14: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 14

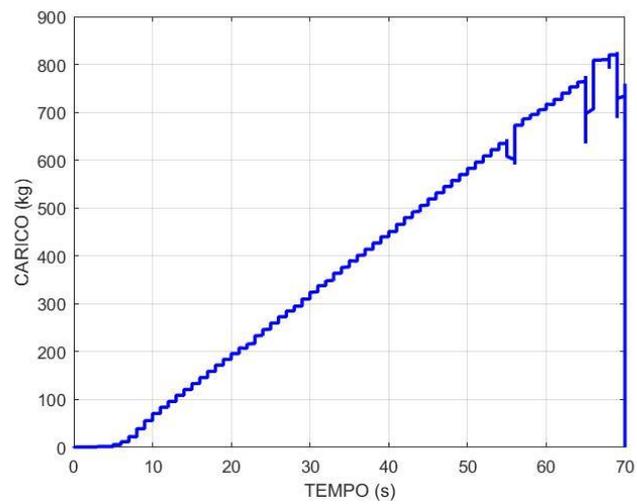


Figura A2.15: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 15

### ALLEGATO 3

Prove di sfilamento del pressatore, pressa manuale di cava: 3 mesi dall'ultima manutenzione (circa 200 pressate).

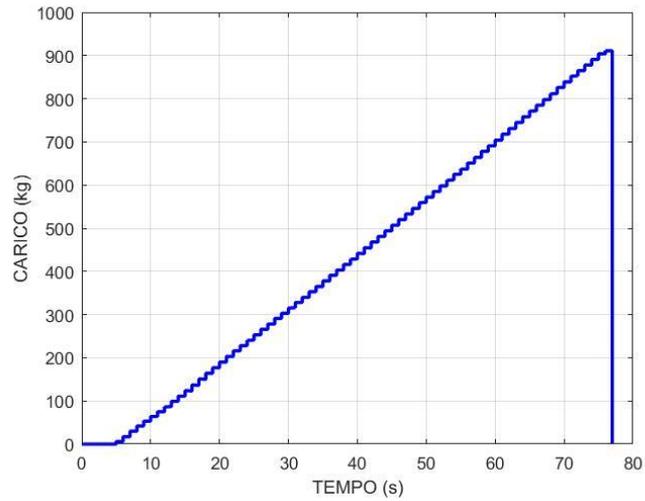


Figura A3.1: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 1

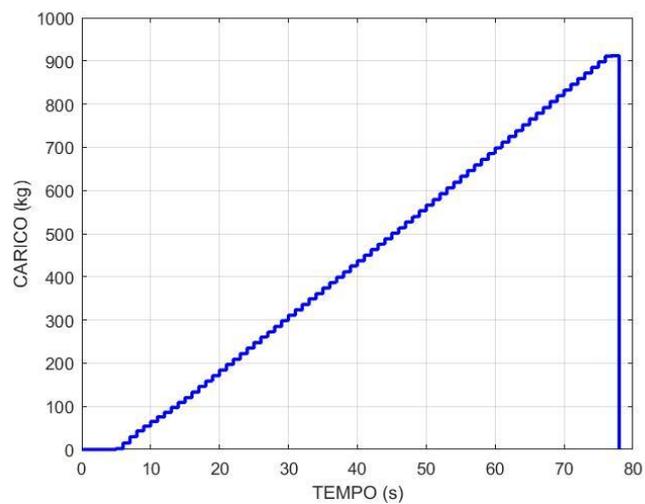


Figura A3.2: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 2

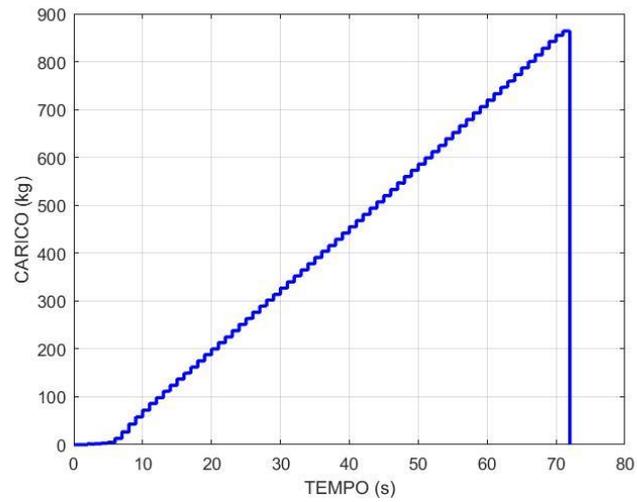


Figura A3.3: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 3

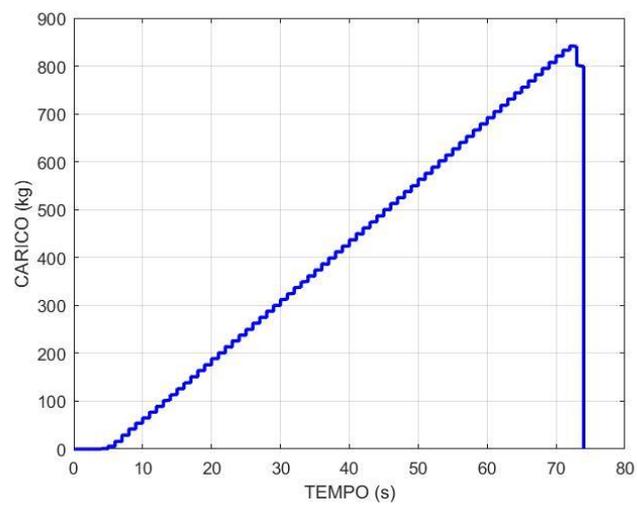


Figura A3.4: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 4

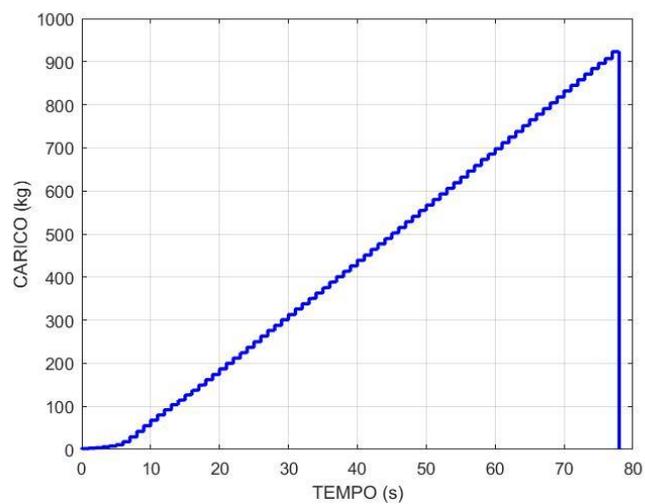


Figura A3.5: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 5

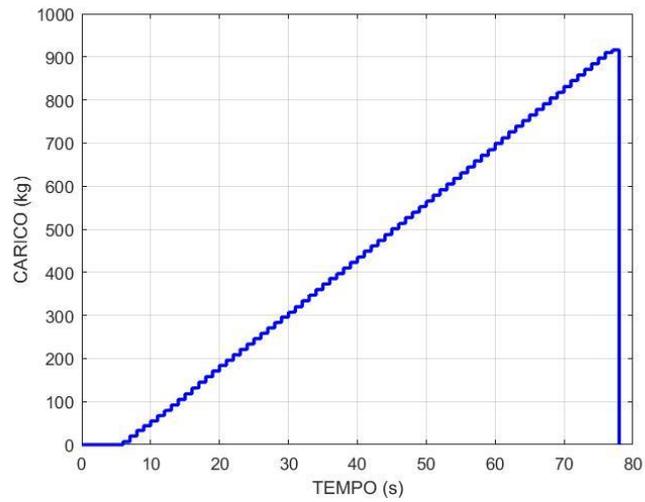


Figura A3.6: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 6

Prove di sfilamento del pressatore, pressa manuale di cava: 4 mesi dall'ultima manutenzione (circa 250 pressate).

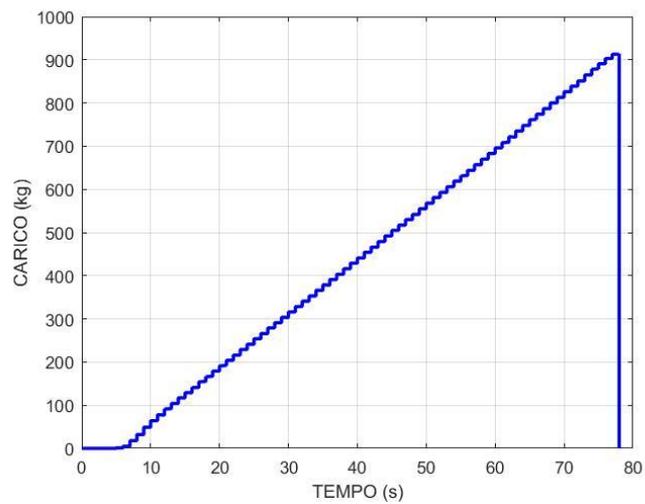


Figura A3.7: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 7

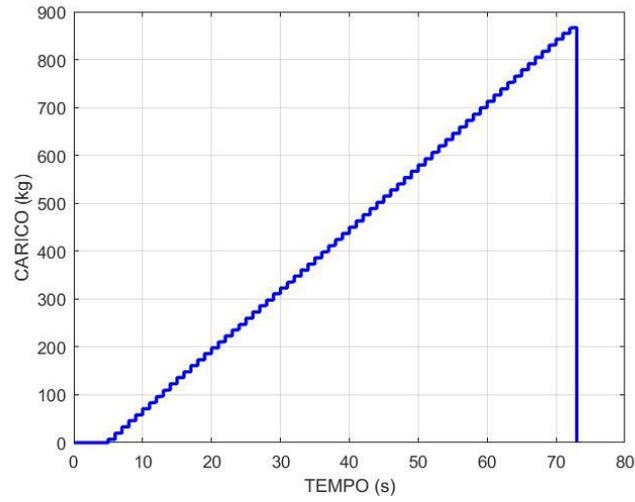


Figura A3.8: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 8

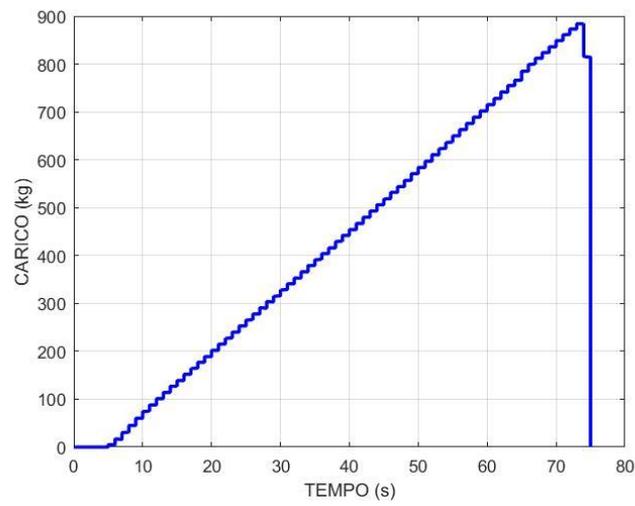


Figura A3.9: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 9

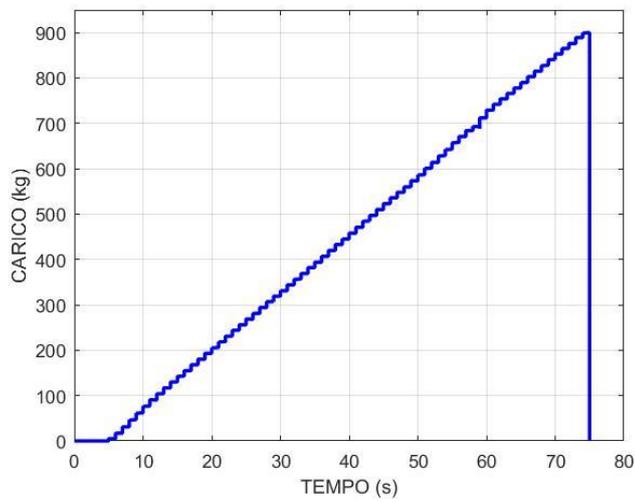


Figura A3.10: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 10

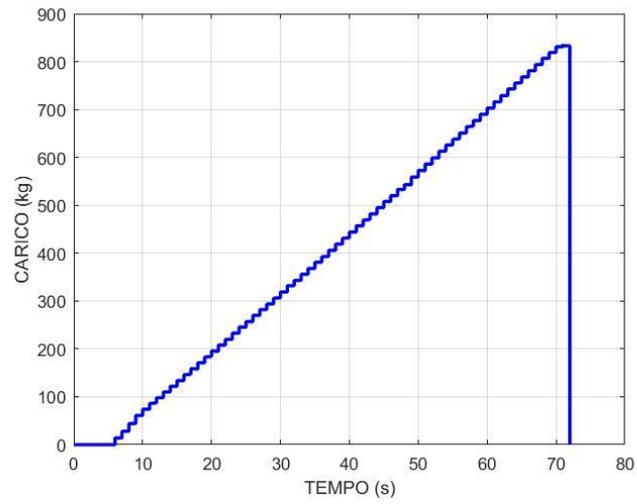


Figura A3.11: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 11

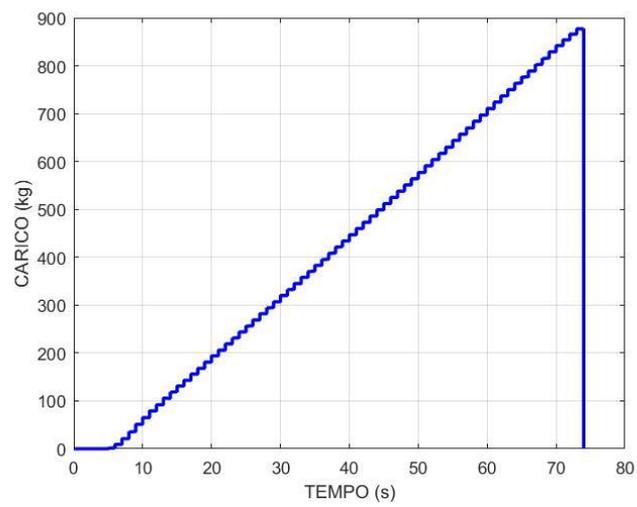


Figura A3.12: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento pressatore, provino 12

## ALLEGATO 4

Prove di sfilamento del morsetto di giunzione in acciaio 9 x 20 mm, pressa manuale nuova.

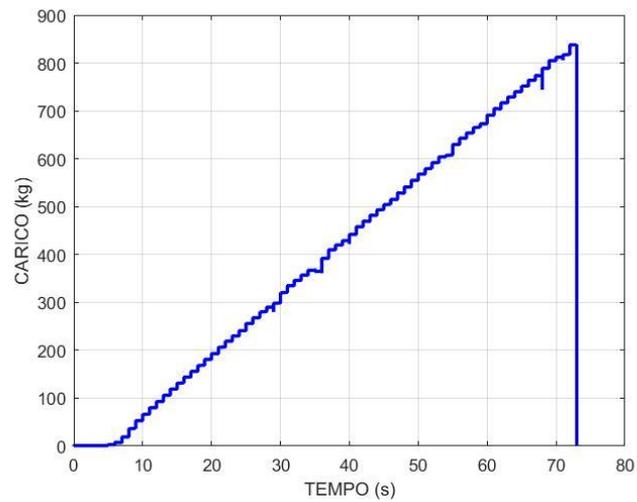


Figura A4.1: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 1

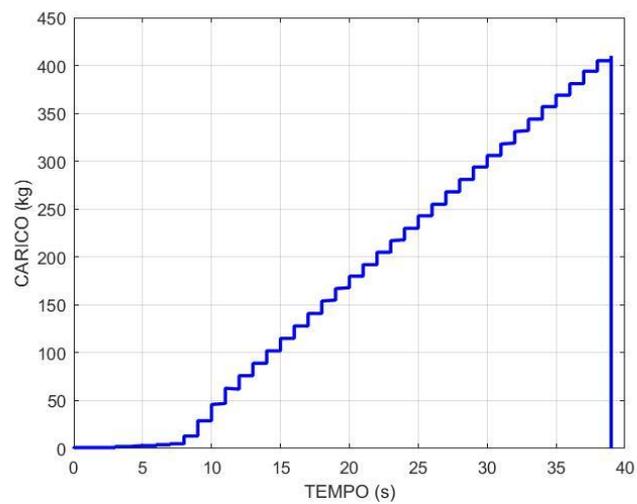


Figura A4.2: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 2

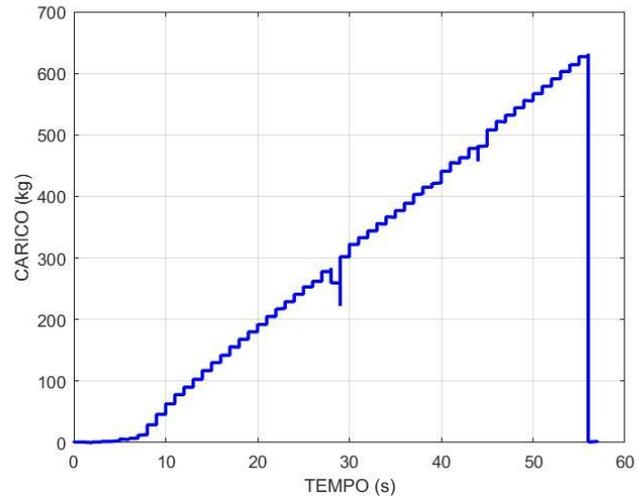


Figura A4.3: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 3

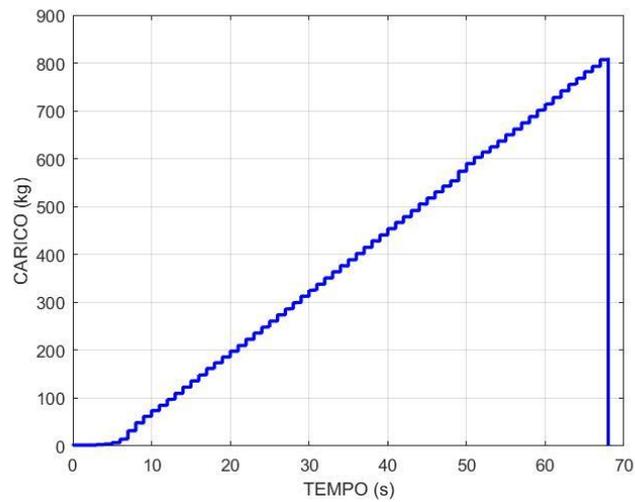


Figura A4.4: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 4

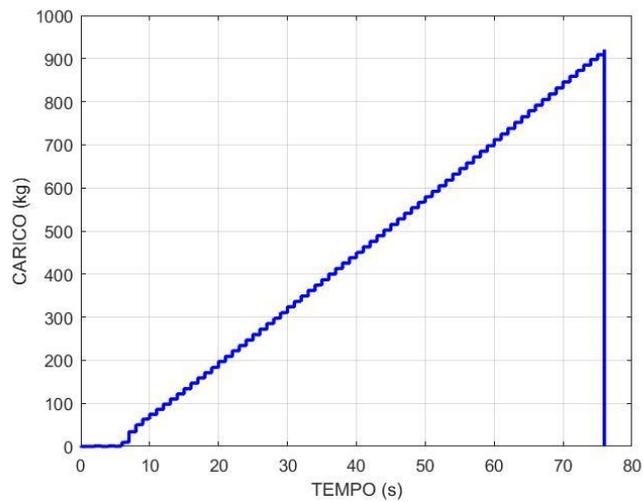


Figura A4.5: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 5

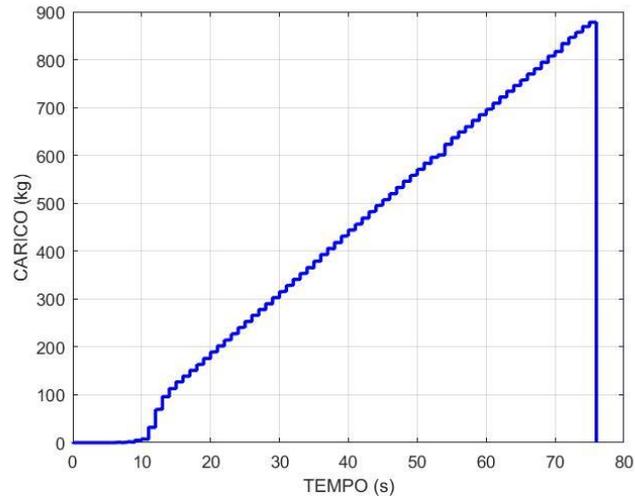


Figura A4.6: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 6

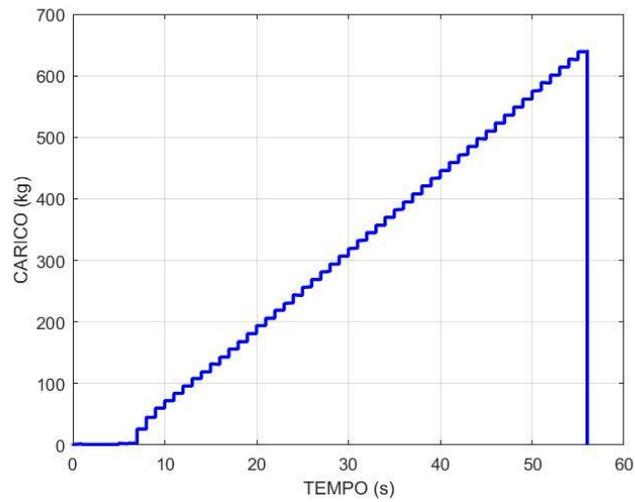


Figura A4.7: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 7

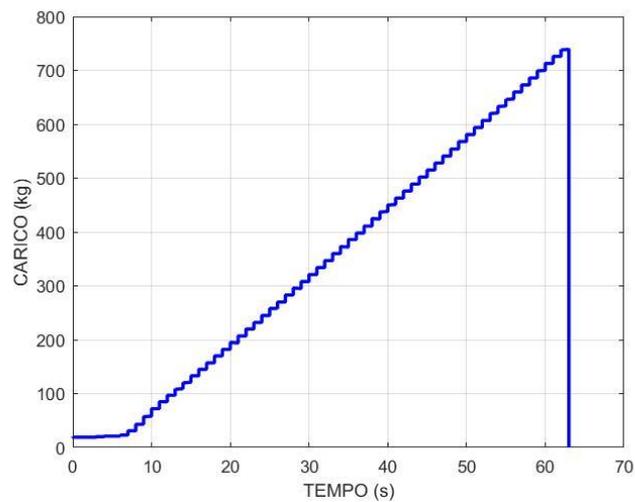


Figura A4.8: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 8

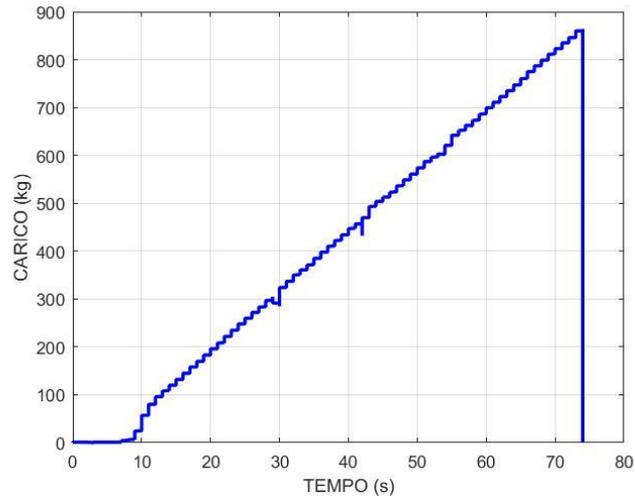


Figura A4.9: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 9

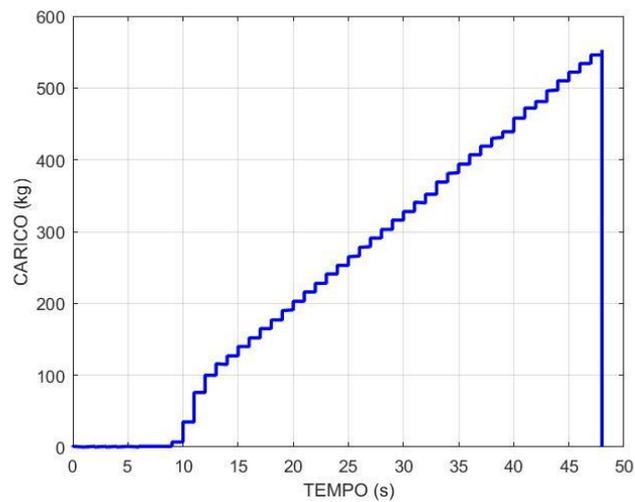


Figura A4.10: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 10

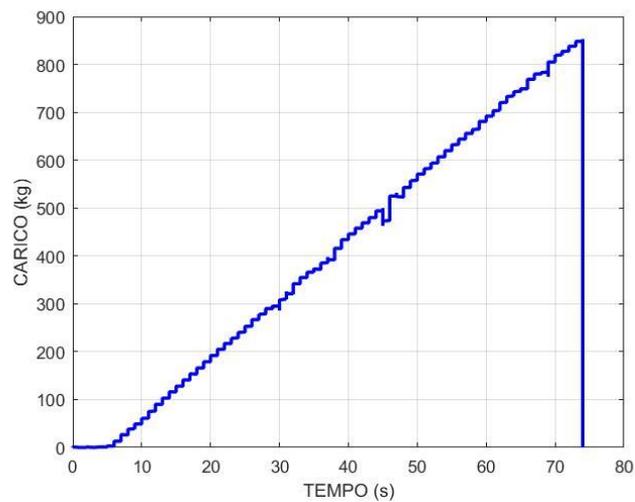


Figura A4.11: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 11

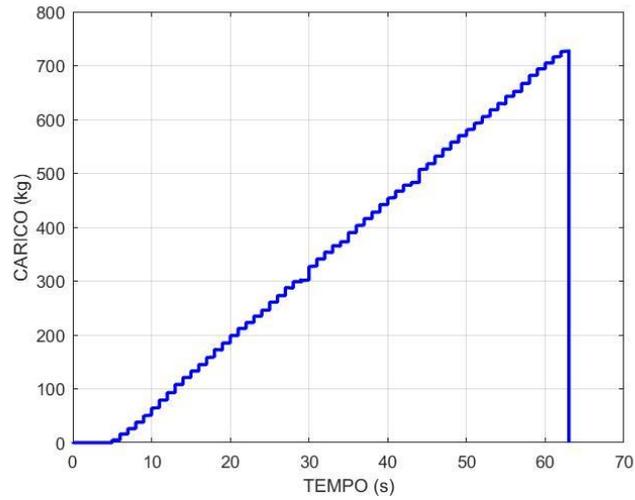


Figura A4.12: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 12

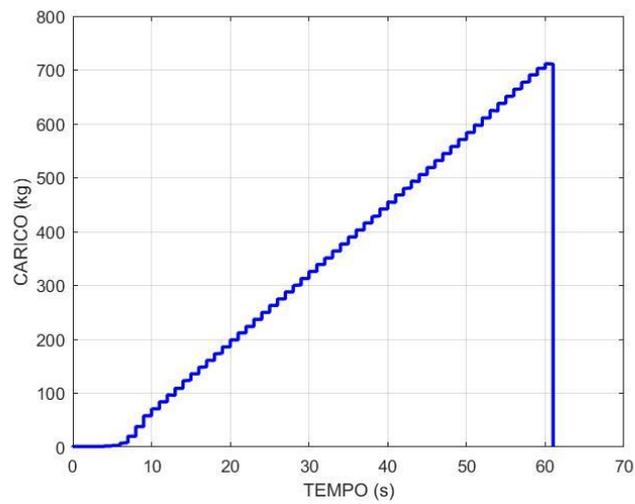


Figura A4.13: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 13

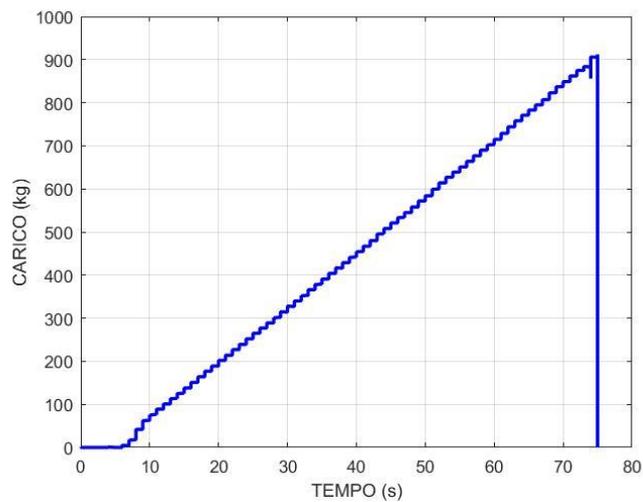


Figura A4.14: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 14

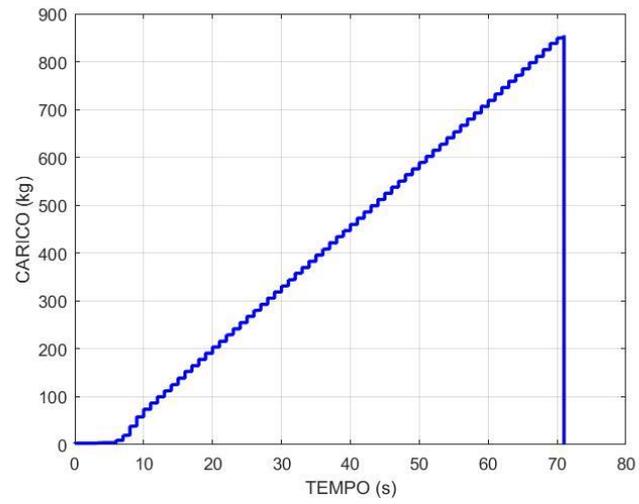


Figura A4.15: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x20 (mm), provino 15

ALLEGATO 5

Prove di sfilamento del morsetto di giunzione in acciaio 9 x 25 mm, pressa manuale nuova.

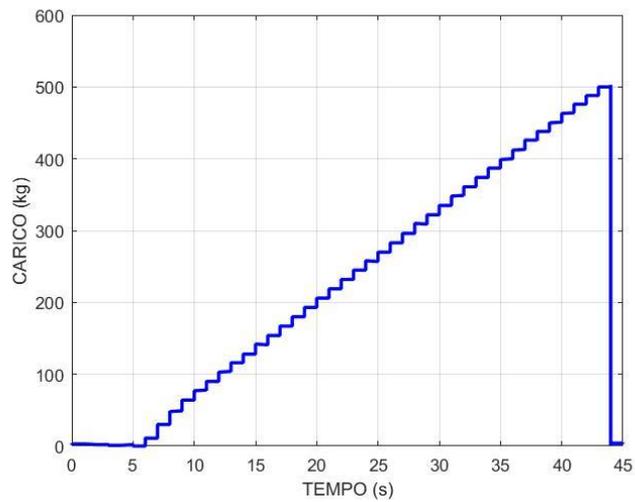


Figura A5.1: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 1

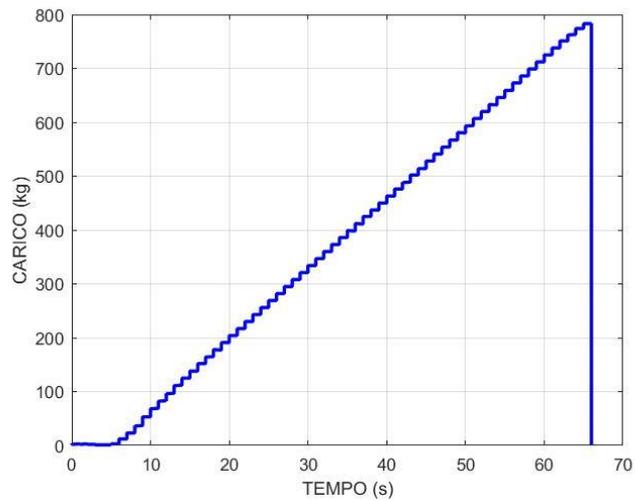


Figura A5.2: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 2

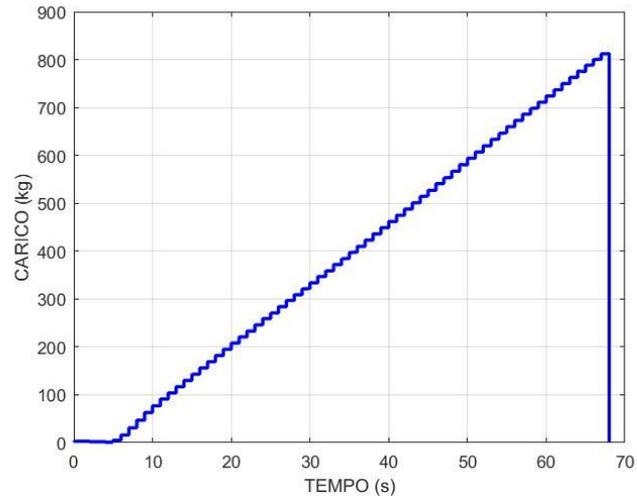


Figura A5.3: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 3

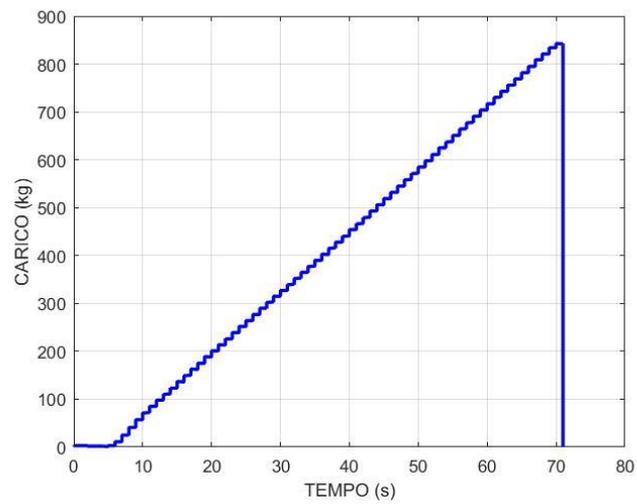


Figura A5.4: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 4

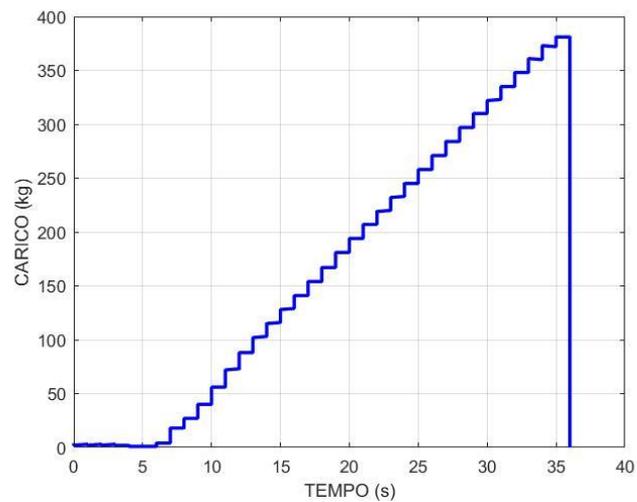


Figura A5.5: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 5

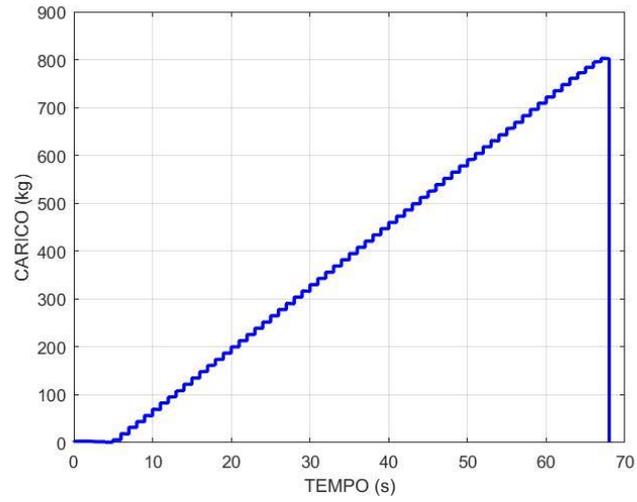


Figura A5.6: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 6

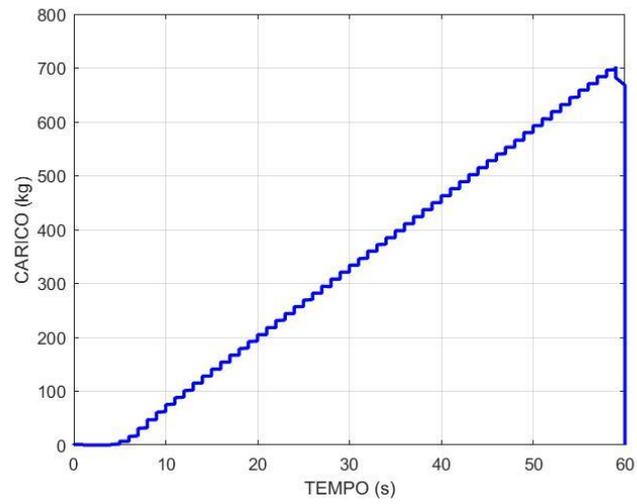


Figura A5.7: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 7

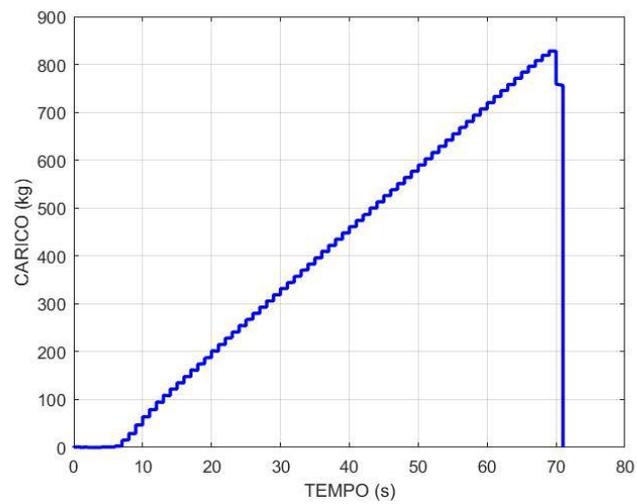


Figura A5.8: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 8

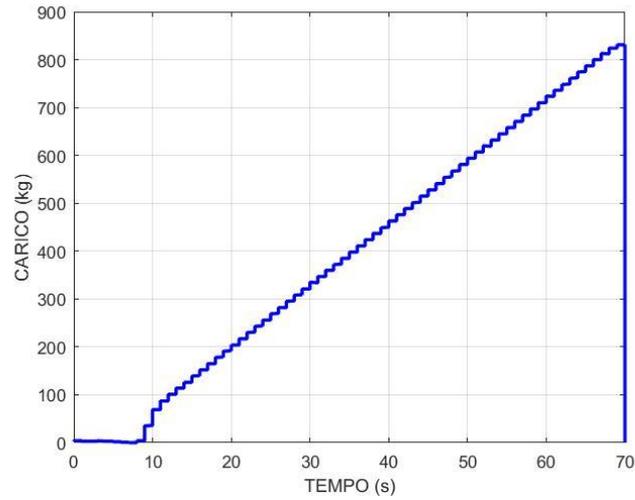


Figura A5.9: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 9

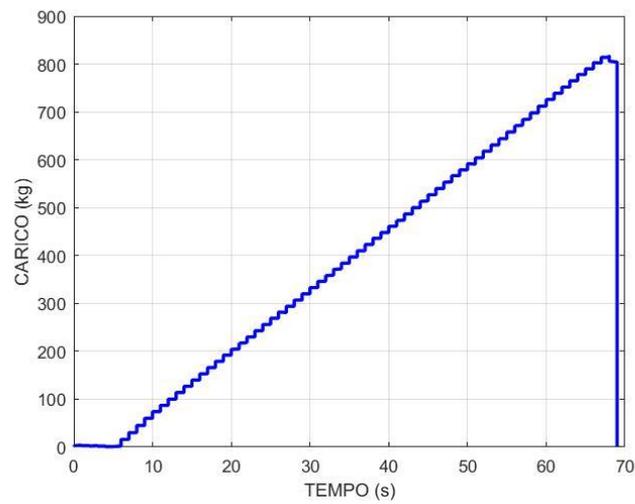


Figura A5.10: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 10

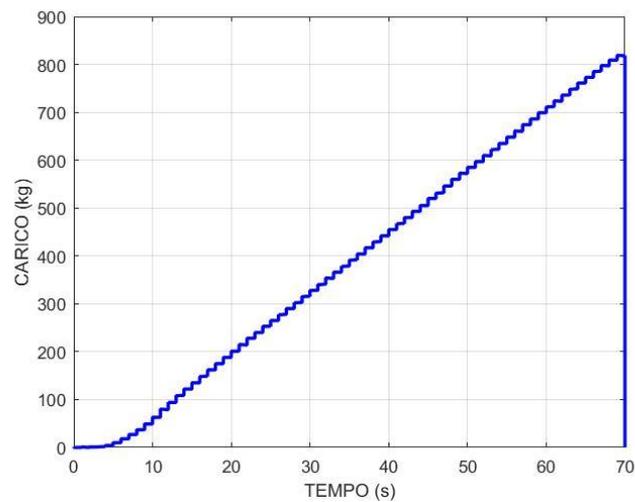


Figura A5.11: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 11

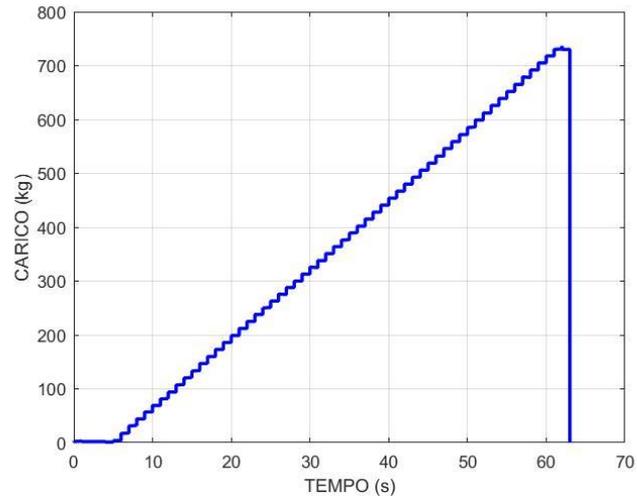


Figura A5.12: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 12

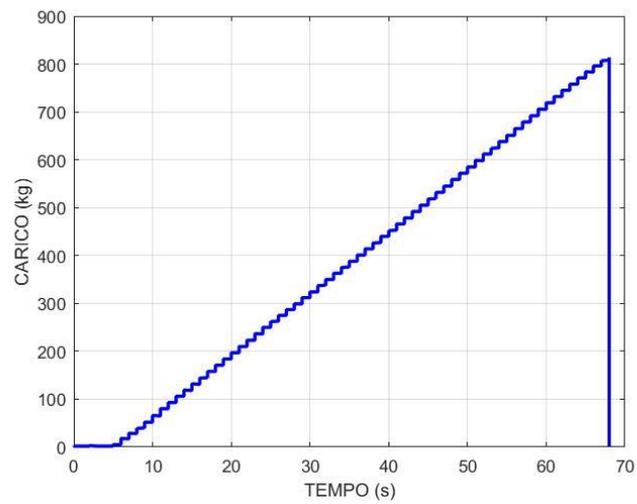


Figura A5.13: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 13

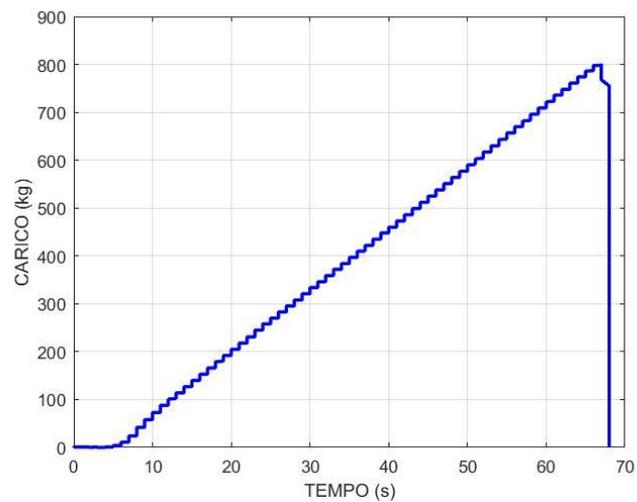


Figura A5.14: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 14

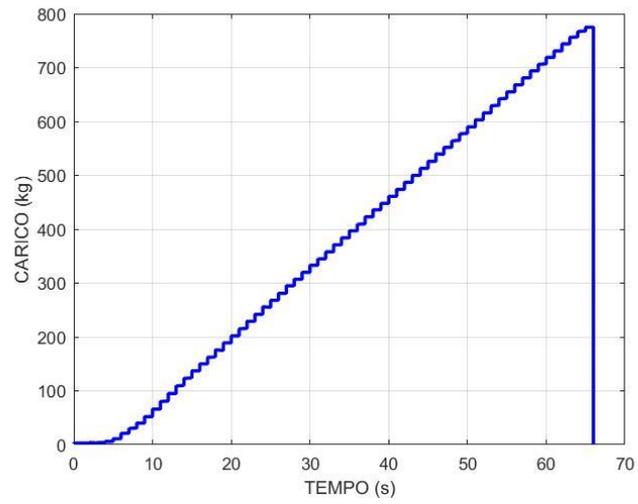


Figura A5.15: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), provino 15

## ALLEGATO 6

Prove di sfilamento del morsetto di giunzione in rame 9 x 30 mm, pressa manuale nuova.

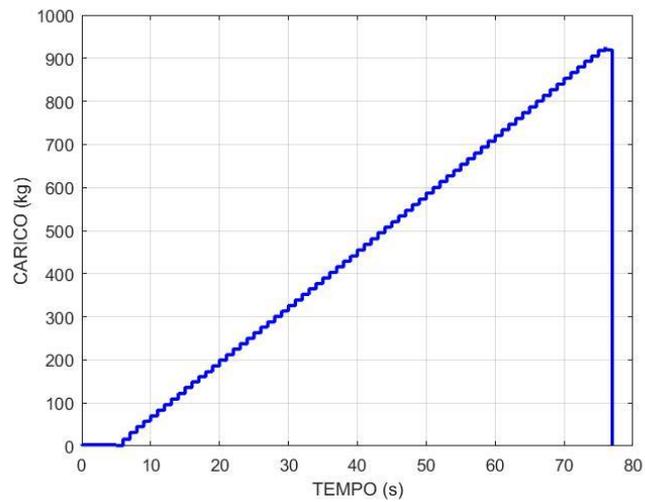


Figura A6.1: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 1

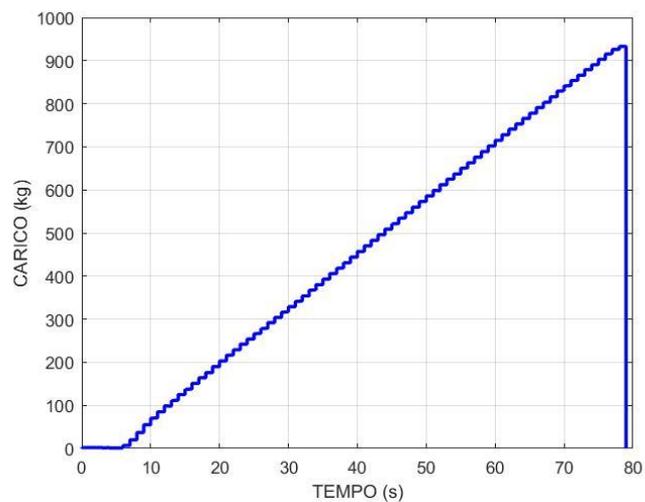


Figura A6.2: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 2

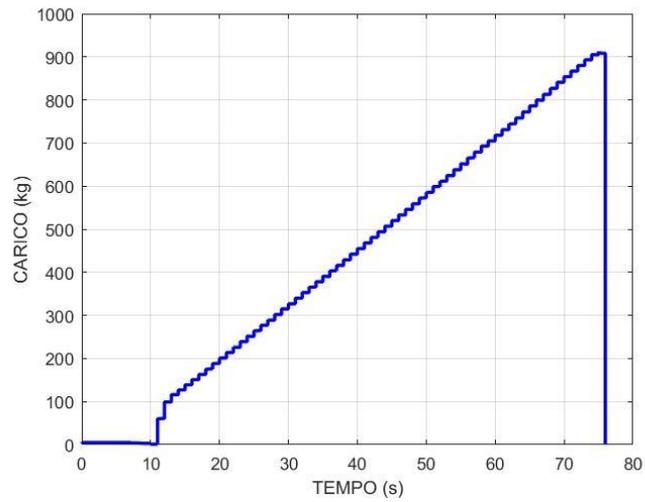


Figura A6.3: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 3

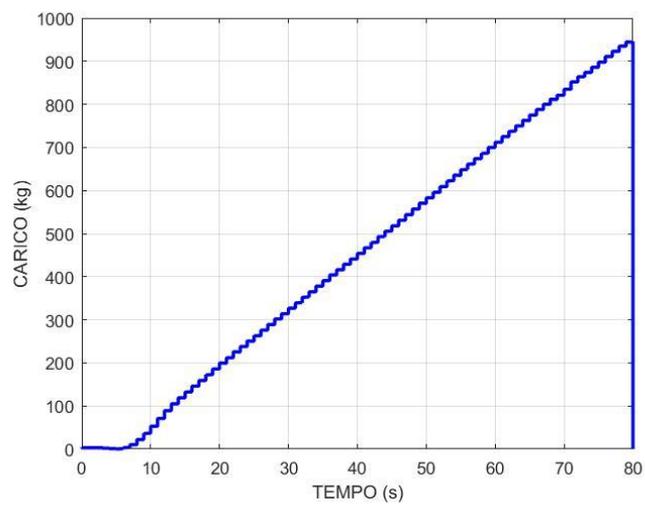


Figura A6.4: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 4

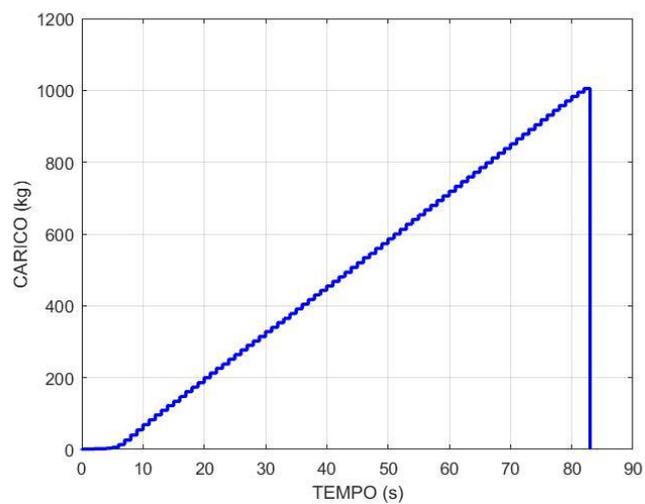


Figura A6.5: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 5

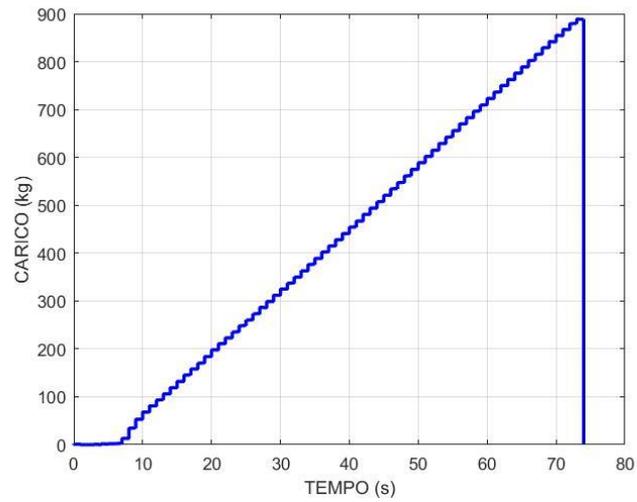


Figura A6.6: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 6

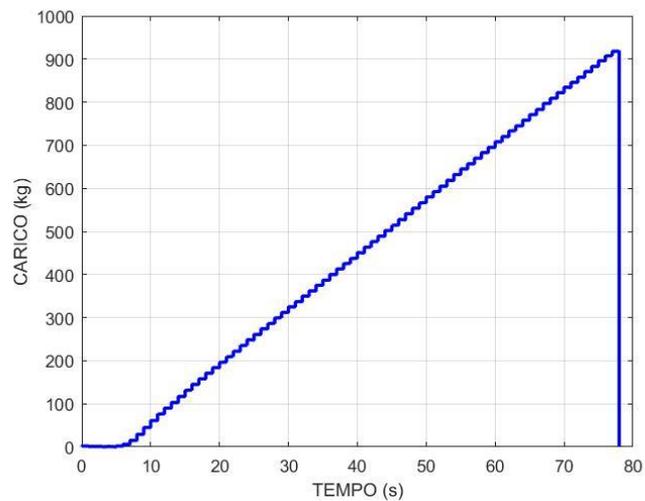


Figura A6.7: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 7

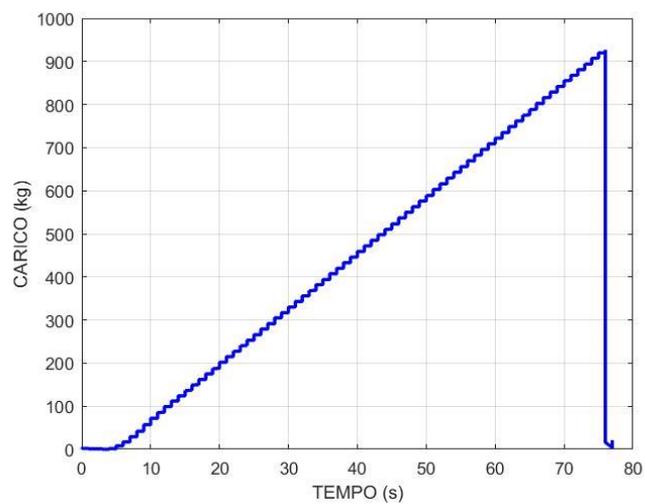


Figura A6.8: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 8

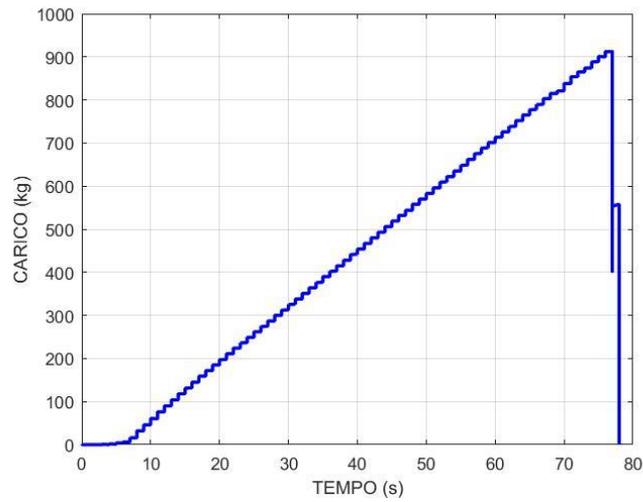


Figura A6.9: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 9

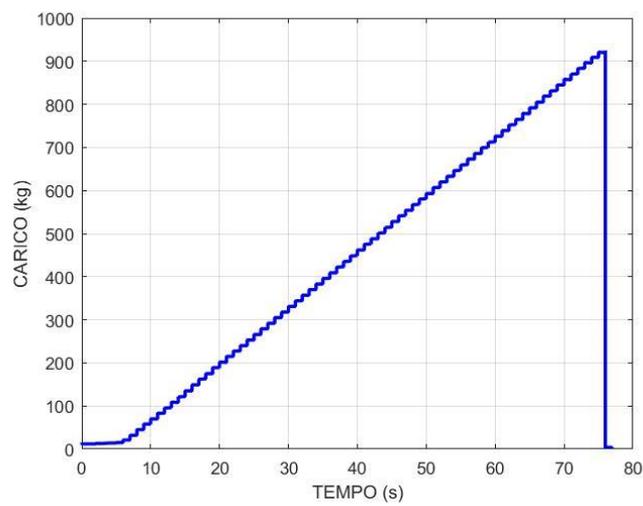


Figura A6.10: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 10

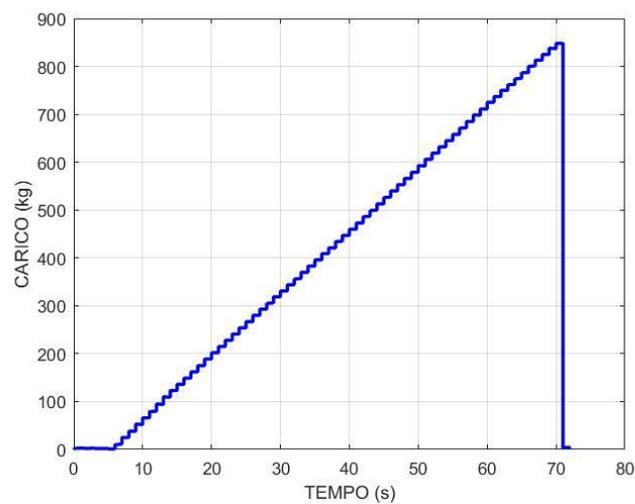


Figura A6.11: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 11

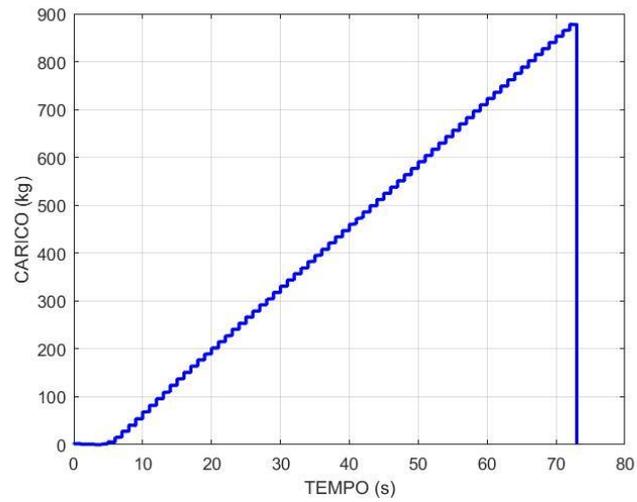


Figura A6.12: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 12

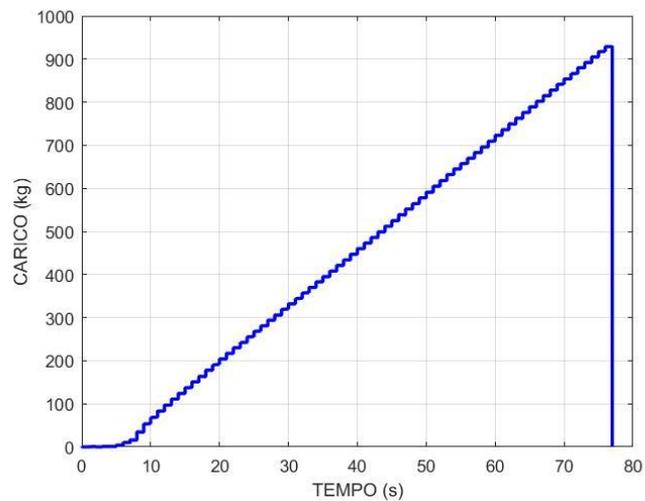


Figura A6.13: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 13

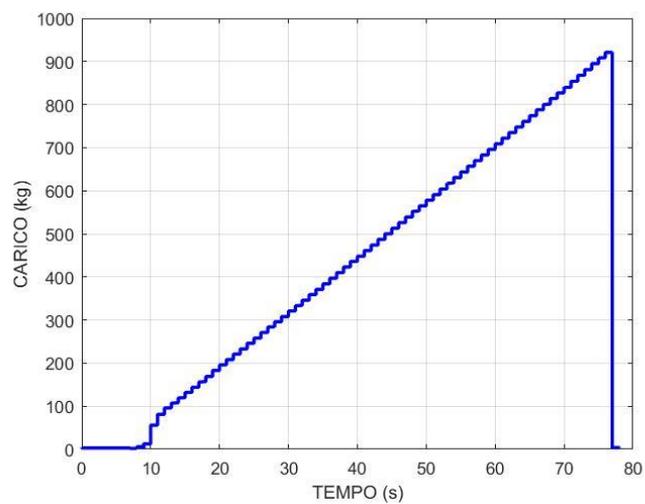


Figura A6.14: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 14

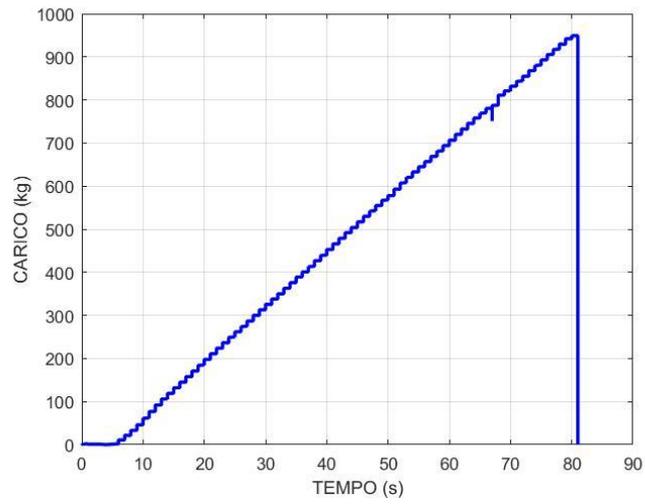


Figura A6.15: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), provino 15

ALLEGATO 7

Prove di sfilamento del morsetto di giunzione in acciaio “avvitabile” 9 x 25 mm, pressa manuale nuova.

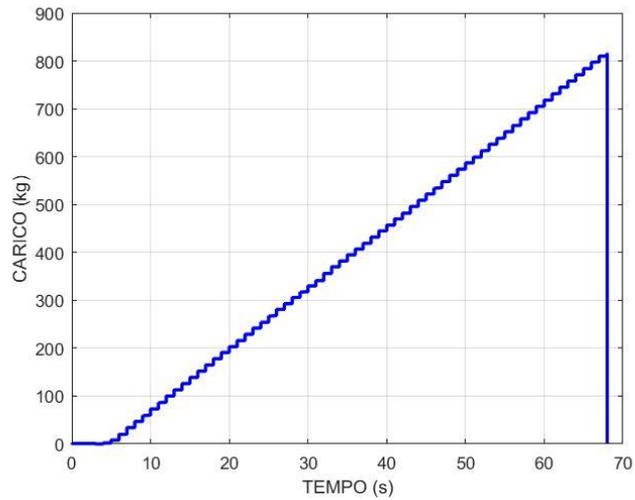


Figura A7.1: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio “avvitabile” 9x25 (mm), provino 1

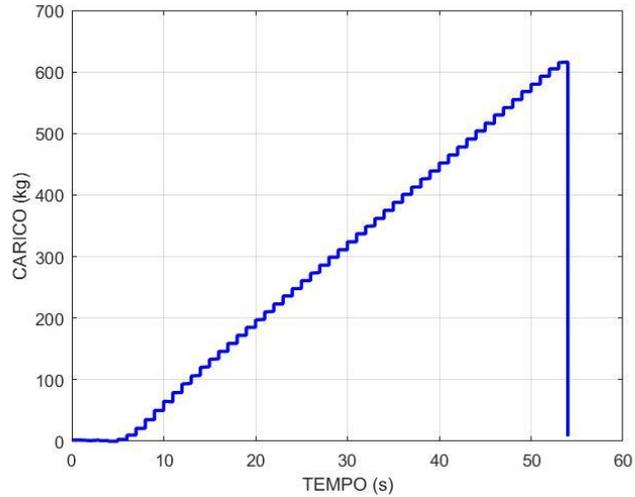


Figura A7.2: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio “avvitabile” 9x25 (mm), provino 2

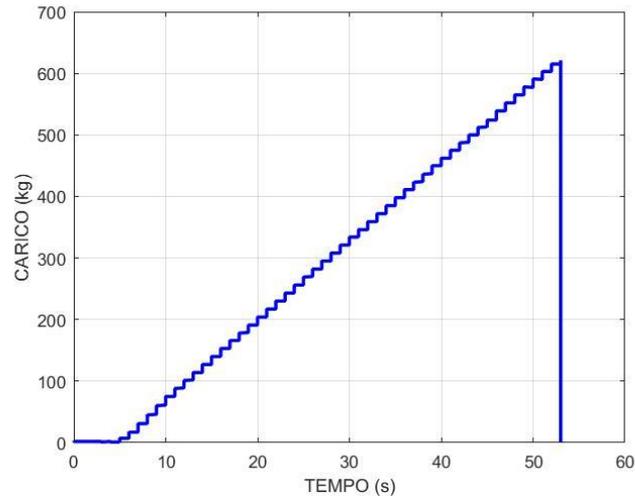


Figura A7.3: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio “avvitabile” 9x25 (mm), provino 3

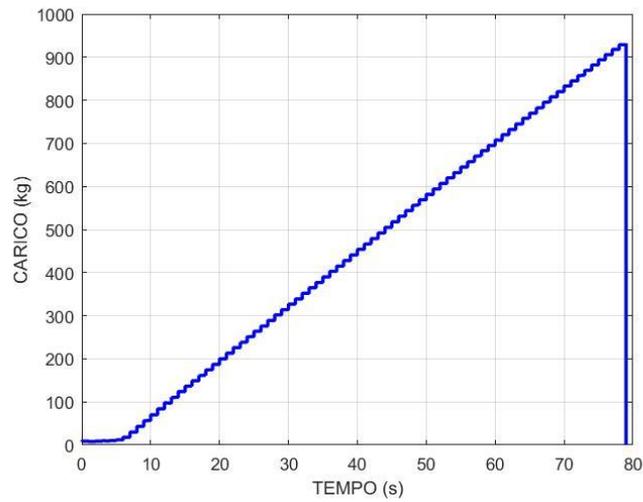


Figura A7.4: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio “avvitabile” 9x25 (mm), provino 4

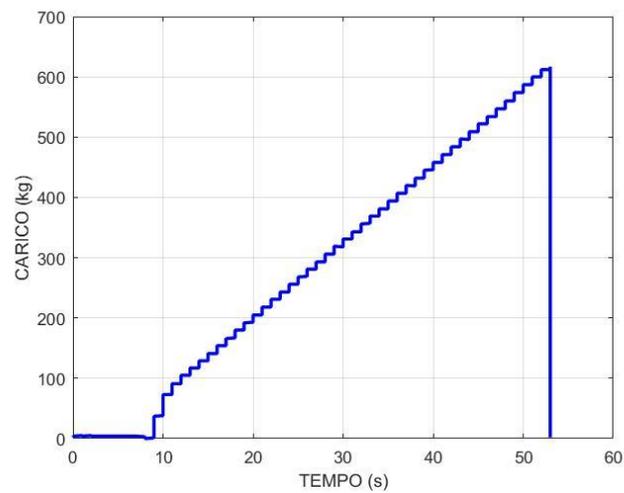


Figura A7.5: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio “avvitabile” 9x25 (mm), provino 5

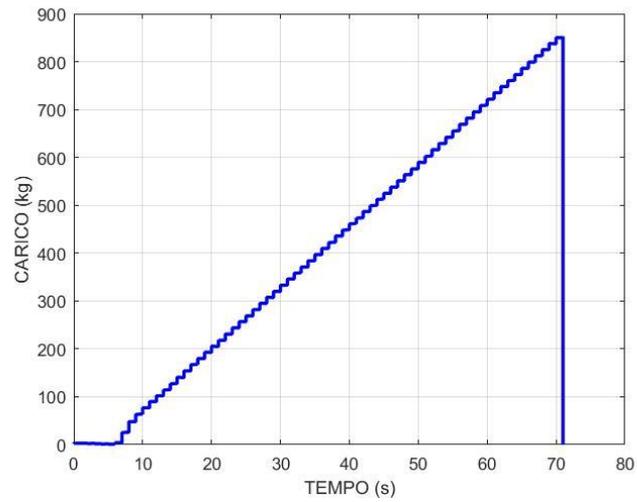


Figura A7.6: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio “avvitabile” 9x25 (mm), provino 6

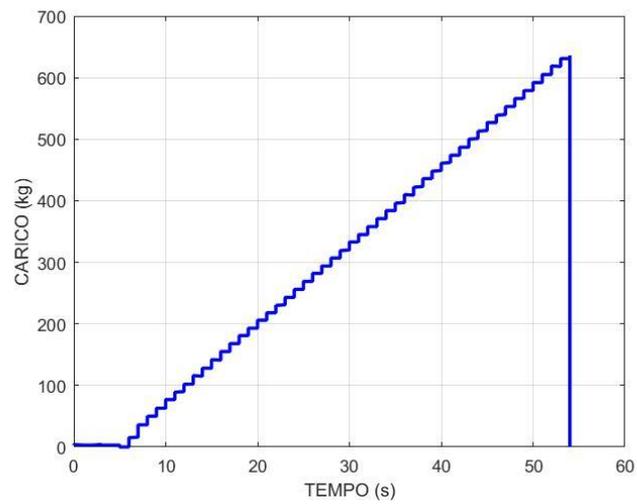


Figura A7.7: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio “avvitabile” 9x25 (mm), provino 7

## ALLEGATO 8

Prove di sfilamento del morsetto di giunzione in acciaio 9 x 25 mm, avendo effettuato una doppia pressatura agli estremi ed utilizzando la pressa manuale nuova.

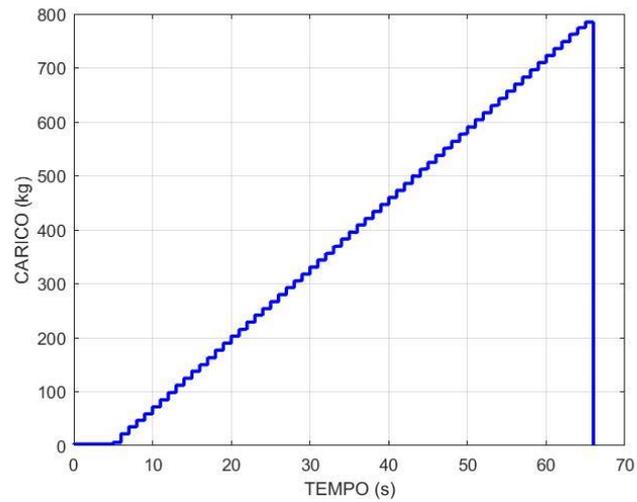


Figura A8.1: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), doppia pressatura, provino 1

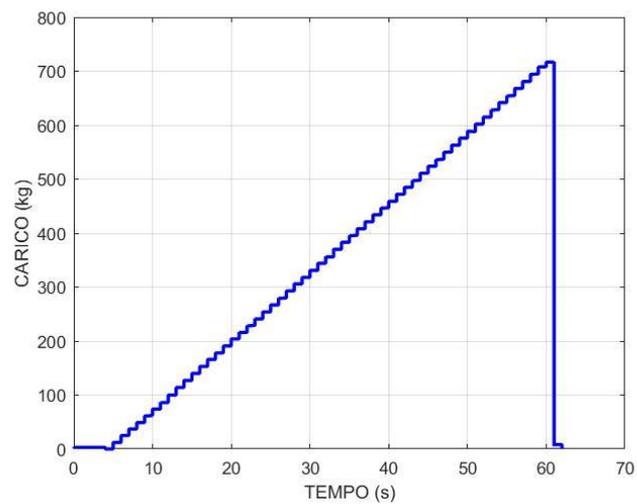


Figura A8.2: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), doppia pressatura, provino 2

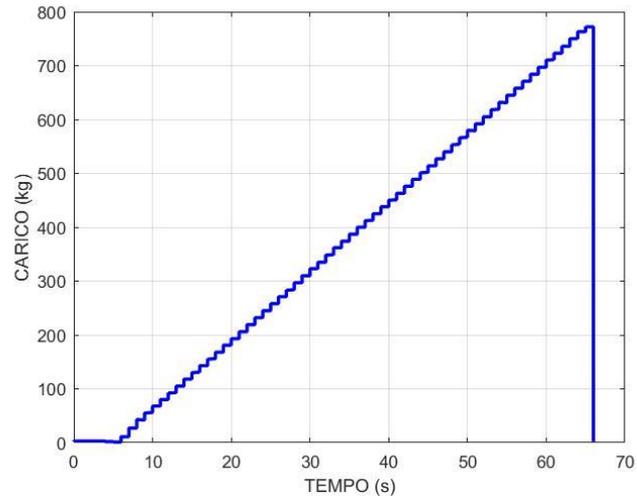


Figura A8.3: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), doppia pressatura, provino 3

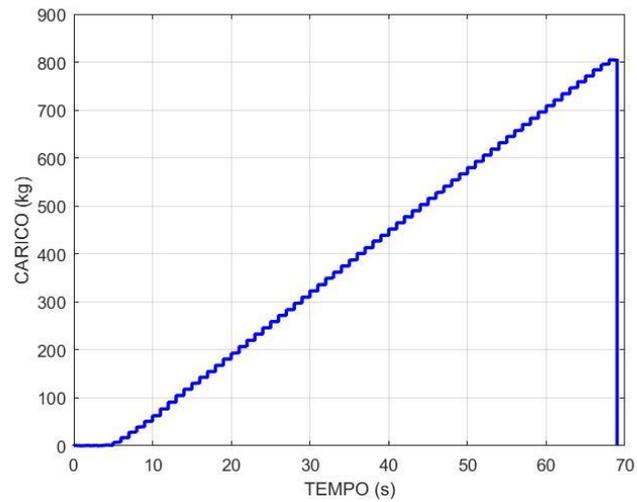


Figura A8.4: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), doppia pressatura, provino 4

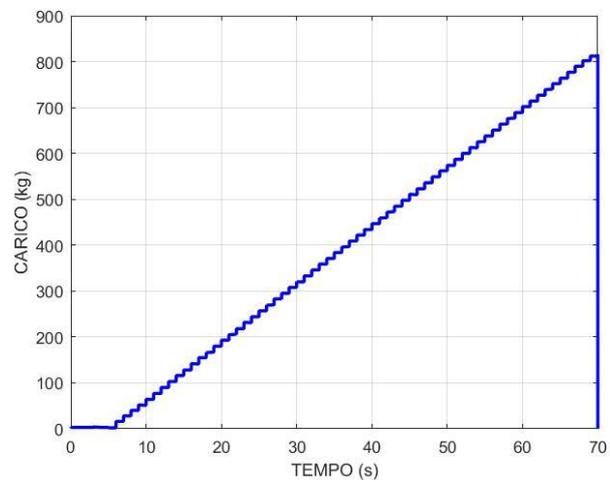


Figura A8.5: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione acciaio 9x25 (mm), doppia pressatura, provino 5

## ALLEGATO 9

Prove di sfilamento del morsetto di giunzione in rame 9 x 30 mm, avendo effettuato una doppia pressatura agli estremi ed utilizzando la pressa manuale nuova.

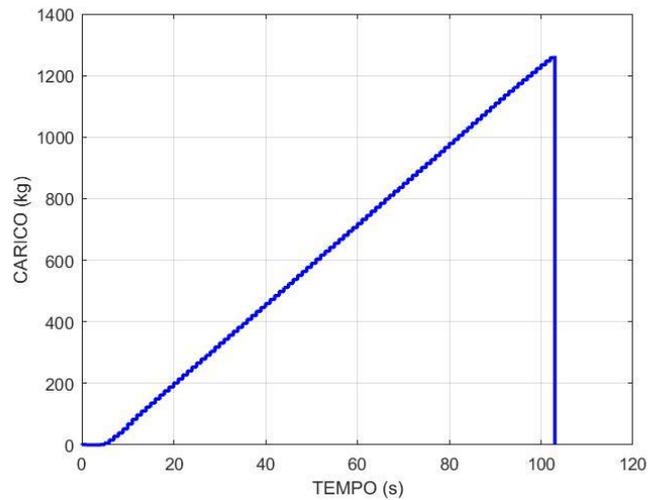


Figura A9.1: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), doppia pressatura, provino 1

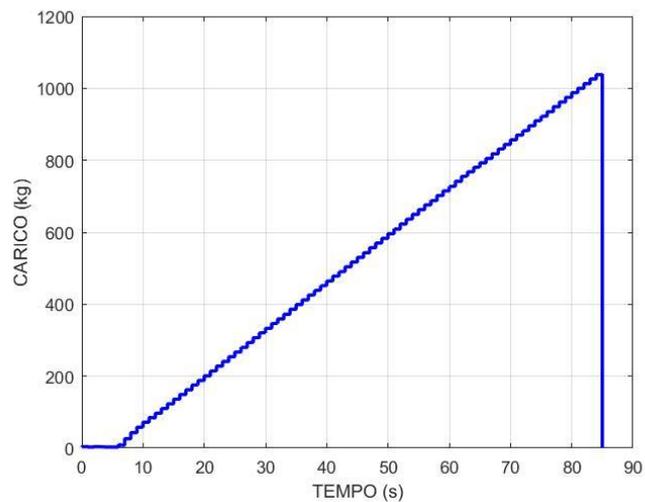


Figura A9.2: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), doppia pressatura, provino 2

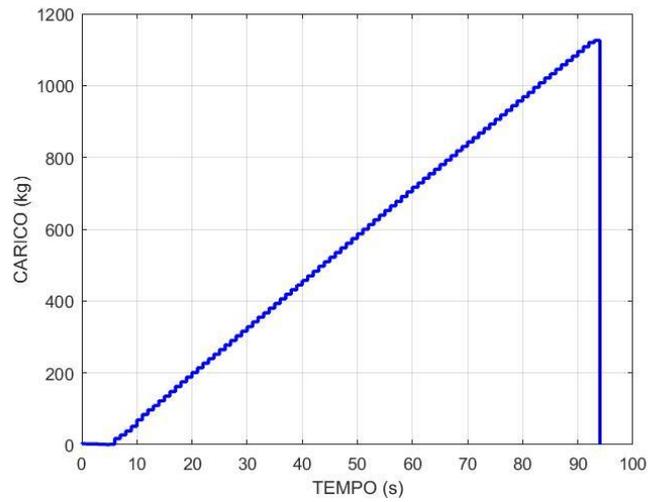


Figura A9.3: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), doppia pressatura, provino 3

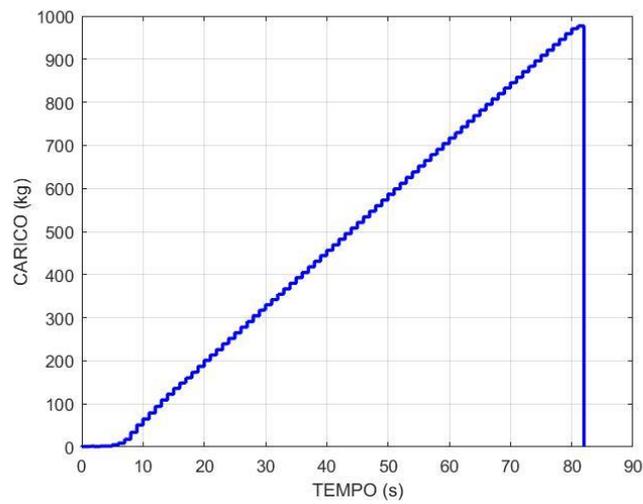


Figura A9.4: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), doppia pressatura, provino 4

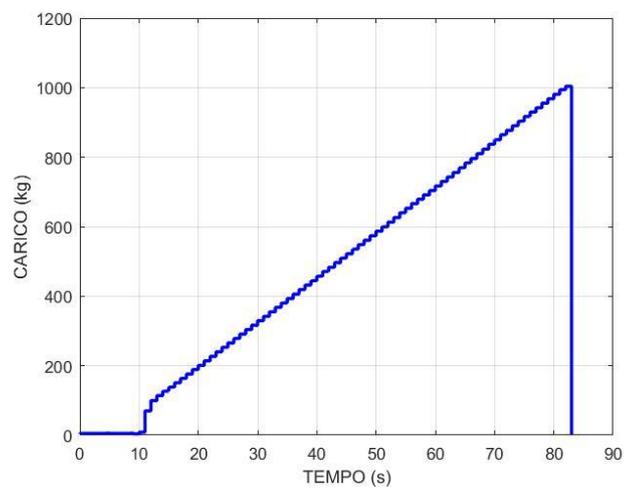


Figura A9.5: Andamento carico vs tempo per prova sfilamento giunzione rame 9x30 (mm), doppia pressatura, provino 5

ALLEGATO 10

Prove di sfilamento delle perline diamantate su filo gommato in configurazione gomma-perla-gomma.

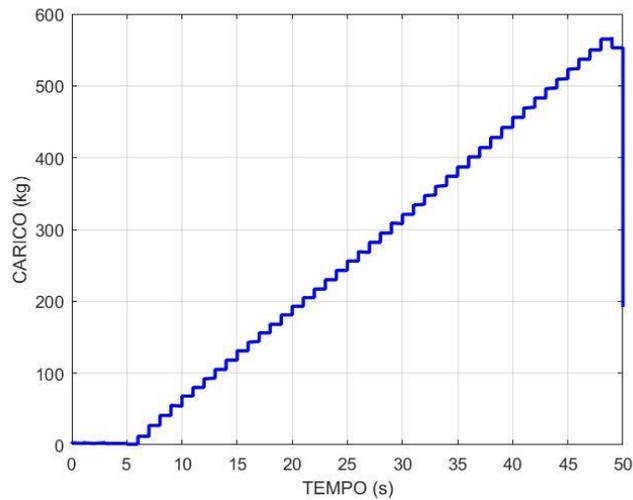


Figura A6.1: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione gomma-perla-gomma, sfilamento 1

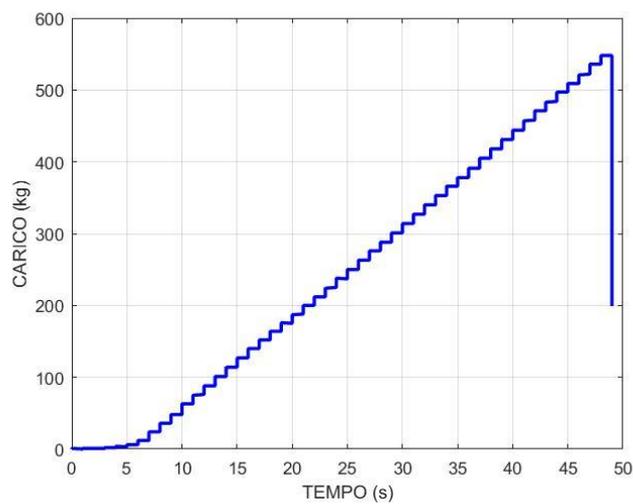


Figura A10.2: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione gomma-perla-gomma, sfilamento 2

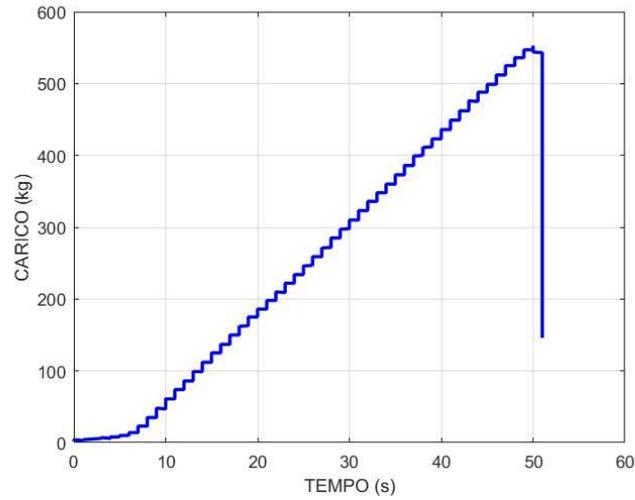


Figura A10.3: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione gomma-perla-gomma, sfilamento 3

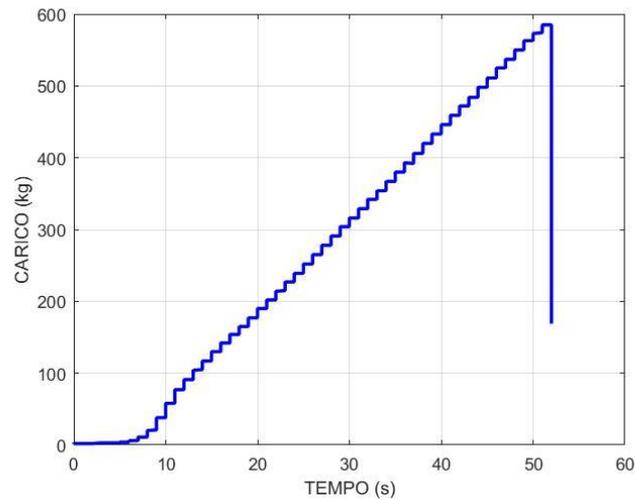


Figura A10.4: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione gomma-perla-gomma, sfilamento 4

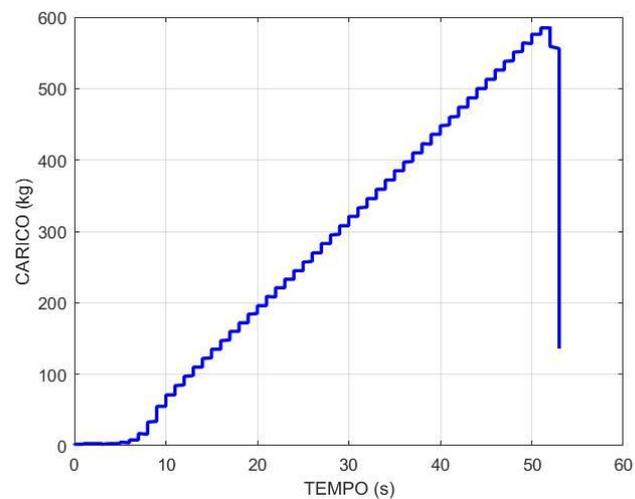


Figura A10.5: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione gomma-perla-gomma, sfilamento 5

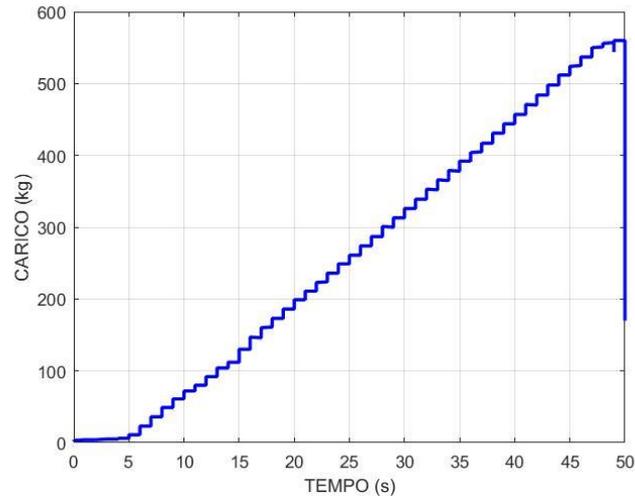


Figura A10.6: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione gomma-perla-gomma, sfilamento 6

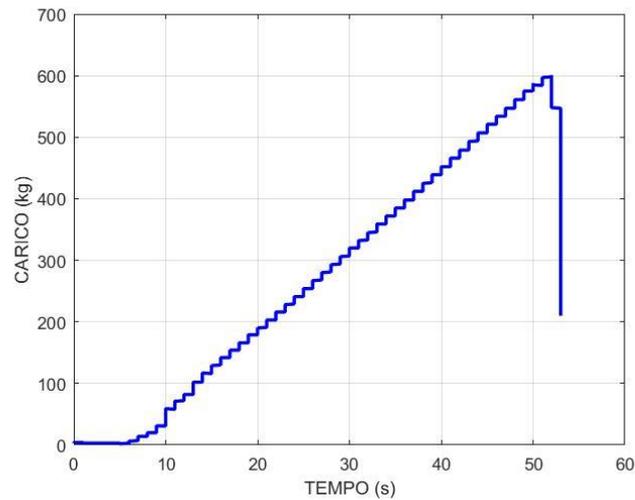


Figura A10.7: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione gomma-perla-gomma, sfilamento 7

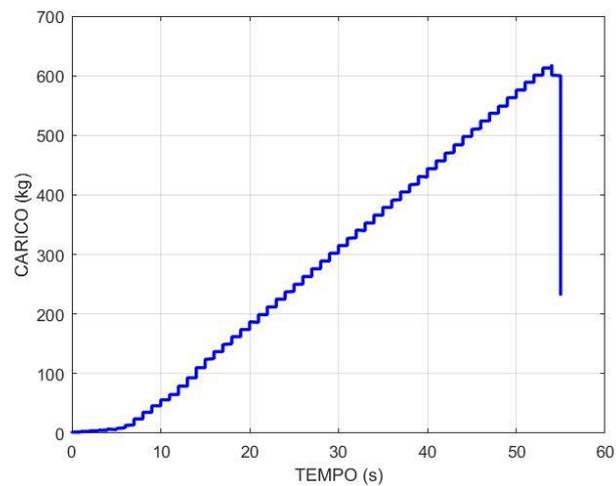


Figura A10.8: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione gomma-perla-gomma, sfilamento 8

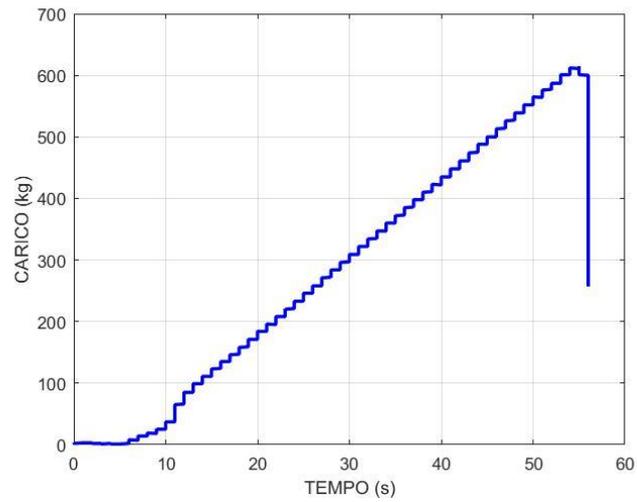


Figura A10.9: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione gomma-perla-gomma, sfilamento 9

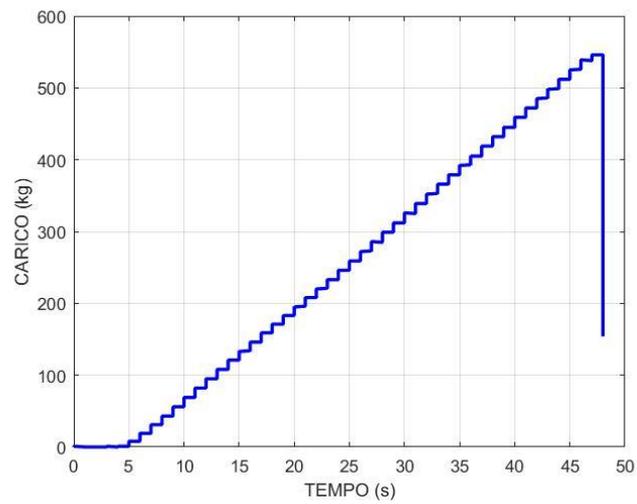


Figura A10.10: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione gomma-perla-gomma, sfilamento 10

ALLEGATO 11

Prove di sfilamento delle perline diamantate su filo gommato in configurazione solo perla.

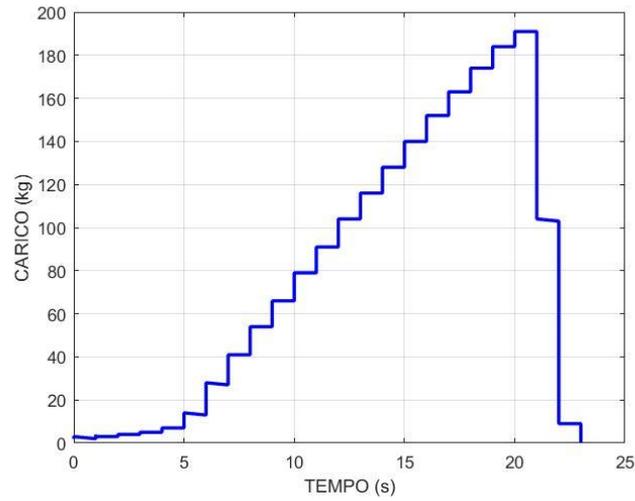


Figura A11.1: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perla diamantata configurazione solo perla (filo gommato), sfilamento 1

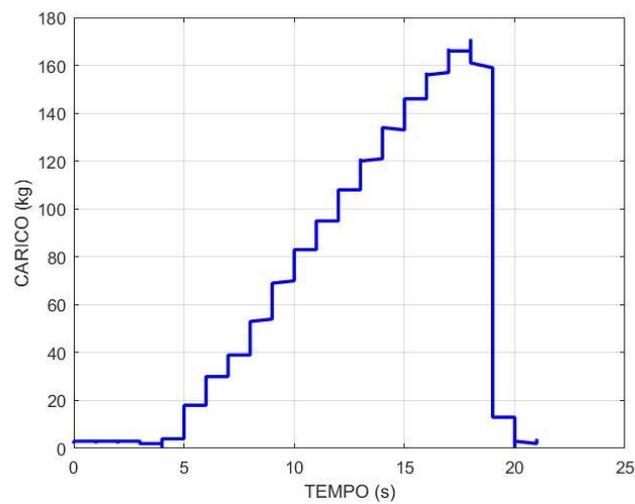


Figura A11.2: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perla diamantata configurazione solo perla (filo gommato), sfilamento 2

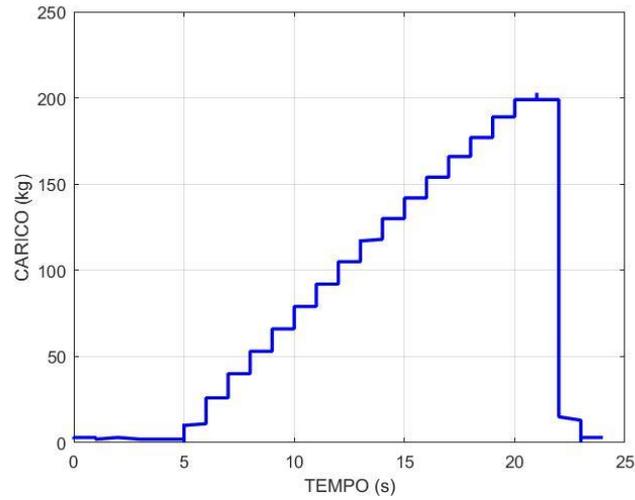


Figura A11.3: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo gommato), sfilamento 3

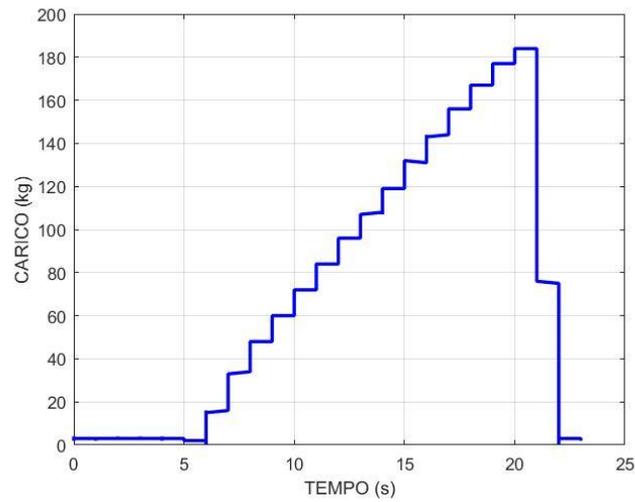


Figura A11.4: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo gommato), sfilamento 4

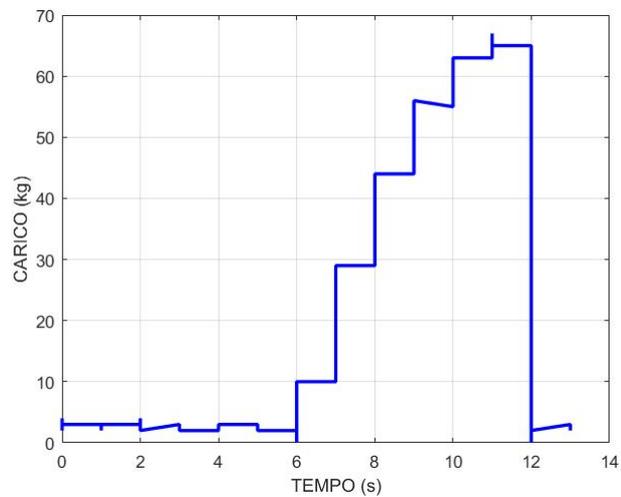


Figura A11.5: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo gommato), sfilamento 5

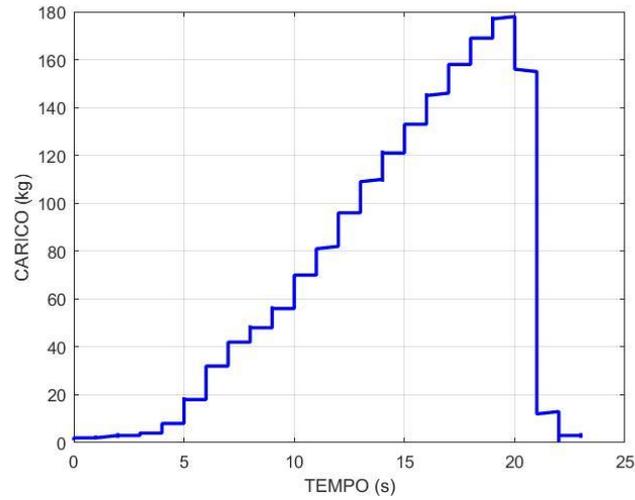


Figura A11.6: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo gommato), sfilamento 6

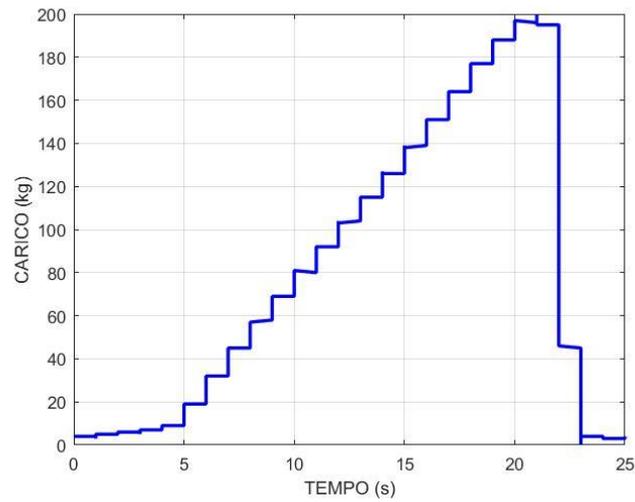


Figura A11.7: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo gommato), sfilamento 7

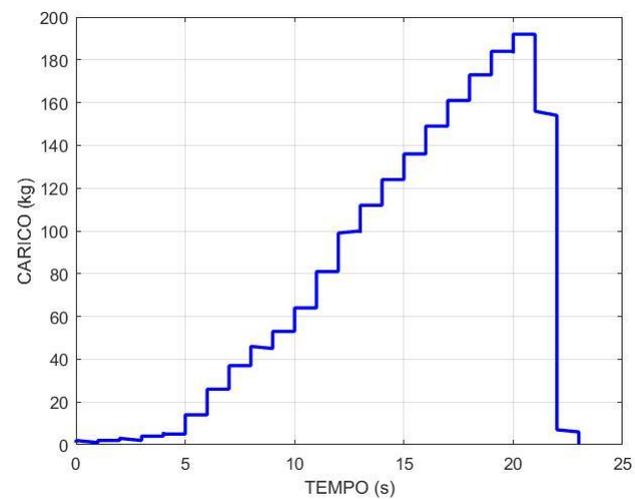


Figura A11.8: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo gommato), sfilamento 8

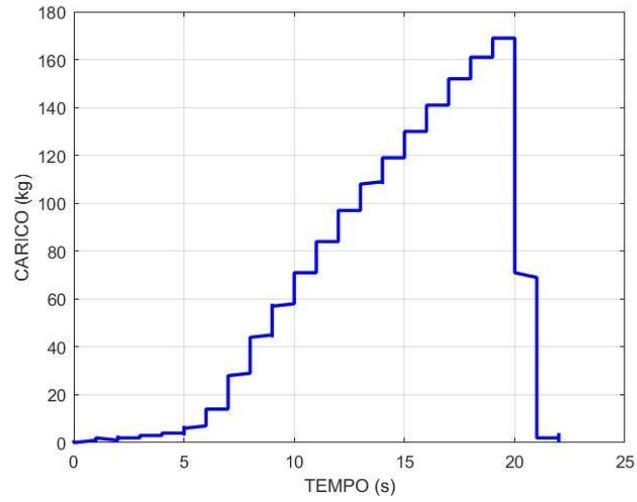


Figura A11.9: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo gommato), sfilamento 9

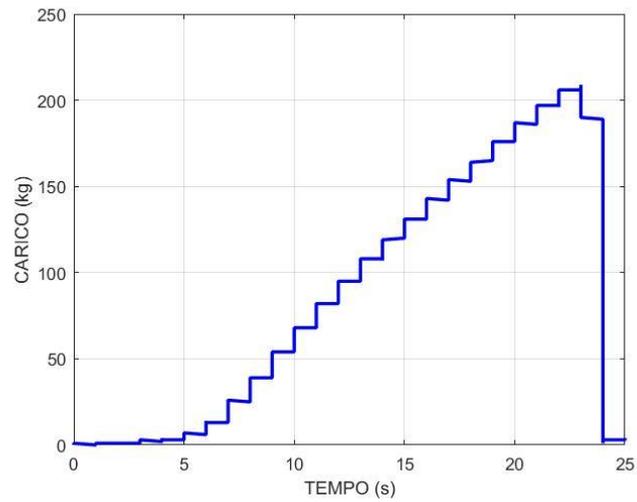


Figura A11.10: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo gommato), sfilamento 10

ALLEGATO 12

Prove di sfilamento delle perline diamantate su filo plastificato in configurazione plastica-perla-plastica.

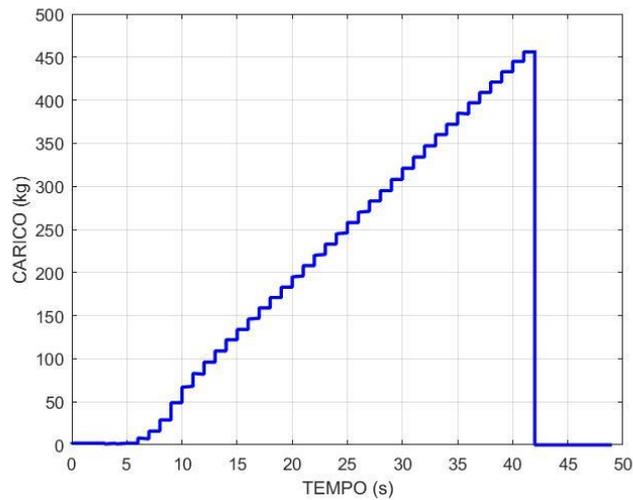


Figura A12.1: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione plastica-perla-plastica, sfilamento 1

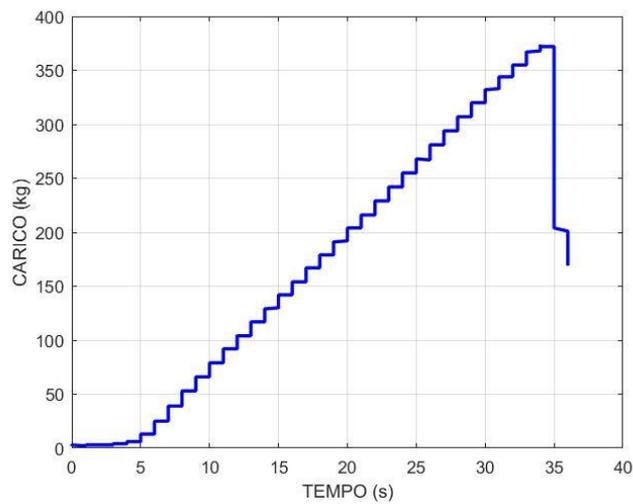


Figura A12.2: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione plastica-perla-plastica, sfilamento 2

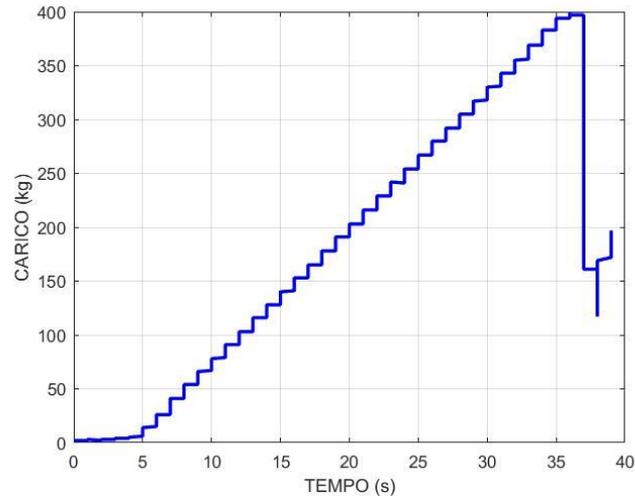


Figura A12.3: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione plastica-perla-plastica, sfilamento 3

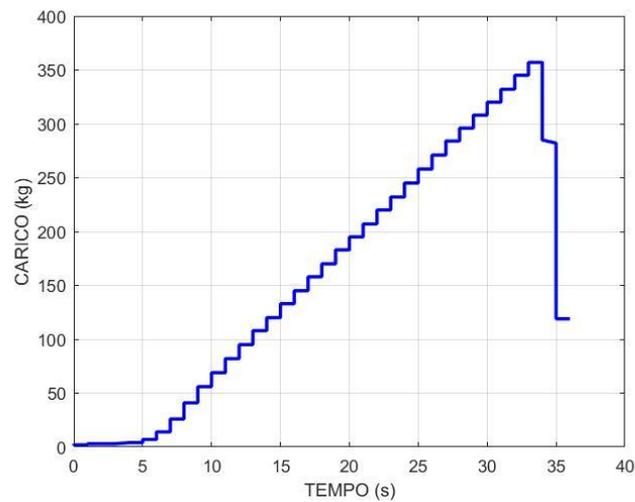


Figura A12.4: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione plastica-perla-plastica, sfilamento 4

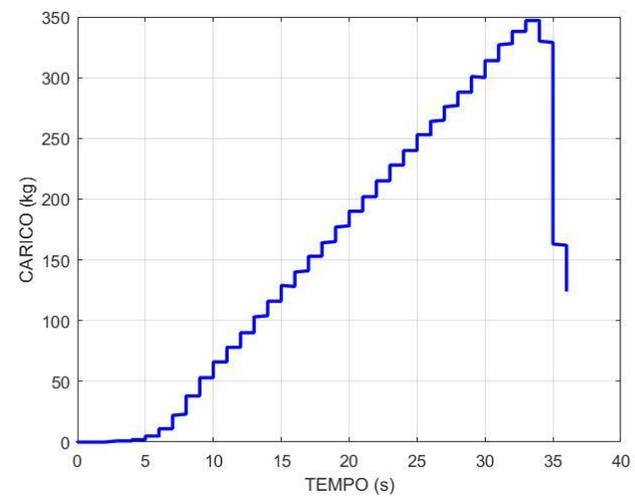


Figura A12.5: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione plastica-perla-plastica, sfilamento 5

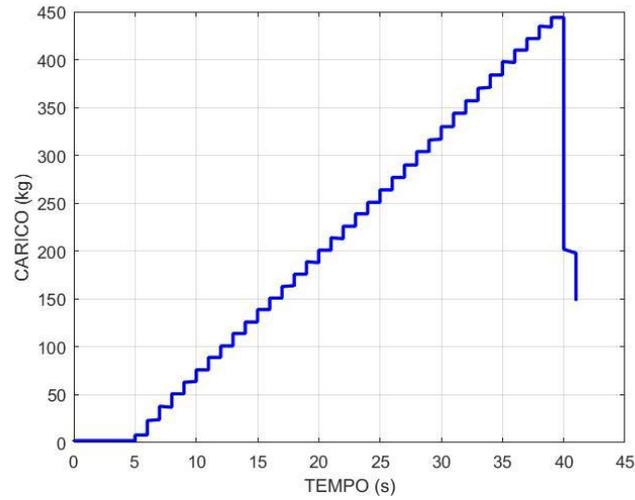


Figura A12.6: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione plastica-perla-plastica, sfilamento 6

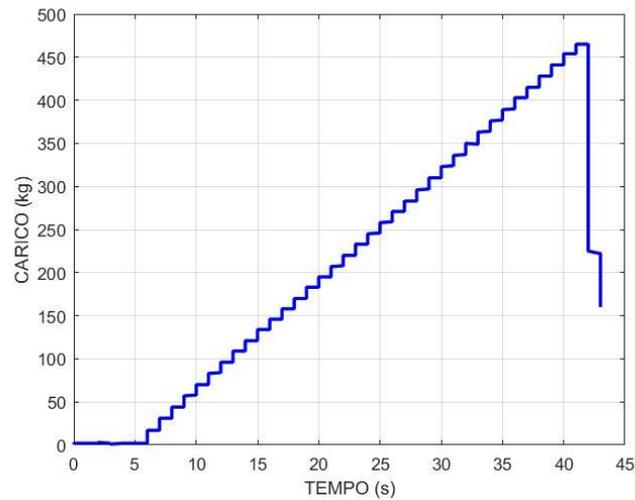


Figura A12.7: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione plastica-perla-plastica, sfilamento 7

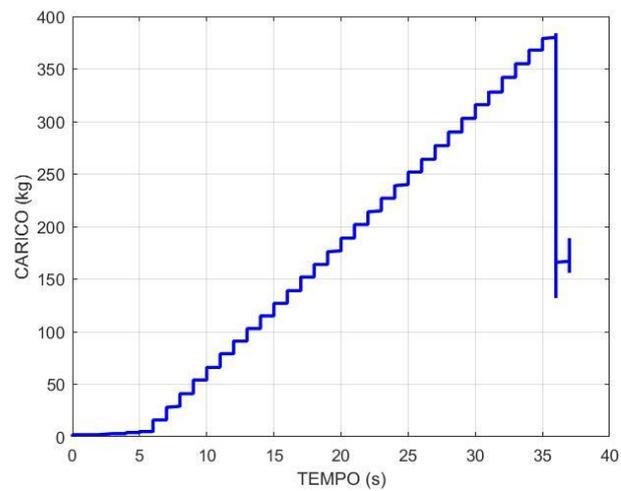


Figura A12.8: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione plastica-perla-plastica, sfilamento 8

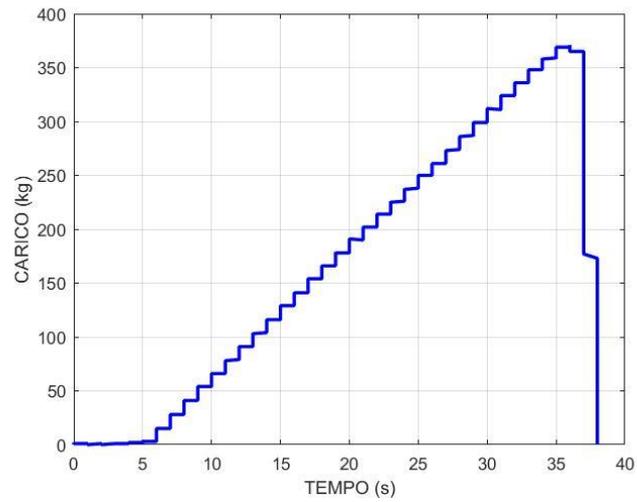


Figura A12.9: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione plastica-perla-plastica, sfilamento 9

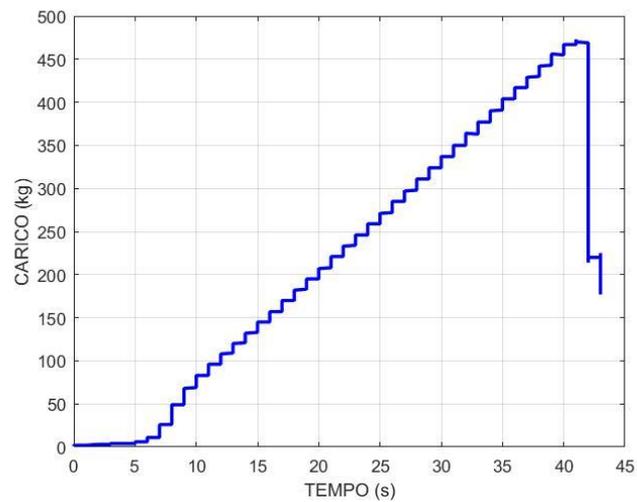


Figura A12.10: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione plastica-perla-plastica, sfilamento 10

ALLEGATO 13

Prove di sfilamento delle perline diamantate su filo plastificato in configurazione solo perla.

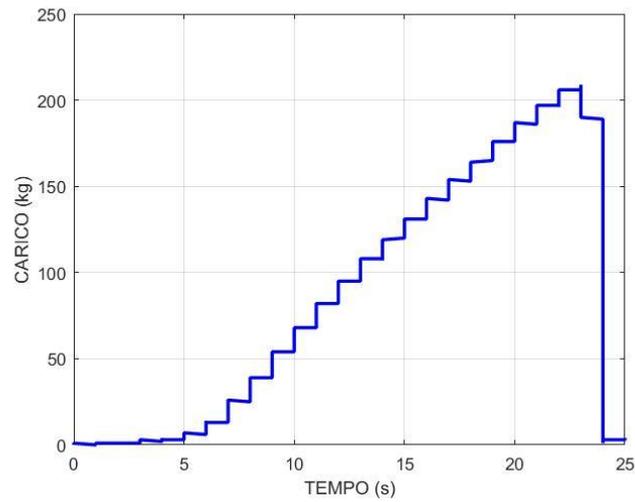


Figura A13.1: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perla diamantata configurazione solo perla (filo plastificato), sfilamento 1

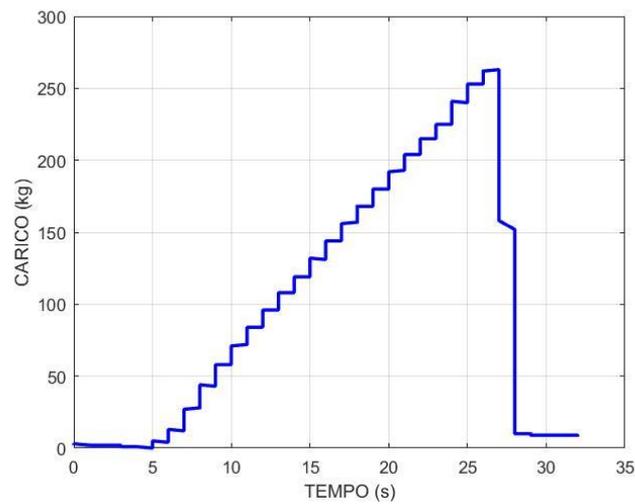


Figura A13.2: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perla diamantata configurazione solo perla (filo plastificato), sfilamento 2

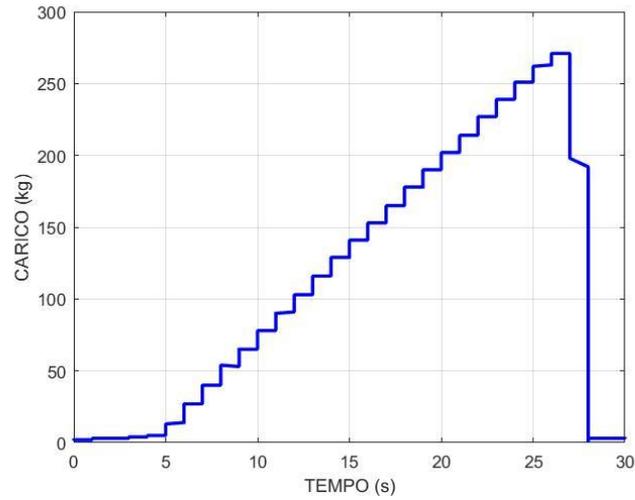


Figura A13.3: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo plastificato), sfilamento 3

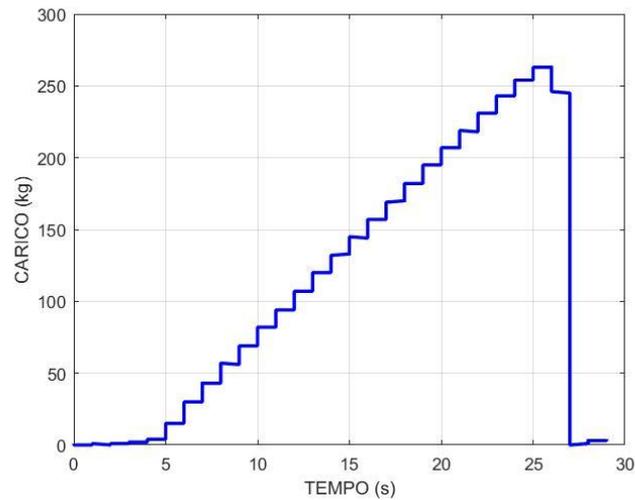


Figura A13.4: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo plastificato), sfilamento 4

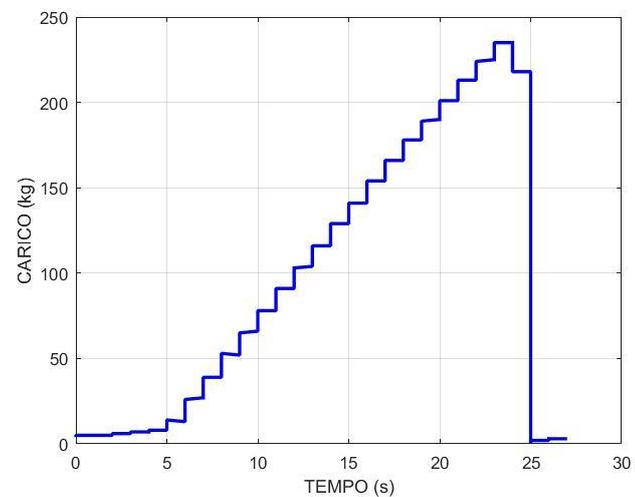


Figura A13.5: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo plastificato), sfilamento 5

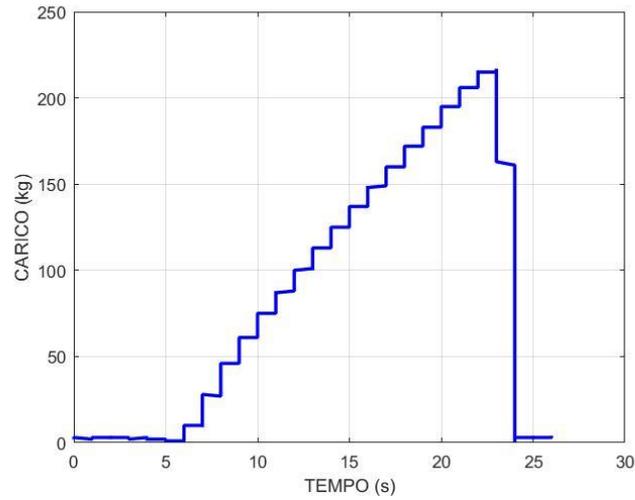


Figura A13.6: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perla diamantata configurazione solo perla (filo plastificato), sfilamento 6

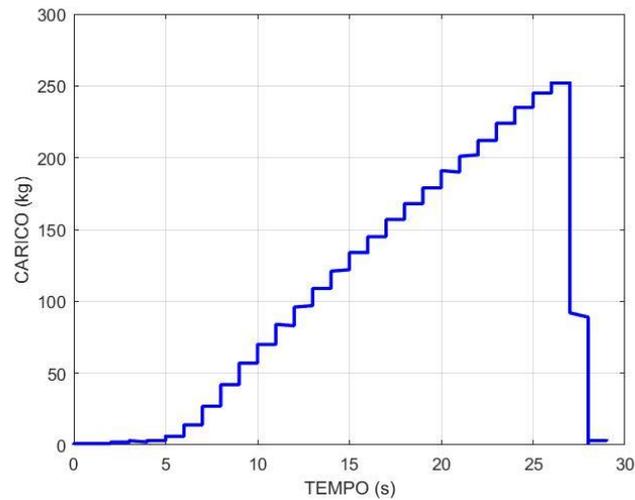


Figura A13.7: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perla diamantata configurazione solo perla (filo plastificato), sfilamento 7

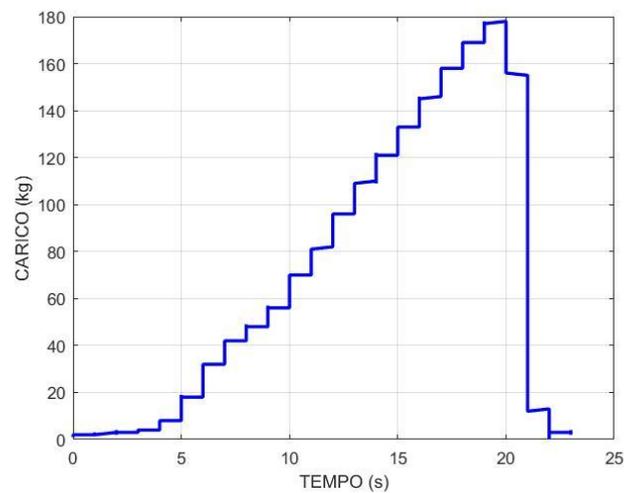


Figura A13.8: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perla diamantata configurazione solo perla (filo plastificato), sfilamento 8

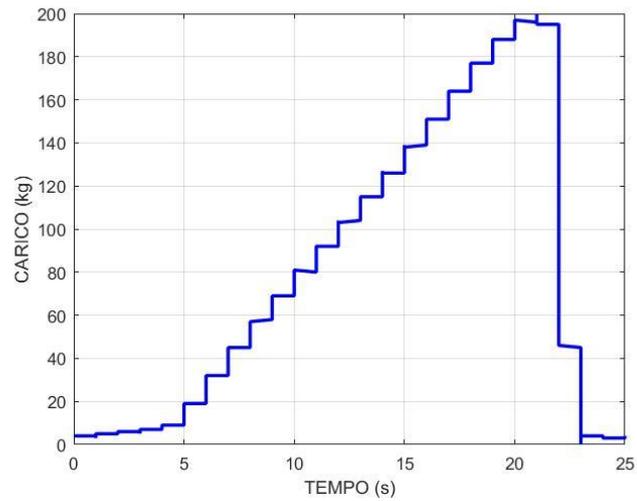


Figura A13.9: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo plastificato), sfilamento 9

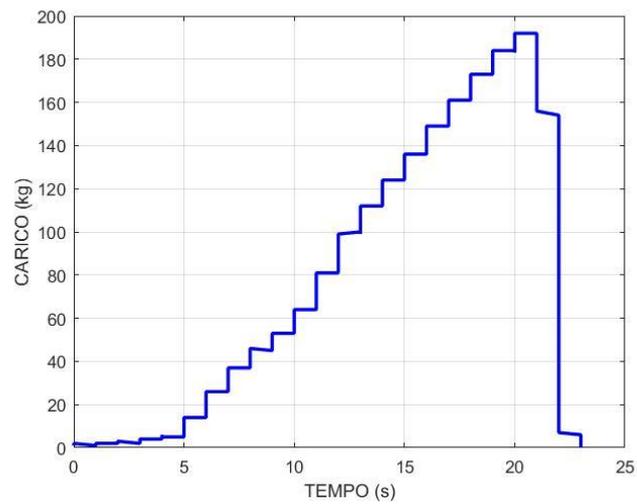


Figura A13.10: Andamento Carico vs tempo per prova di sfilamento perlina diamantata configurazione solo perla (filo plastificato), sfilamento 10

## ALLEGATO 14

Valori teorici di tensione entrante e uscente dalla puleggia motrice della tagliatrice a filo diamantato.

$\beta = 0^\circ$	$\alpha(^{\circ})$	T1 (N)	T2 (N)
	0	1032	2276
	5	1061	2314
	10	1092	2373
	15	1126	2454
	20	1161	2560
	25	1199	2696
	30	1240	2869
	35	1284	3086
	40	1331	3362
	45	1382	3714

Tabella A10.1: Tensioni teoriche agenti sul filo diamantato per  $\beta = 0^\circ$ ,  $\alpha$  variabile

$\beta = 3^\circ$	$\alpha(^{\circ})$	T1 (N)	T2 (N)
	0	1050	2293
	5	1081	2333
	10	1113	2393
	15	1148	2475
	20	1185	2584
	25	1225	2723
	30	1268	2899
	35	1313	3120
	40	1363	3401
	45	1416	3760

Tabella A10.2: Tensioni teoriche agenti sul filo diamantato per  $\beta = 3^\circ$ ,  $\alpha$  variabile

$\beta = 6^\circ$	$\alpha(^{\circ})$	T1 (N)	T2 (N)
	0	1073	2312
	5	1105	2352
	10	1139	2414
	15	1175	2498
	20	1214	2609
	25	1255	2751
	30	1300	2930
	35	1348	3156
	40	1400	3442
	45	1456	3808

Tabella A10.3: Tensioni teoriche agenti sul filo diamantato per  $\beta = 6^\circ$ ,  $\alpha$  variabile

$\beta = 9^\circ$	$\alpha(^{\circ})$	T1 (N)	T2 (N)
	0	1099	2330
	5	1133	2372
	10	1168	2435
	15	1206	2522
	20	1247	2635
	25	1291	2780
	30	1338	2963
	35	1388	3193
	40	1443	3485
	45	1503	3859

Tabella A10.4: Tensioni teoriche agenti sul filo diamantato per  $\beta = 9^\circ$ ,  $\alpha$  variabile

$\beta = 12^\circ$	$\alpha(^{\circ})$	T1 (N)	T2 (N)
	0	1130	2350
	5	1165	2393
	10	1202	2458
	15	1242	2546
	20	1285	2662
	25	1331	2810
	30	1381	2997
	35	1435	3232
	40	1493	3530
	45	1556	3912

Tabella A10.5: Tensioni teoriche agenti sul filo diamantato per  $\beta = 12^\circ$ ,  $\alpha$  variabile

$\beta = 15^\circ$	$\alpha(^{\circ})$	T1 (N)	T2 (N)
	0	1165	2370
	5	1202	2415
	10	1241	2481
	15	1284	2572
	20	1329	2691
	25	1378	2842
	30	1431	3033
	35	1487	3273
	40	1549	3578
	45	1616	3968

Tabella A10.6: Tensioni teoriche agenti sul filo diamantato per  $\beta = 15^\circ$ ,  $\alpha$  variabile