

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA



Corso di laurea triennale in
Ingegneria Meccanica

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

**ANALISI DELLE PERFORMANCE
DI UNA MACCHINA UTENSILE
IN CONDIZIONI DI LAVORO ANOMALE**

PERFORMANCE ANALYSIS OF A MACHINE TOOL IN
ABNORMAL WORKING CONDITIONS

Relatore:
Prof. Ing. Filippo Emanuele Ciarapica

Tesi di laurea di:
Stefano Bompadre

Correlatore:
Prof. Ing. Giovanni Mazzuto

Anno Accademico 2020-2021

*Ai miei genitori
e a tutti coloro che mi hanno
accompagnato durante
questo lungo viaggio.*

Sommario

Introduzione	3
Capitolo 1 – Descrizione esperienza	5
1.1 – Condition monitoring	5
1.2 – Digital Twin	6
1.3 – Trapano a colonna e sue componenti	7
1.4 – Sensori, sistemi di controllo e di sicurezza	11
1.5 – Interfaccia grafica di visualizzazione (“trapano chat” e “trapano web”).....	18
1.6 – Rapporto di trasmissione e coppia mandrino	20
1.7 – Lavorazioni per asportazione di truciolo: la foratura	23
1.8 – Materiale usato	28
1.9 – Lavorazione effettuata e parametri di foratura	29
1.10 – Modalità di lavorazione e buone prassi per lavorare in sicurezza.....	31
Capitolo 2 – Analisi prove eseguite	33
2.1 – Prefazione.....	33
2.2 – Test 1: normali condizioni di lavoro e sicurezza (2000 rpm).....	34
2.3 – Test 2: basso numero di giri del mandrino (1000 rpm).....	37
2.4 – Test 3: basso numero di giri del mandrino (500 rpm).....	39
2.5 – Test 4: punta fuori asse (1000 rpm).....	43
2.6 – Test 5: punta lenta (2000 rpm)	46
2.7 – Test 6: pezzo inclinato (2000 rpm).....	48
2.8 – Test 7: pezzo non bloccato (2000 rpm)	52
Capitolo 3 – Confronto prove e conclusioni	56
3.1 – Confronto generale	56
3.2 – Confronto coppie motore.....	57
3.2.1 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 2 (basso numero di giri - 1000 rpm).....	58
3.2.2 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 3 (basso numero di giri – 500 rpm).....	58
3.2.3 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 4 (punta fuori asse).....	59
3.2.4 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 5 (punta lenta)	60
3.2.5 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 6 (pezzo inclinato).....	60
3.2.6 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 7 (pezzo non bloccato)	61
3.3 – Conclusioni.....	62
Bibliografia	63

Introduzione

Il corso di studi in Ingegneria Meccanica prevede lo svolgimento di un'attività di tirocinio al raggiungimento di 120 CFU. Tale attività dev'essere svolta per 150 ore ed alla stessa vengono riconosciuti 6 CFU (1 CFU corrisponde a 25 ore di attività).

Lo studente in questione ha svolto tale attività all'interno dell'università, presso uno dei numerosi laboratori del DIISM (Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche) - via Breccie Bianche 12, 60131 Ancona.

L'attività di tirocinio svolta, sulla quale si basa lo sviluppo di questa tesi, ha avuto come obiettivo il monitoraggio di una macchina utensile (*condition monitoring*), quale un trapano a colonna, in diverse condizioni di lavoro tramite l'utilizzo di sensori già applicati in precedenza alla macchina.

L'acquisizione di tali dati volgerà in un'analisi dei test eseguiti, da cui si proporranno varie riflessioni mettendo le stesse prove a confronto.

Lo scopo della tesi, quindi, è quello di analizzare il comportamento della macchina operante in condizioni di non sicurezza, per le quali si intendono quelle situazioni in cui la macchina utensile non è stata correttamente settata o preparata dall'operatore. Tali situazioni verranno comparate con la prova svolta in normali condizioni di lavoro, in modo da capire fino a quando l'operatore può lavorare in sicurezza quando la macchina utensile lavora in condizioni anomale.

I test consistono in una serie di prove di foratura effettuate su una barra piatta di alluminio serie 6000, dello spessore di 10 mm.

I dati, raccolti grazie all'implementazione di un sistema di controllo costituito da diversi sensori dei quali tratteremo in seguito, sono stati poi inseriti nel software di calcolo Microsoft Excel per ottenere grafici sull'andamento delle prove in modo da rendere possibile una lettura immediata degli stessi dati per un confronto.

La tesi è strutturata nel seguente modo:

- **Capitolo 1 – Descrizione esperienza.** Si esegue la descrizione del trapano a colonna presente nel laboratorio del DIISM, delle disposizioni di sicurezza adottate per la lavorazione di foratura, dell'interfaccia grafica e dei sensori utilizzati per l'acquisizione dei dati, del tipo di materiale usato durante le prove e dei parametri di taglio necessari alle varie lavorazioni di foratura.
- **Capitolo 2 – Analisi prove eseguite.** Vengono descritti tutti i test svolti nelle diverse condizioni di lavoro; si proporranno grafici e immagini delle singole situazioni, indicando cosa è avvenuto e sviluppando considerazioni personali in merito alla sicurezza nelle varie prove.
- **Capitolo 3 – Confronto prove e conclusioni.** Si confronteranno i dati ottenuti nei vari test e si trarranno le proprie conclusioni riguardo le prove eseguite.

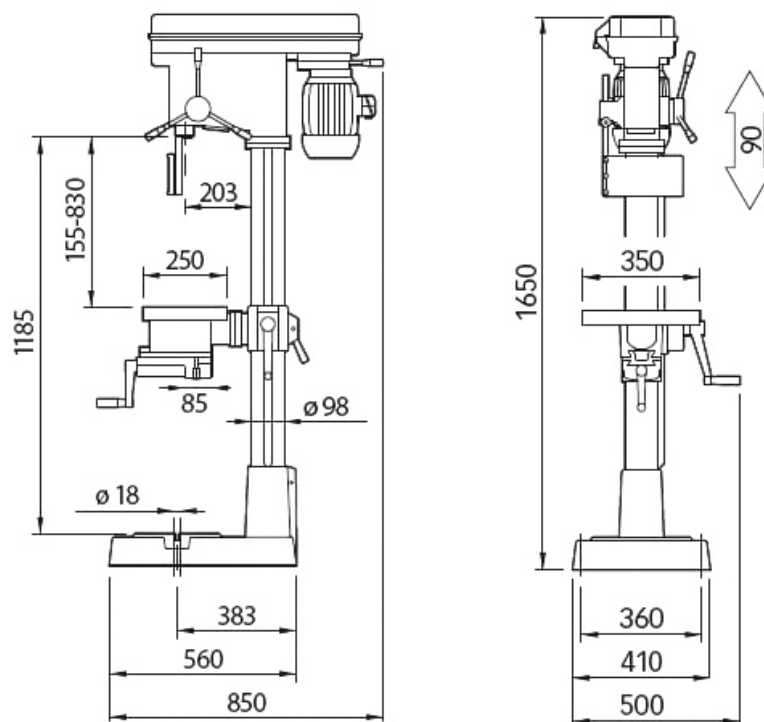


Figura 1: disegno CAD 2D di un trapano a colonna generico

Capitolo 1

Descrizione esperienza

1.1 – Condition monitoring

Il condition monitoring è un processo di controllo dello stato della macchina durante il suo normale funzionamento. Può essere anche definito come un particolare approccio alla manutenzione che si propone di monitorare la salute e la sicurezza della macchina attraverso l'ottenimento di dati in tempo reale tramite appositi sensori. Consiste, quindi, nell'acquisizione, nell'elaborazione e nel confronto dei dati rilevati con dati di riferimento, anche forniti da macchine simili. Questi parametri vengono poi trasmessi a moderni software che aiutano a identificare i possibili guasti e degradi delle apparecchiature che compongono la macchina. Tutto questo rappresenta la base per una vera e propria manutenzione “predittiva”: individuare eventuali anomalie tramite il monitoraggio della macchina, e risolverle prima che diano luogo ad avarie.

Ciò porta ad avere diversi benefici, tra cui:

- riduzione di imprevisti, guasti macchina e tempi di inattività;
- prolungamento della durata di vita di componenti e macchinari;
- tempestività degli interventi;
- riduzione generale dei costi legati alla manutenzione;
- eliminazione di sprechi di tempo da parte di tecnici.

In altre parole, il condition monitoring è uno strumento di pianificazione che consente una visione più efficace della gestione delle risorse, consentendo di eseguire la manutenzione prima che si verifichi un effettivo guasto funzionale. Un altro aspetto da non trascurare è l'aumento della sicurezza sul lavoro: gli improvvisi guasti occasionali possono avere conseguenze anche molto gravi, sia per il personale che per l'ambiente circostante (Torchiani, 2022).

1.2 – Digital Twin

Man mano che le nostre risorse e i nostri sistemi diventano più complicati, anche il modo in cui li sviluppiamo, gestiamo e manteniamo deve evolvere. Se prima il sistema doveva essere fisicamente creato, inizialmente sotto forma di progetto e, in seguito, come un prototipo sotto forma di modello 3D fisico, ad oggi questa metodologia risulta (per la maggior parte dei casi) inadeguata, poiché la velocità richiesta per lo sviluppo di un nuovo prodotto è elevatissima e i tempi di produzione sono molto ridotti.

Per tale motivo, abbiamo bisogno di strumenti evoluti per soddisfare le nuove realtà di prodotti, ed è qui che entra in gioco il Digital Twin, il gemello digitale.

L'avanzamento delle tecnologie digitali ha semplificato il processo, permettendo di creare modelli 3D virtuali: questi consentono di fare, virtualmente, tutte le valutazioni per cui era necessario costruire un prototipo, risparmiando così tempo e risorse.

Quindi, un Digital Twin, o gemello digitale, è una rappresentazione virtuale di un oggetto o di un sistema, collegato ad esso per tutto il ciclo di vita. Il Digital Twin viene aggiornato in tempo reale dai dati raccolti dai sensori collegati all'asset fisico e usa programmi di simulazione, l'apprendimento automatico e il ragionamento per fornire informazioni utili sull'asset e per elaborare modelli predittivi delle prestazioni future e delle reazioni dell'oggetto a determinate condizioni.

In pratica, il gemello digitale è connesso al prodotto fisico attraverso vari sensori posti su aree vitali alla funzionalità dell'oggetto. Questi sensori producono dati su diversi aspetti delle prestazioni dell'oggetto fisico, dalla temperatura, all'energia utilizzata o prodotta, alle condizioni meteorologiche e così via.

L'analisi di questi dati, combinata con altre fonti di informazione, permette di capire non solo il comportamento del prodotto, ma anche di predire come il prodotto si comporterà in futuro. Questo flusso continuo di informazioni permette al modello virtuale di eseguire simulazioni, rilevare e analizzare eventuali problemi di prestazioni del prodotto e studiare possibili miglioramenti (Crisantemi, 2022).

L'utilizzo dei sistemi di Digital Twin nel mondo industriale garantisce alle aziende importanti vantaggi:

- la riduzione dei difetti del prodotto e dei costi di produzione;
- l'ottimizzazione del processo di produzione e dei prodotti stessi.

Nel nostro caso, è stato realizzato in precedenza il disegno CAD 3D del trapano a colonna (*Figura 2*) corredato dell'equipaggiamento di sicurezza e dei sensori installati a bordo, e inserito all'interno di una delle interfacce grafiche di visualizzazione e monitoraggio, in modo da avere una comprensione visiva dello stato della macchina in tempo reale.

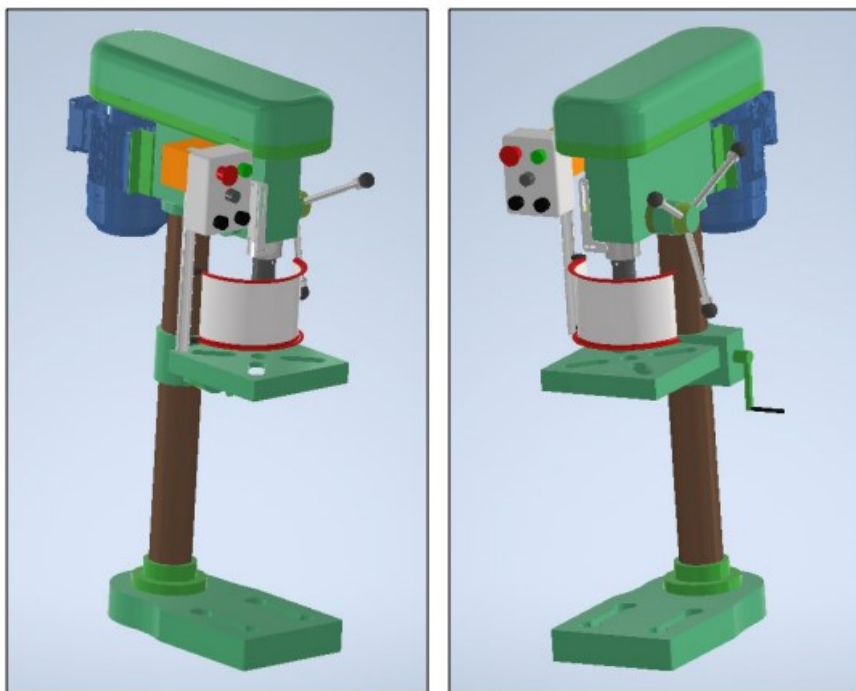


Figura 2: disegno CAD 3D trapano a colonna

1.3 – Trapano a colonna e sue componenti

Il trapano è un utensile impiegato per le lavorazioni di foratura su materiali di diverso tipo, tramite l'utilizzo di punte elicoidali attraverso cui avviene l'asportazione di truciolo.

Nel nostro caso andremo a considerare la famiglia dei trapani definiti “a colonna”.

A differenza del noto trapano con forma a pistola, quello a colonna è fissato su di un basamento verticale. Su questa struttura si applica il piano da lavoro, ossia una tavoletta

in ghisa che funge da appoggio per le lavorazioni. Sul piano è presente una morsa (*Figura 3*) per poter mantenere fermi i componenti sui quali si deve operare. Ogni supporto può essere regolato in altezza e fatto ruotare secondo le necessità.



Figura 3: morsa trapano

All'estremità superiore della colonna vi è la testa del trapano (*Figura 7*), dove sono collocate tutte le parti meccaniche in movimento del gruppo di cambio velocità. Il sistema di trasmissione, quindi, può essere a cinghia o ad ingranaggi: la trasmissione a cinghia solitamente è utilizzata per trapani con avanzamento manuale oppure con punte di diametro inferiore a 30 mm e permette all'utilizzatore di cambiare la velocità di rotazione spostando la stessa cinghia da una puleggia all'altra; invece, quella ad

ingranaggi si utilizza solitamente su trapani con avanzamento automatico, oppure là dove le punte superano il diametro di 30 mm (questo perché la trasmissione a cinghia tende a "slittare" se sottoposta a carichi molto alti).

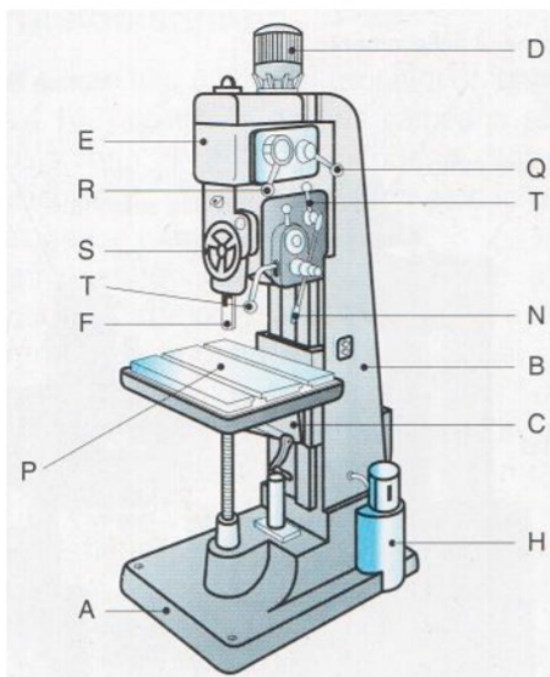
La forza motrice è generata da un motore elettrico e viene trasmessa tramite cinghia o ingranaggi al mandrino, cioè l'albero rotante sul quale si fissano gli utensili. Il mandrino si muove verticalmente ed è collegato ad un timone, che mosso dall'operatore in senso circolare permette all'utensile di alzarsi o abbassarsi.

La colonna consiste in un tubo portante sul quale a sua volta è saldato un telaio con culla mobile, cioè un elemento forato nel quale è inserita la testa del trapano con meccanismi di bloccaggio di sicurezza.

I trapani a colonna possono essere suddivisi in base alle caratteristiche in:

- stazionari: molto potenti e stabili, in grado di compiere lavorazioni molto intense, sono dotati di una struttura con base da terra;
- da banco: presentano una base di appoggio che viene normalmente posizionata su un tavolo da lavoro.

La *Figura 4* rappresenta un disegno schematico di un generico trapano a colonna composto dai suoi elementi fondamentali.



- A** basamento;
- B** incastellatura;
- C** mensola con tavola scorrevole lungo il tratto inferiore della incastellatura;
- D** motore;
- E** testa motrice che racchiude gli ingranaggi di trasmissione;
- F** mandrino;
- H** pompa per la refrigerazione;
- N** leva di comando per l'avanzamento sensitivo;
- Q - R** leve del cambio di velocità;
- S** comando dell'avanzamento non automatico;
- T** leva degli avanzamenti.

Figura 4: elementi costitutivi trapano a colonna

Il trapano a colonna da noi utilizzato in laboratorio (*Figura 5, 6 e 7*) è una macchina risalente agli anni 70, caratterizzata da un motore elettrico in grado di erogare una potenza di 0,75 kW, trasmessa all'albero del mandrino tramite 3 pulegge a 4 gradini accoppiate a due a due con delle cinghie trapezoidali e poste nel vano carter sopra la macchina. Cambiando gli accoppiamenti dei gradini delle pulegge, e quindi spostando le cinghie, si può controllare la velocità di rotazione dell'albero del mandrino.



Figura 5: trapano a colonna - visuale frontale



Figura 6: trapano a colonna - visuale laterale



Figura 7: sistema di trasmissione del trapano

Tuttavia, tale trapano è stato recentemente implementato con sistemi di controllo e di sicurezza in modo da poter rispettare la normativa UNI EN 12717 (che specifica le misure e i requisiti di sicurezza che devono essere adottati da coloro che si occupano della progettazione, fabbricazione e fornitura di trapani fissi) e da poter raccogliere dati tramite dei sensori posti sul trapano.

1.4 – Sensori, sistemi di controllo e di sicurezza

Il trapano a colonna presente in laboratorio è stato equipaggiato con un pannello di controllo per poter comandare l'accensione e l'arresto della macchina. In questa sorta di "scatola", installata per mezzo di bulloni a lato del trapano (*Figura 8*), sono presenti:

- l'interruttore di accensione (verde);
- l'interruttore di spegnimento (rosso);
- il pulsante a fungo (rosso), che permette l'arresto di emergenza e non permette la riaccensione in automatico della macchina qualora dovesse interrompersi l'alimentazione e per poi tornare;
- il regolatore di velocità di rotazione del mandrino, il quale è collegato all'inverter, che a sua volta è collegato al motore del trapano. La velocità di rotazione sarà misurata in giri/min e sarà visibile nell'interfaccia digitale che vedremo in seguito.

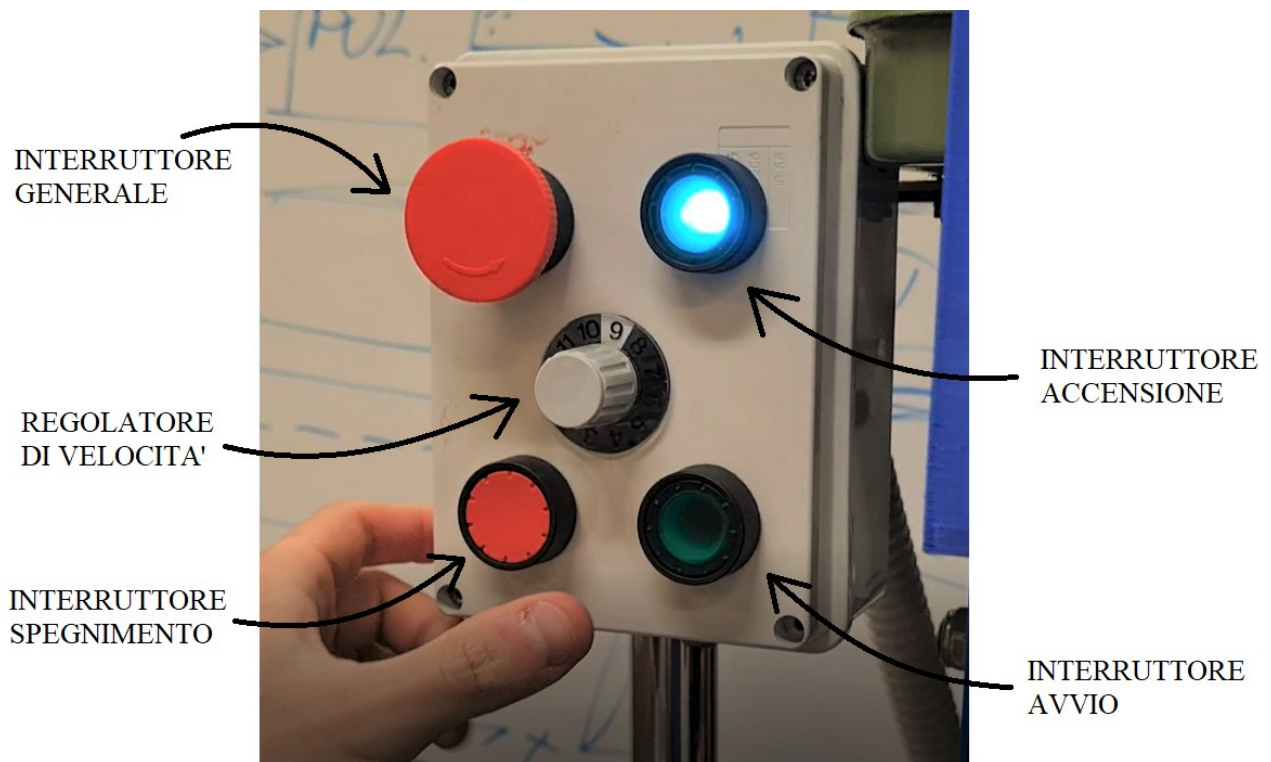


Figura 8: pannello di controllo

Per quanto riguarda la messa in sicurezza, i principali pericoli riscontrati erano di natura meccanica (utensile/mandrino, cinghie/pulegge), di proiezione (pezzi in lavorazione), di natura elettrica (equipaggiamento elettrico). Per tali motivi sono stati inseriti:

- un riparo interbloccato posto all'interno del vano pulegge, provvisto di un interruttore normalmente chiuso che stacca qualora in corso di lavorazione il vano venga aperto;
- una paratia mobile in plexiglass posta davanti al mandrino per evitare rischi di impigliamento o di contatto con le parti mobili e pericoli di proiezione del truciolo generato durante la lavorazione. Tali ripari fanno in modo che:
 - le funzioni della macchina “assoggettate” al riparo non possono essere svolte finché il riparo non sia stato chiuso;
 - se il riparo viene aperto durante lo svolgimento delle funzioni della macchina, venga dato un ordine di arresto;
 - la chiusura del riparo consenta l'esecuzione delle funzioni pericolose della macchina “assoggettate” al riparo, ma non ne comandi l'avvio.(Manzonelli, 2020-21)
- un pulsante a fungo per l'arresto di emergenza, posto sul pannello di controllo di cui abbiamo parlato in precedenza.

I sensori installati sul trapano, invece, sono riportati qui di seguito:

- Potenzimetro a slitta per l'abbassamento del mandrino
- Sensore di distanza ad ultrasuoni per la posizione della tavola
- Sensore induttivo PNP ad impulsi per la velocità di rotazione del mandrino
- Accelerometro per le vibrazioni
- Inverter per variare la tensione e la frequenza della corrente alternata che alimenta il motore

- **Potenziometro lineare a slitta**

Il potenziometro (*Figura 9 e 10*) è un trasduttore elettromeccanico semplice. Converte il movimento lineare dell'operatore in un cambiamento di resistenza, ed è usato per monitorare l'abbassamento del mandrino.



Figura 9: potenziometro installato sul trapano



Figura 10: potenziometro generico

- **Sensore di distanza ad ultrasuoni**

Il sensore di prossimità (*Figura 11 e 12*) è un dispositivo che permette di rilevare la presenza di oggetti nelle immediate vicinanze, senza che vi sia un effettivo contatto. Nel caso specifico, il sensore di prossimità ad ultrasuoni sfrutta il principio del Sonar. Degli impulsi sonori (ultrasonici) vengono emessi dal dispositivo il quale attraverso l'eventuale eco di ritorno permette di rilevare la presenza di un oggetto all'interno della portata nominale.

Nel nostro caso viene utilizzato per conoscere la posizione della tavola di lavoro su cui è posizionata la morsa rispetto alla base di appoggio del trapano.

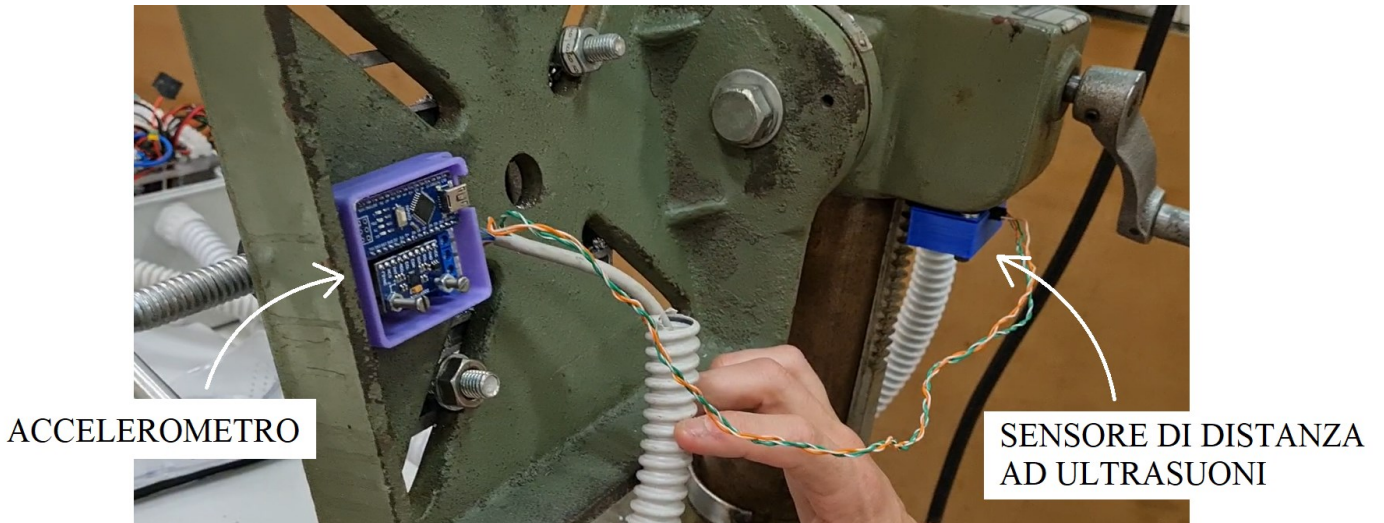


Figura 11: sensore di distanza ad ultrasuoni ed accelerometro installati sul trapano



Figura 12: sensore di distanza ad ultrasuoni generico

- **Sensore induttivo PNP**

Un sensore induttivo (*Figura 13 e 14*) è un tipo di sensore di prossimità in grado di rilevare la presenza di un oggetto metallico ad una distanza ravvicinata, senza che vi sia un effettivo contatto fisico. Tali sensori si basano sul principio della variazione di riluttanza che presenta un elettromagnete, ovvero l'opposizione di un materiale al transito di un flusso magnetico, quando nelle vicinanze si presenta un oggetto realizzato in materiale ferromagnetico. La comparsa di materiale ferromagnetico all'interno del campo magnetico, fa sì che il campo stesso si chiuda meglio, con conseguente abbassamento della riluttanza; i circuiti

interni del sensore rilevano la variazione di riluttanza, e superata una certa soglia, fanno commutare il segnale d'uscita. Nel trapano tale sensore è stato installato nel carter del gruppo di trasmissione ed è stato puntato verso un gradino della puleggia fissata sull'albero del mandrino. Per la lettura della velocità è stato inserito un piccolo disco di materiale ferromagnetico nella cava della puleggia dove punta il sensore (Manzonelli, 2020-21). Questo sensore comunica direttamente con l'inverter per regolare la velocità del mandrino.

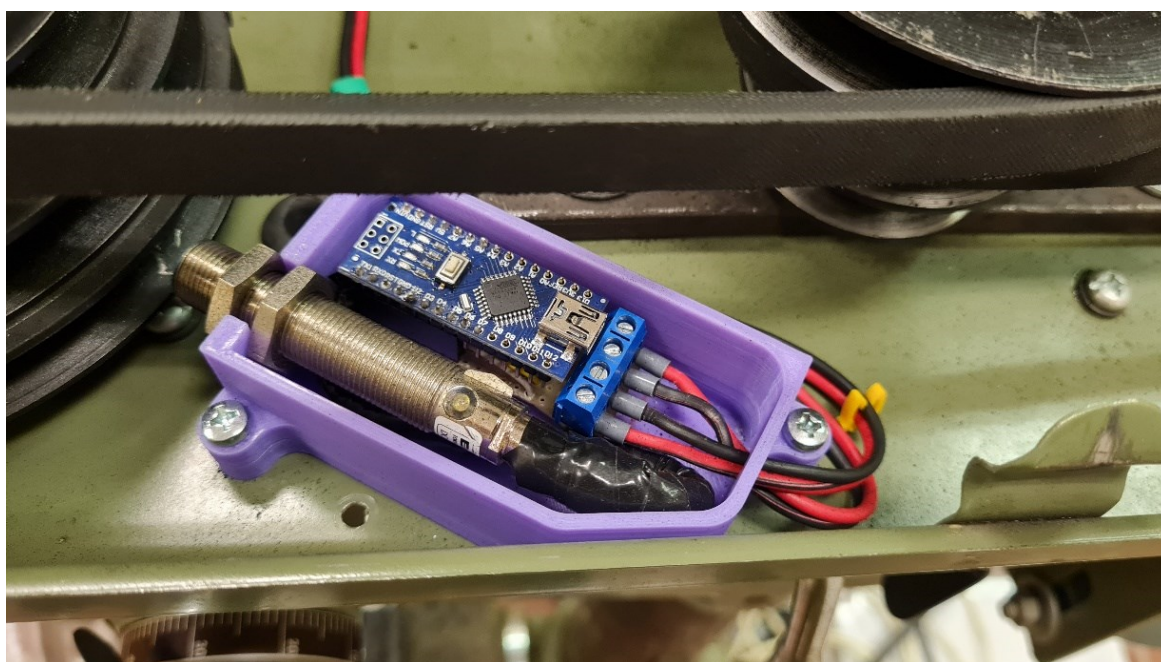


Figura 13: sensore induttivo PNP installato nel vano pulegge del trapano



Figura 14: sensore induttivo PNP generico

- **Accelerometro**

L'accelerometro (*Figura 15 e 16*) è un dispositivo che consente di acquisire movimenti, inclinazioni e orientamento dell'oggetto su cui è posto. Nel caso del trapano, è stato installato sotto la tavola di lavoro porta pezzo per rilevare le vibrazioni della stessa prodotte durante le lavorazioni.

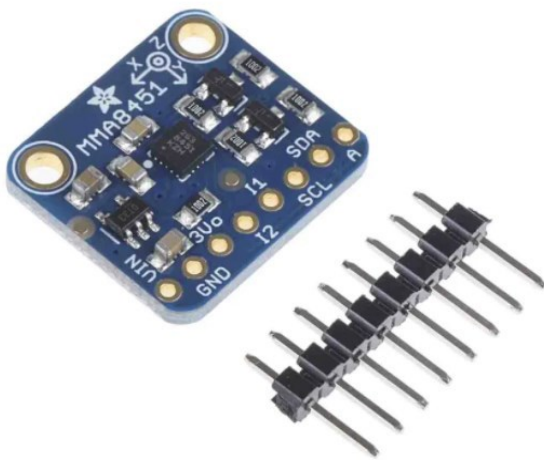


Figura 15: accelerometro generico

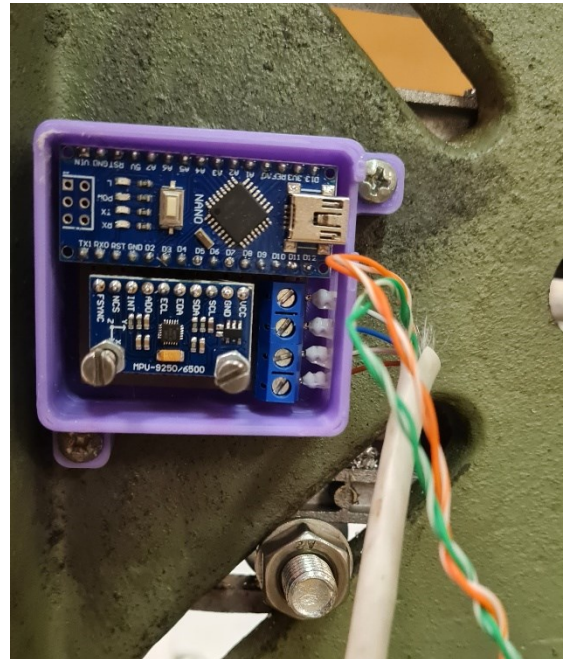


Figura 16: accelerometro posto al di sotto della tavola porta pezzo

- **Inverter**

L'inverter (*Figura 17 e 18*) è un dispositivo elettronico che ha la funzione di trasformare una corrente continua (DC), in corrente alternata (AC) a una determinata tensione e frequenza, sfruttando una sorgente di corrente continua. Col termine “Inverter” si può intendere anche un insieme “raddrizzatore-invertitore”, alimentato a corrente alternata ed utilizzato per variare la tensione e la frequenza della corrente alternata in uscita in funzione di quella in entrata (Consystem S.r.l., 2022). Dunque, utilizzando un inverter per alimentare un motore elettrico, è possibile controllarne la velocità in funzione delle effettive esigenze del dispositivo a cui è collegato. Quindi, la corrente alternata di rete a

240 Volt e 50 Hz (rete europea) viene prima trasformata in continua, per poi passare attraverso l'inverter che la trasformerà in corrente alternata di frequenza e tensione opportune.

Nel nostro caso l'inverter sarà collegato al motore elettrico del trapano per poter variare la forma d'onda sinusoidale dell'ampiezza e della frequenza desiderate, e quindi per poter variare la velocità di rotazione del mandrino.

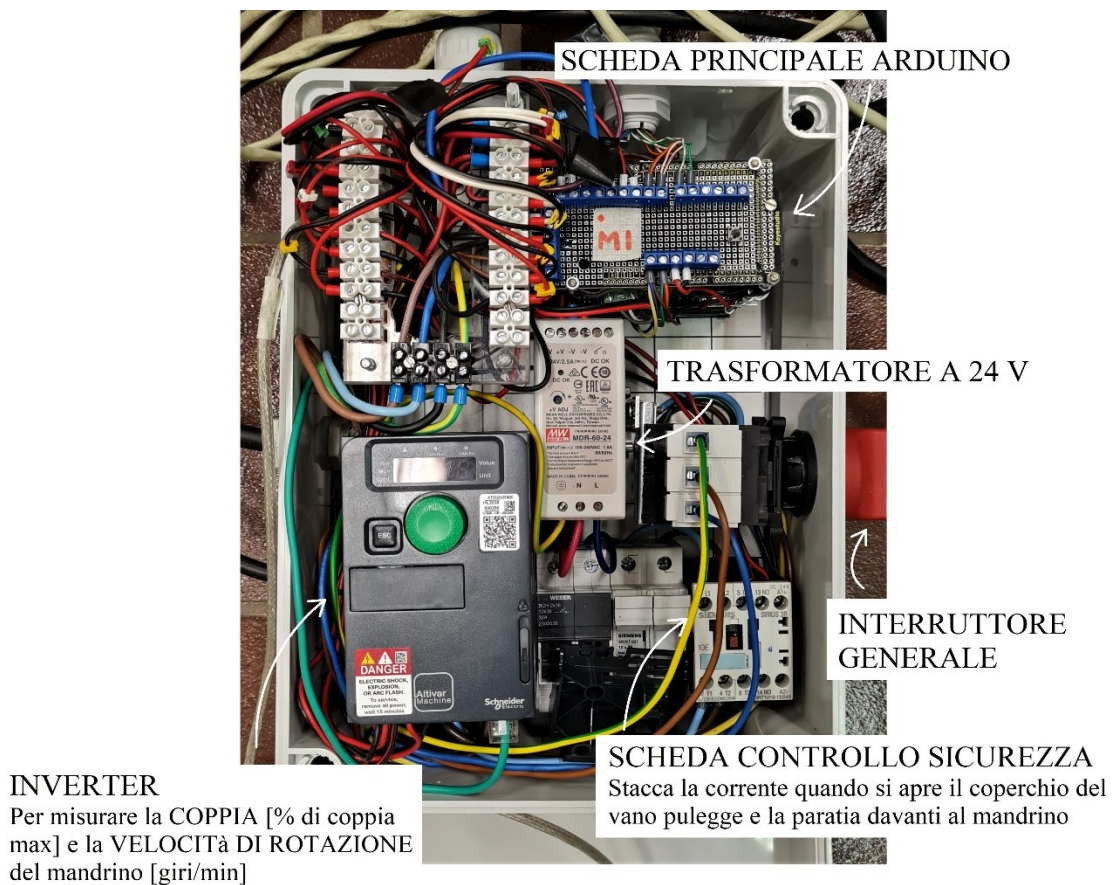


Figura 17: scatola contenente la centralina del trapano a colonna



Figura 18: inverter generico

1.5 – Interfaccia grafica di visualizzazione (“trapano chat” e “trapano web”)

Tutti i sensori elencati sono stati collegati ad una piattaforma di acquisizione e controllo (scheda Arduino Mega 2560), la quale permette di leggere tutti i dati acquisiti e comunicarli alle varie interfacce grafiche di visualizzazione.

Attraverso queste è possibile poi visualizzare e registrare in tempo reale i dati raccolti durante le varie prove di foratura in modo da poterli successivamente confrontare.

Le due interfacce grafiche sono:

- la “trapano chat”
- la “trapano web”

▪ Interfaccia “trapano chat”

Questa interfaccia (*Figura 19*) è una sorta di tabella dove in ogni colonna viene visualizzato uno specifico parametro in tempo reale, mentre nelle righe si ha lo scorrere delle misurazioni nel tempo. La frequenza di campionamento è di 5 misurazioni al secondo (una misurazione ogni 200 millisecondi) e attraverso la chat è possibile monitorare i seguenti parametri:

1. Velocità mandrino [giri/min] o [rpm]
2. Discesa mandrino [mm]
3. Altezza morsa [mm]
4. Velocità motore [giri/min] o [rpm]
5. Coppia motore [% di C_{max}] (successivamente verrà convertita in Nm)
6. Coppia mandrino [Nm] (alla quale arriveremo attraverso il rapporto di trasmissione τ di cui parleremo in seguito)
7. Angolo morsa
8. Accelerazione lungo x [m/s^2]
9. Accelerazione lungo y [m/s^2]
10. Accelerazione lungo z [m/s^2]
11. Relè Arduino [binario] (0 per spento e 1 per acceso)

12. Paratia [binario] (0 per chiusa e 1 per aperta)

13. Coperchio carter pulegge [binario] (0 per aperto e 1 per chiuso)

14. Stop di emergenza [binario] (0 per aperto e 1 per chiuso)

15. Modalità AUTO (velocità automatica data da app) [binario] (0 per spenta e 1 per accesa)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Rpm Mandrino	Discesa mandrino	Altezza morsa	Rpm motore	Coppia Motore	Coppia Motore	Coppia Mandrino	Angolo Morsa	Accelerometro X	Accelerometro Y	Accelerometro Z	Rele POWER	Paratia	Carter	Stop Emergenza	Modalita AUTO
2	rpm	mm	mm	rpm	%	Nm	Nm	°	g	g	g	bin	bin	bin	bin	bin
3	0	1	280	0	0	0.00	0.00	0	-1	-1	-1	1	0	1	0	0
4	0	1	280	0	0	0.00	0.00	0	-1	-1	-1	1	0	1	0	0
5	0	1	280	0	0	0.00	0.00	0	-1	-1	-1	1	0	1	0	0
6	0	1	280	0	0	0.00	0.00	0	-766	-436	-9047	1	0	1	0	0
7	0	1	280	511	12	0.30	0.37	0	-1	-1	-1	1	0	1	0	0
8	1740	1	290	1843	26	0.65	0.81	0	-1	-1	-1	1	0	1	0	0
9	2000	1	280	2487	24.5	0.61	0.76	0	-919	-548	-9095	1	0	1	0	0
10	2000	1	280	2505	25	0.63	0.78	0	-1166	-416	-9113	1	0	1	0	0
11	2000	1	280	2536	24.5	0.61	0.76	0	-586	-430	-8923	1	0	1	0	0
12	2000	2	280	2536	24.5	0.61	0.76	0	-699	-430	-8924	1	0	1	0	0
13	2000	1	290	2535	24.5	0.61	0.76	0	-1	-1	-1	1	0	1	0	0
14	2000	1	290	2536	24	0.60	0.75	0	-563	-378	-9055	1	0	1	0	0
15	2000	1	290	2536	24	0.60	0.75	0	-796	-531	-8958	1	0	1	0	0
16	2000	2	290	2536	24	0.60	0.75	0	-594	-422	-8875	1	0	1	0	0
17	2000	1	290	2535	23.5	0.59	0.73	0	-609	-403	-9136	1	0	1	0	0
18	2000	1	280	2535	23.5	0.59	0.73	0	-1	-1	-1	1	0	1	0	0
19	2000	4	290	2535	23.5	0.59	0.73	0	-1025	-615	-9263	1	0	1	0	0
20	2000	5	280	2536	23.5	0.59	0.73	0	-894	-418	-9225	1	0	1	0	0
21	2000	12	290	2536	23.5	0.59	0.73	0	-1	-1	-1	1	0	1	0	0
22	2000	17	290	2535	23.5	0.59	0.73	0	-628	-351	-9086	1	0	1	0	0
23	2000	19	290	2535	23.5	0.59	0.73	0	-649	-357	-8751	1	0	1	0	0
24	2000	21	290	2536	23.5	0.59	0.73	0	-832	-430	-9306	1	0	1	0	0
25	2000	24	290	2536	23.5	0.59	0.73	0	-955	-541	-9151	1	0	1	0	0
26	2000	25	290	2536	23.5	0.59	0.73	0	-679	-496	-9185	1	0	1	0	0
27	2000	27	290	2536	23.5	0.59	0.73	0	-861	-504	-9161	1	0	1	0	0
28	2000	29	290	2535	23.5	0.59	0.73	0	-1	-1	-1	1	0	1	0	0
29	2000	32	290	2535	23.5	0.59	0.73	0	-785	-463	-9459	1	0	1	0	0

Figura 19: interfaccia trapano chat

▪ **Interfaccia “trapano web”**

L’interfaccia web del trapano (Figura 20) invece risulta essere più intuitiva: sono presenti sia informazioni relative al materiale utilizzato per le prove, sia informazioni sul tipo di punta utilizzata per la lavorazione di foratura (diametro ϕ e lunghezza L); è presente inoltre un modello digitale del trapano (digital twin) in cui vengono riproposte le stesse operazioni eseguite dall’operatore in tempo reale, come la chiusura della paratia di sicurezza o la rotazione del timone per comandare la discesa del mandrino. In alto a sinistra invece vi sono le icone di funzionamento del trapano: indicano se la macchina è accesa, collegata alla rete, avviata e se la paratia risulta chiusa. Infine, sono presenti un tasto di stop di sicurezza (rosso) per l’arresto immediato e tutti gli altri parametri visti in precedenza nella “trapano chat”.

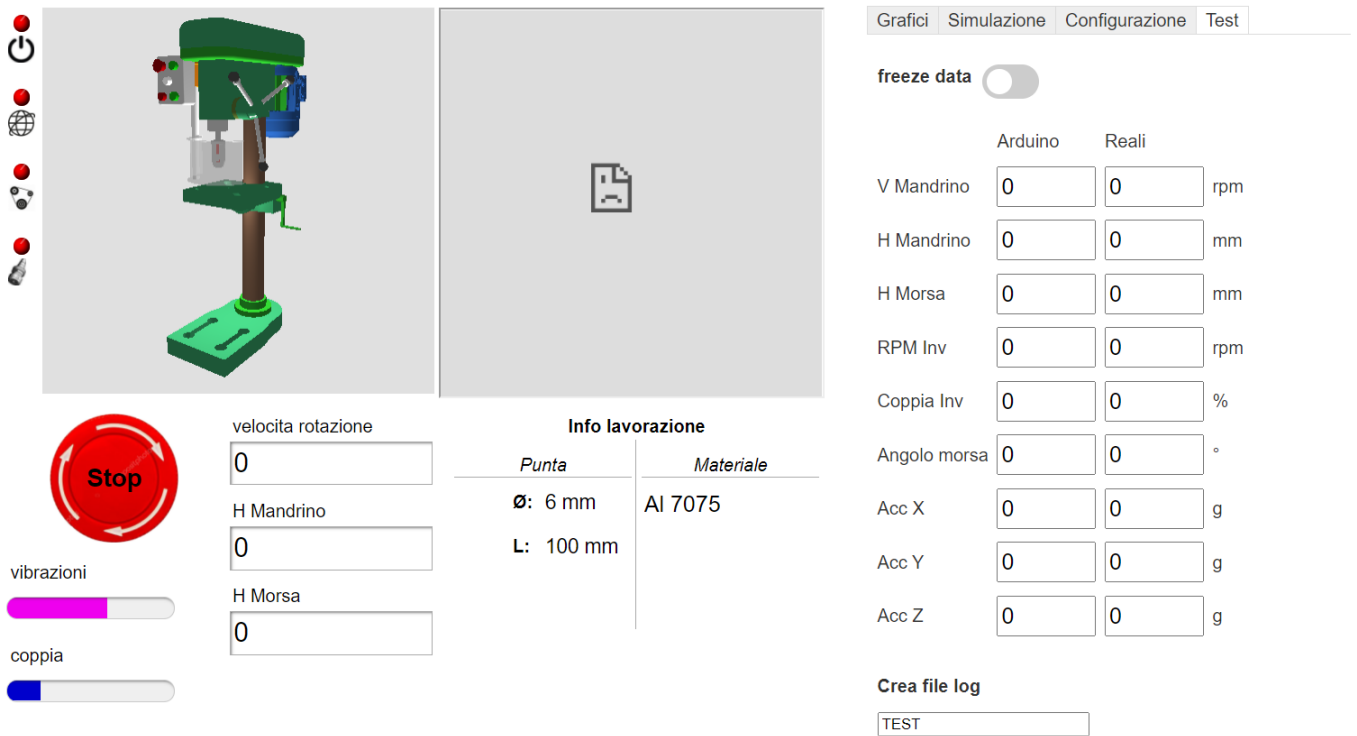


Figura 20: interfaccia trapano web

1.6 – Rapporto di trasmissione e coppia mandrino

Per ricavare la coppia data dal mandrino, conoscendo la coppia massima erogata dal motore a 50 Hz (frequenza rete europea), è stato necessario trovare il rapporto di trasmissione (τ) tra la puleggia su cui è collegato l'albero motore e la puleggia su cui è collegato l'albero del mandrino.

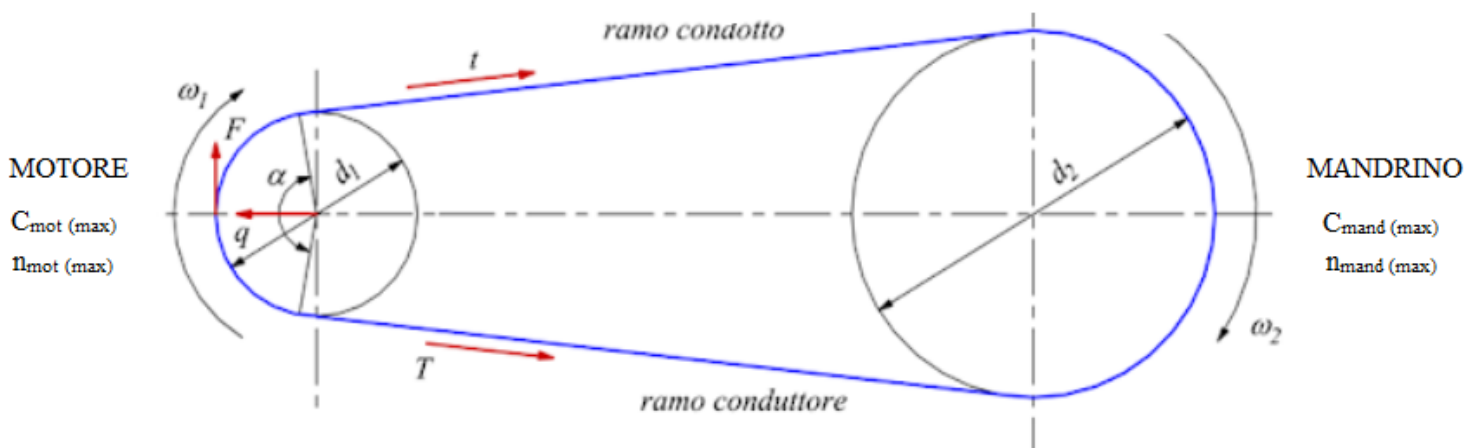


Figura 21: modello cinghie - pulegge

Il rapporto di trasmissione è stato ricavato confrontando la velocità del motore [rpm], imposta dall'inverter, e la velocità del mandrino [rpm], la quale, conseguenza della prima, figurava nell'interfaccia grafica del trapano (trapano web).

Dai dati forniti in laboratorio si evince che:

- Coppia massima motore: $C_{mot(max)} = 2,51 \text{ Nm}$
- Velocità massima di rotazione motore: $n_{mot(max)} = 3001 \text{ rpm}$
- Potenza motore: $P_{mot} = 0,75 \text{ kW} = 750 \text{ Watt}$ a 50 Hz (frequenza rete europea)

Dall'interfaccia grafica (trapano web) invece:

- Velocità massima di rotazione mandrino: $n_{mand(max)} = 2460 \text{ rpm}$

Di fatto non conosciamo la coppia massima del mandrino $C_{mand(max)}$ (dato necessario per confrontare le diverse prove effettuate con la macchina utensile), la quale è in funzione della coppia massima del motore $C_{mot(max)}$.

Sapendo che

$$P [W] = C [Nm] * \omega \left[\frac{rad}{s} \right] \text{ con } \omega = \text{velocità angolare di rotazione}$$

trascurando gli attriti e i possibili slittamenti della cinghia sulle pulegge (caso in cui il rendimento $\eta = \frac{P_{mot}}{P_{mand}} = 1$), si può affermare che:

$$P_{mand} = P_{mot}$$

allora

$$C_{mot} [Nm] * \omega_{mot} \left[\frac{rad}{s} \right] = C_{mand} [Nm] * \omega_{mand} \left[\frac{rad}{s} \right]$$

da cui possiamo ricavare:

$$C_{mand} = C_{mot} * \frac{\omega_{mot}}{\omega_{mand}}$$

Dato che

$$\frac{\omega_{mot}}{\omega_{mand}} = \frac{n_{mot}}{n_{mand}} = \tau$$

$$\text{con } n [rpm] = \omega [rad/s] * \frac{60}{2\pi}$$

$$\text{e quindi } 1[rpm] = \frac{2\pi}{60} [rad/s]$$

ne deriva che

$$C_{mand} = C_{mot} * \tau$$

Tuttavia, al fine di ottenere un rapporto di trasmissione abbastanza preciso, eseguiremo diverse simulazioni in cui ricaveremo τ a differenti giri del motore e del mandrino (rpm visualizzati nell'interfaccia grafica); infine calcoleremo la media dei valori ricavati in modo da ottenere il rapporto di trasmissione di riferimento.

Quindi, essendo $\tau = \frac{n_{mot}}{n_{mand}}$, abbiamo allora:

$$1. \tau = \frac{n_{mot \max}}{n_{mand \max}} = \frac{3001 \text{ rpm}}{2460 \text{ rpm}} = 1,22$$

$$2. \tau = \frac{1852 \text{ rpm}}{1500 \text{ rpm}} = 1,23$$

$$3. \tau = \frac{2273 \text{ rpm}}{1800 \text{ rpm}} = 1,26$$

$$4. \tau = \frac{2602 \text{ rpm}}{2100 \text{ rpm}} = 1,24$$

$$5. \tau = \frac{1487 \text{ rpm}}{1200 \text{ rpm}} = 1,24$$

$$6. \tau = \frac{1264 \text{ rpm}}{1020 \text{ rpm}} = 1,24$$

$$7. \tau = \frac{740 \text{ rpm}}{600 \text{ rpm}} = 1,23$$

$$8. \tau = \frac{2400 \text{ rpm}}{1920 \text{ rpm}} = 1,25$$

Calcoliamo la media:

$$\begin{aligned} \text{media } (\bar{x}) &= \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n^{\circ} \text{ prove}} = \\ &= \frac{1,22 + 1,23 + 1,26 + 1,24 + 1,24 + 1,24 + 1,23 + 1,25}{8} = 1,24 = \tau \end{aligned}$$

Essendo $\tau > 1$, è ormai noto che abbiamo una trasmissione con riduzione di velocità.

Ora, conoscendo il τ di riferimento e sapendo che la coppia massima del motore è pari a 2,51 Nm, possiamo calcolare la coppia massima del mandrino:

$$C_{\text{mand}} (\text{max}) = C_{\text{mot}} (\text{max}) * \tau = 2,51 \text{ Nm} * 1,24 = 3,11 \text{ Nm}$$

Quindi, per un rapporto di trasmissione $\tau = 1,24$ abbiamo una coppia massima del mandrino pari a 3,11 Nm.

1.7 – Lavorazioni per asportazione di truciolo: la foratura

Le lavorazioni per asportazione di truciolo consistono in un processo in cui il materiale in eccesso viene rimosso da un utensile di maggior durezza, attraverso un processo meccanico di deformazione plastica (R+W ITALIA S.R.L, 2022). Per ogni lavorazione effettuata con macchine utensili, l'utensile e il pezzo devono compiere dei movimenti che consentono l'asportazione di materiale (detto "truciolo") secondo spessori e superfici variabili. Questi movimenti relativi tra utensile e pezzo si distinguono in tre moti principali: *moto di taglio*, *moto di avanzamento* e *moto di lavoro* (C. Amerio, 2011).

- ***Moto di taglio***: è quello attraverso il quale l'utensile, opportunamente montato, effettua una singola asportazione di truciolo (*Figura 22*). Ha lo scopo di creare la necessaria velocità relativa fra pezzo e utensile, e può essere rotatorio o rettilineo. Definisce la direzione e la velocità di taglio.

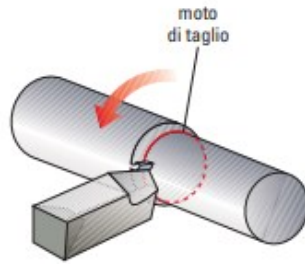


Figura 22: esempio di moto di taglio, nel quale l'utensile descrive una circonferenza sul pezzo posto in rotazione

- **Moto di avanzamento:** è quello che, aggiunto al moto di taglio, favorisce la formazione dei trucioli e ne rende possibile l'asportazione in maniera ripetuta e continua (Figura 23). Può essere continuo o intermittente e definisce la direzione e la velocità di avanzamento.

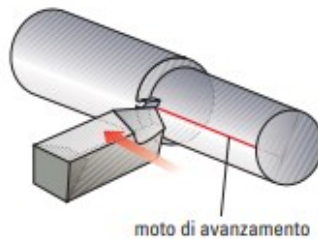


Figura 23: esempio di moto di avanzamento. Il tagliente, durante la rotazione del pezzo, viene traslato in modo da ottenere il distacco del

- **Moto di lavoro:** è quello che risulta dalla composizione simultanea del moto di taglio e di quello di avanzamento (Figura 24).

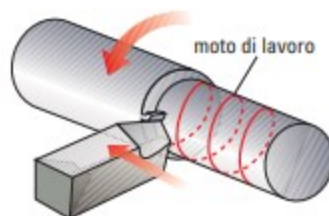


Figura 24: esempio di moto di lavoro. Nella lavorazione rappresentata in figura la composizione dei moti di taglio e di avanzamento dà origine a una traiettoria elicoidale tracciata dall'utensile sulla circonferenza del pezzo

La foratura, pilastro fondamentale dell'attività di tirocinio svolta in laboratorio, è una lavorazione per asportazione di truciolo che permette di realizzare fori di vario diametro e profondità mediante l'utilizzo di un utensile rotante e traslante in direzione assiale. I fori sono eseguiti tramite il moto rotatorio della punta elicoidale lungo il proprio asse (*moto di taglio* continuo e rotatorio e appartiene all'utensile) e tramite la traslazione longitudinale dell'utensile lungo il medesimo asse (*moto di avanzamento* continuo e traslatorio e appartiene all'utensile) (*Figura 25*). Il *moto di lavoro* è elicoidale.

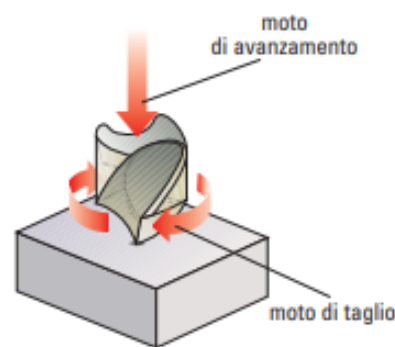


Figura 25: moto di taglio e di avanzamento nella foratura

Nell'operazione di foratura, inizialmente, il pezzo viene montato sulla macchina, predisposta con le velocità di taglio e di avanzamento più adatte alle caratteristiche del materiale e dell'utensile, in modo tale che l'asse del mandrino passi per il centro del foro.

Gli utensili per la foratura sono le punte elicoidali (*Figura 26*), generalmente di acciaio rapido o super rapido, più raramente di carburi metallici sinterizzati; esse sono costituite da un corpo tagliente, comprendente una punta opportunamente angolata e due coltelli ad andamento elicoidale, e da un codolo di attacco cilindrico o conico per il fissaggio al mandrino. L'efficacia dell'azione perforante delle punte elicoidali dipende, oltre che dalla qualità del materiale con il quale sono costruite, dall'angolazione della punta (angolo σ) e dall'inclinazione dei coltelli ad andamento elicoidale che costituiscono il corpo tagliente (angolo ϕ) (*Figura 27*). A seconda di queste caratteristiche (angolazione della punta e inclinazione dell'elica), le punte elicoidali possono essere di tre tipi (*Figura 28*):

- tipo T, adatte per forare materiali teneri;
- tipo M, adatte per forare materiali normali;
- tipo D, adatte per forare materiali duri (C. Amerio, 2011).

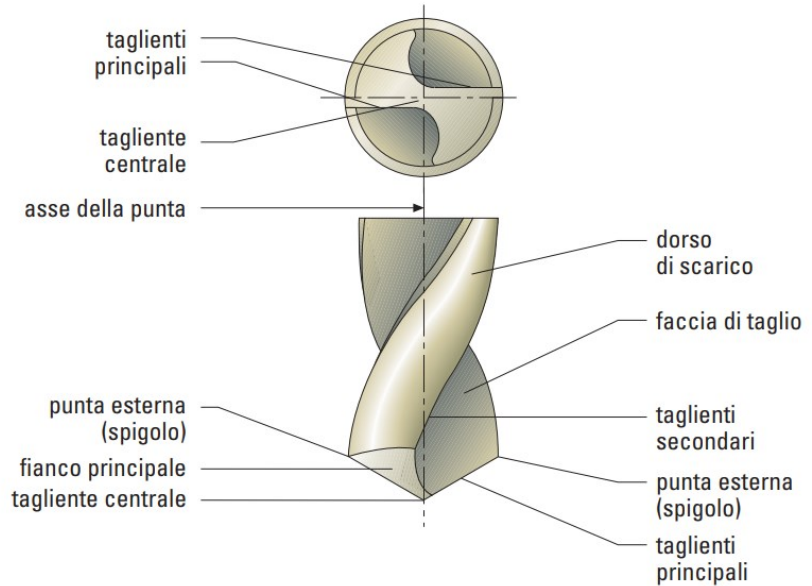


Figura 26: punte elicoidali per effettuare fori di vario diametro

Figura 27: componenti di una punta elicoidale

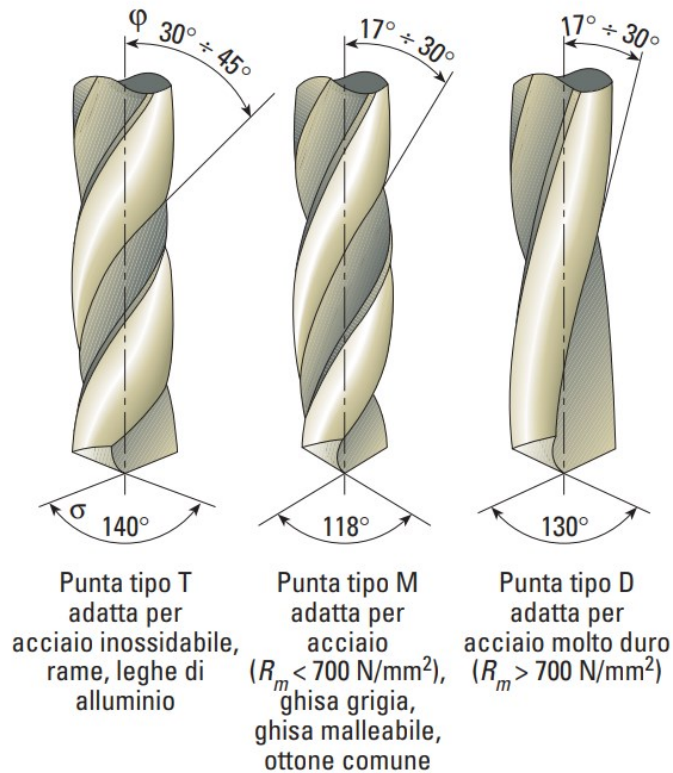


Figura 28: angoli caratteristici delle punte da trapano

I parametri di taglio che prenderemo in considerazione per eseguire l'operazione di foratura sono: *velocità di taglio* (v_t), *velocità di avanzamento* (v_a), *profondità di passata* (p).

- La ***velocità di taglio*** (v_t), intesa come velocità relativa tra l'utensile e il pezzo in lavorazione nel punto in cui avviene l'asportazione di truciolo, viene definita come velocità periferica del moto circolare dell'utensile (come nel caso della foratura) o del pezzo nella direzione del moto di taglio. È un dato di importanza fondamentale, da tener sempre presente nelle lavorazioni alle macchine utensili in quanto una corretta scelta della velocità di taglio, ricavata da apposite tabelle, non solo assicura la buona esecuzione del lavoro e la riduzione dei tempi, ma soprattutto evita il rapido deterioramento dell'utensile. La scelta della velocità di taglio è influenzata da:

- tipo di materiale da lavorare;
- tipo di materiale dell'utensile;
- sezione del truciolo che si vuole asportare;
- presenza di liquido lubrificante;
- diametro del pezzo da lavorare;
- tipo di lavorazione.

L'unità di misura della velocità di taglio è espressa in metri al minuto (m/min) (C. Amerio, 2011).

$$v_t = \frac{\pi * D * n}{1000} \left[\frac{m}{min} \right]$$

con

D = diametro della punta [mm]

n = giri al minuto della punta $\left[\frac{giri}{min} \right]$ o [rpm]

- La ***velocità di avanzamento*** (v_a) è la velocità dell'utensile (come nel caso della foratura) o del pezzo nella direzione del moto di avanzamento. Tale parametro

ha un forte impatto sulla rugosità teorica ottenibile: più la velocità di avanzamento è bassa e migliore sarà la finitura superficiale del pezzo lavorato. L'unità di misura, in questo caso, è espressa in millimetri al minuto (mm/min). La velocità di avanzamento dipende dall'*avanzamento* (a), espresso in millimetri per giro (mm/giro), il quale rappresenta lo spostamento dell'utensile o del pezzo nella direzione del moto di avanzamento, per ogni giro completato dall'utensile o dal pezzo stesso. Più l'avanzamento è piccolo, migliore sarà la finitura superficiale.

$$v_a = n * a \left[\frac{mm}{min} \right]$$

con

n = giri al minuto della punta $\left[\frac{giri}{min} \right]$ o $[rpm]$

a = avanzamento dell'utensile $\left[\frac{mm}{giro} \right]$

- La **profondità di passata** (p) è lo spessore di materiale da asportare misurato in direzione perpendicolare all'avanzamento. Tale parametro viene espresso in millimetri (mm).

1.8 – Materiale usato

Il materiale utilizzato durante le prove di foratura è una barra piatta di alluminio serie 6000 (alluminio - silicio - magnesio), dello spessore di 10 mm (*Figura 29 e 30*).

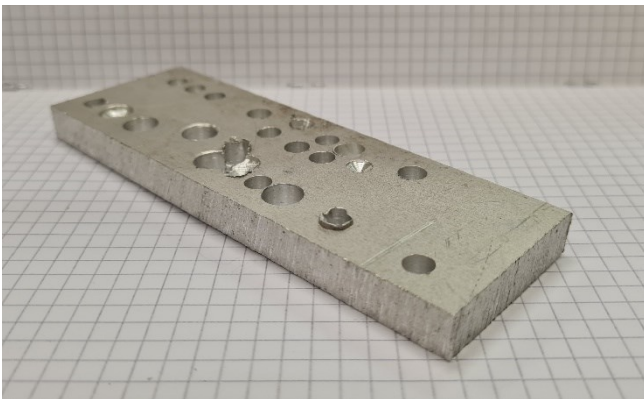


Figura 29: barra piatta di alluminio

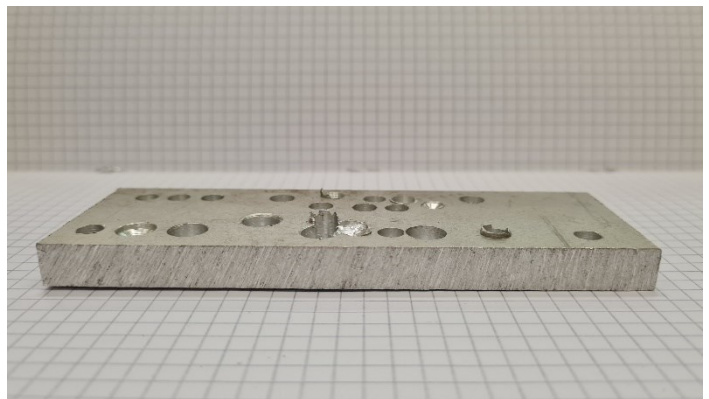


Figura 30: barra piatta di alluminio - vista laterale

La lega di alluminio serie 6000 si caratterizza per la buona lavorabilità (sia a caldo che a freddo), resistenza meccanica e alla corrosione; ciò la rende indicata per la lavorazione alle macchine utensili.

1.9 – Lavorazione effettuata e parametri di foratura

La lavorazione effettuata consiste in una foratura passante della barra piatta utilizzata nelle prove, ovvero con fori che attraversano tutto il pezzo.

Dato che il materiale in questione è l'alluminio, ovvero un materiale tenero e duttile, che tende ad impastare la punta utilizzata durante la lavorazione per via del suo punto di fusione relativamente basso (a causa della generazione di calore nella zona interessata dallo strappamento di materiale, questo tende ad ammorbidirsi, e di fatto il truciolo generato tende a fondere e ad aderire ai taglienti dell'utensile (*Figura 31*), intasandone i canali di evacuazione), è necessario utilizzare punte specifiche per alluminio (per garantire un'evacuazione del truciolo più agevole) ed avere una velocità di taglio elevata.



Figura 31: adesione del truciolo al tagliente dell'utensile

con

$D =$ diametro della punta [mm]

$n =$ giri al minuto della punta $\left[\frac{\text{giri}}{\text{min}}\right]$ o [rpm]

allora per

$D = 6 \text{ mm}$

$n = 2000 \text{ rpm}$

abbiamo che:

$$v_t = \frac{\pi * 6 * 2000}{1000} = 37,7 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

▪ Velocità di avanzamento

Sapendo che

$$v_a = n * a \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$$

con

$n =$ giri al minuto della punta $\left[\frac{\text{giri}}{\text{min}}\right]$ o [rpm]

$a =$ avanzamento dell'utensile $\left[\frac{\text{mm}}{\text{giro}}\right]$

allora per

$n = 2000 \text{ rpm}$

$a = 0,14 \frac{\text{mm}}{\text{giro}}$

abbiamo che:

$$v_a = 2000 * 0,14 = 280 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

1.10 – Modalità di lavorazione e buone prassi per lavorare in sicurezza

Le operazioni da effettuare per una buona lavorazione del pezzo sono:

1. Bloccare il pezzo sulla tavola porta pezzo del trapano tramite l'apposita morsa.
2. Montare l'utensile nel mandrino, bloccandolo con l'apposita chiave.

3. Accendere il trapano.
4. Portare gradualmente la punta a contatto con il pezzo da forare fino a concludere la lavorazione.
5. Spegnerne il motore una volta conclusa la precedente operazione.

Di seguito, invece, sono state riportate alcune delle buone prassi a cui attenersi per lavorare in sicurezza, attendendosi alla norma UNI EN 12717:

- Siano presenti gli schermi di protezione per intercettare i materiali proiettati, senza essere di intralcio alla lavorazione. Tale riparo deve essere resistente all'urto, circoscrivere tutta la zona pericolosa e consentire una completa visibilità.
- Siano operativi ed efficienti i dispositivi di interblocco (a protezione sia degli schermi che del coperchio di chiusura del vano contenente gli organi di trasmissione) che blocchino la macchina e non ne permettano il funzionamento a sportello aperto.
- Sia presente ed efficiente il sistema per la prevenzione di avviamenti involontari.
- Le punte di foratura siano correttamente e adeguatamente serrate nel mandrino per evitare l'inzeppamento o la rottura delle stesse.
- Il pezzo da forare sia correttamente e adeguatamente bloccato con l'apposito supporto di serraggio regolabile (morsa) per evitare che questo possa alzarsi e ruotare con la punta stessa.
- L'operatore indossi idonei dispositivi di protezione individuale (come occhiali di protezione e guanti) per salvaguardare la propria sicurezza da eventi pericolosi legati alle lavorazioni, come ad esempio:
 - contatto diretto o indiretto con cavi elettrici;
 - contatto con parti rotanti in movimento;
 - contatto con parti spigolose;
 - proiezioni di parti di utensile o di materiale in lavorazione (frammenti).
- L'abbigliamento dell'operatore sia quello prescritto per il tipo di lavorazione.

Capitolo 2

Analisi prove eseguite

2.1 – Prefazione

Le prove di foratura sono state tutte eseguite con una punta HSS di diametro 6 mm ben affilata sullo stesso campione di alluminio serie 6000 di spessore 10 mm.

In particolare, nella prova svolta nelle normali condizioni di lavoro, si fa allusione ai parametri di taglio che abbiamo trattato in precedenza. Tale test ha lo scopo di definire il comportamento di riferimento con cui confrontare i test successivi effettuati in condizioni anomale e di non sicurezza.

In ogni caso, in tutte le prove l'avanzamento è unico, ovvero l'operazione di foratura viene effettuata in un unico passaggio fino ad attraversare tutto il pezzo; la discesa del mandrino è graduale, senza forzare la punta sul provino per evitare l'intasamento del truciolo sui taglienti dell'utensile.

Infine, tutti i dati sono stati raccolti tramite le interfacce grafiche col trapano già avviato (tranne nella prova in condizioni di sicurezza per avere informazioni di coppia e velocità anche all'avvio), in modo da non avere problemi durante la registrazione degli stessi.

Con l'ausilio di Microsoft Excel sono stati creati dei grafici per rendere più immediato lo studio del comportamento del trapano durante le diverse prove.

I test di foratura svolti si dividono in:

- prova svolta in normali condizioni di lavoro e sicurezza (2000 rpm);
- prove svolte in condizioni di lavoro anomale e di non sicurezza.

Nello specifico, il trapano a colonna presente in laboratorio è stato sottoposto a sei prove in condizioni di non sicurezza. Tali prove sono:

- basso numero di giri del mandrino (1000 rpm);

- basso numero di giri del mandrino (500 rpm);
- punta fuori asse (1000 rpm);
- punta lenta (2000 rpm);
- pezzo inclinato (2000 rpm);
- pezzo non bloccato (2000 rpm).

2.2 – Test 1: normali condizioni di lavoro e sicurezza (2000 rpm)

Con riferimento a quanto detto, tale prova è stata effettuata a 2000 rpm secondo i parametri di taglio visti e secondo le disposizioni di sicurezza citate nel *Paragrafo 1.8*.

TEST 1 - NORMALI CONDIZIONI DI LAVORO E SICUREZZA (2000 rpm)

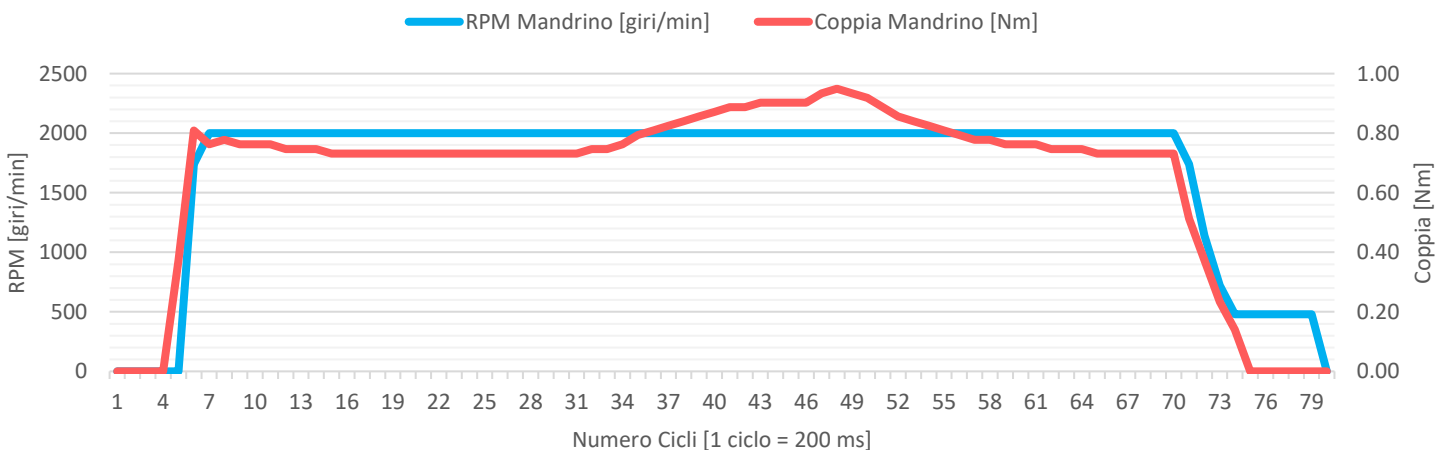


Grafico 1.1: rpm mandrino – coppia mandrino

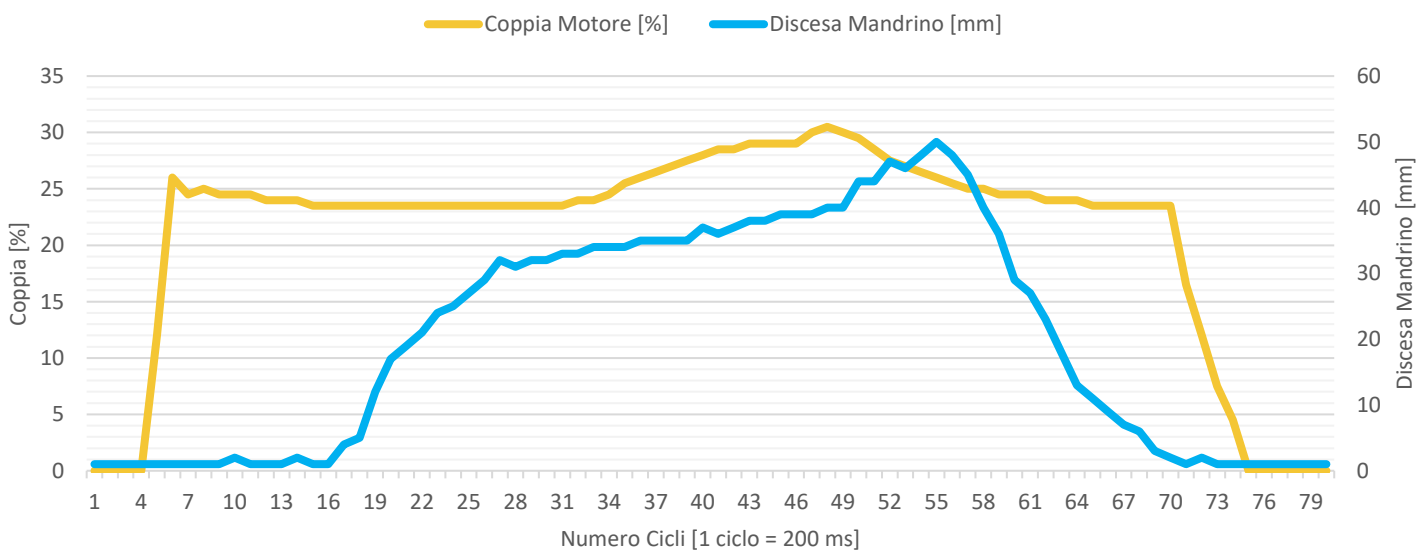


Grafico 1.2: coppia motore - discesa mandrino

TEST 1 - NORMALI CONDIZIONI DI LAVORO E SICUREZZA (2000 rpm)

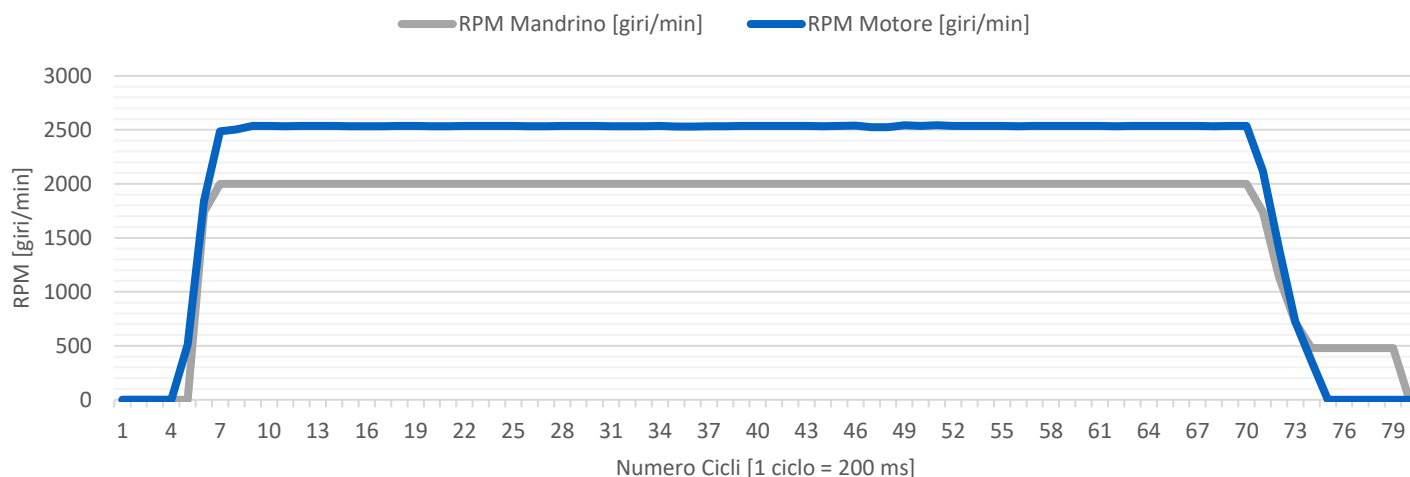


Grafico 1.3: rpm mandrino - rpm motore

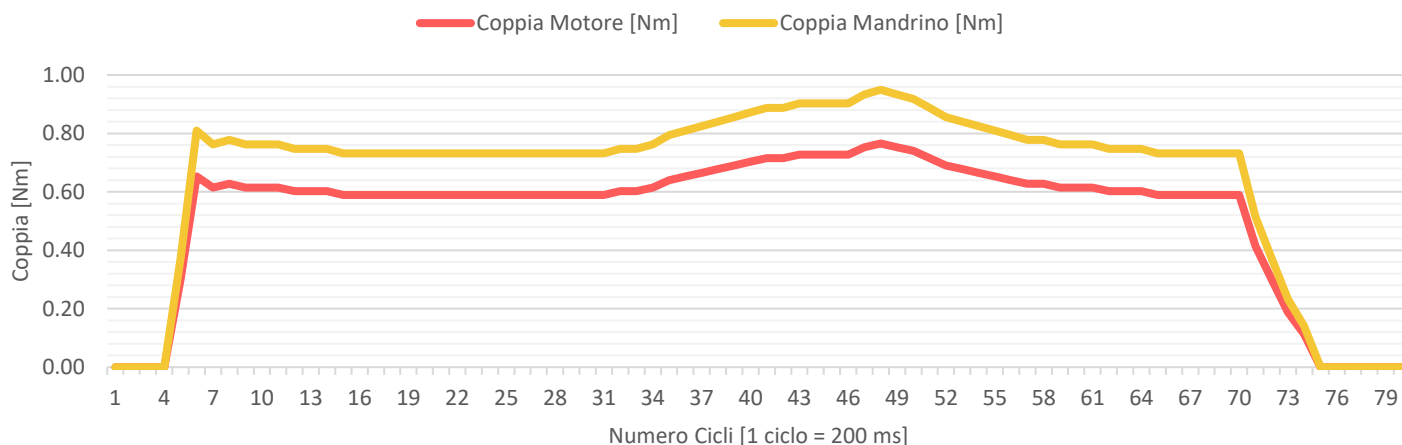


Grafico 1.4: coppia motore - coppia mandrino

In normali condizioni di lavoro, osservando i grafici di velocità, coppia e discesa mandrino, si può vedere come la velocità di rotazione del mandrino (2000 rpm) rimane costante per tutta la durata della prova. Di fatto, essa è legata alla coppia motore (e di conseguenza alla coppia mandrino) che deve aumentare per vincere l'attrito generato dalla punta al contatto col pezzo e che impedirebbe al tagliente di scorrere e asportare materiale, in modo da mantenere costante la velocità di rotazione della punta stessa. Si osserva infatti un aumento regolare della coppia motore, proporzionale alla discesa del mandrino (*Grafico 1.2*), fino a raggiungere un picco massimo durante la lavorazione pari a 0,77 Nm (*Grafico 1.4*).

Questi valori verranno presi come punto di riferimento e di confronto per le successive prove.

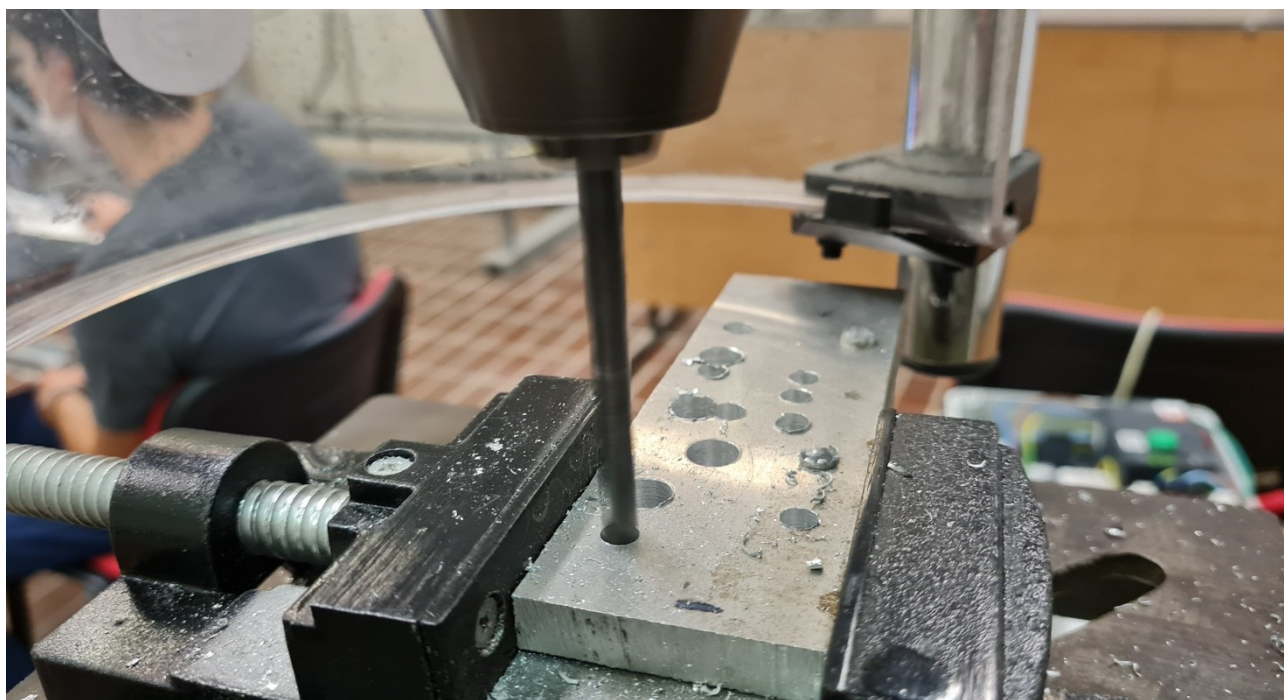


Figura 33: foratura in normali condizioni di lavoro. Foto scattata durante la prova

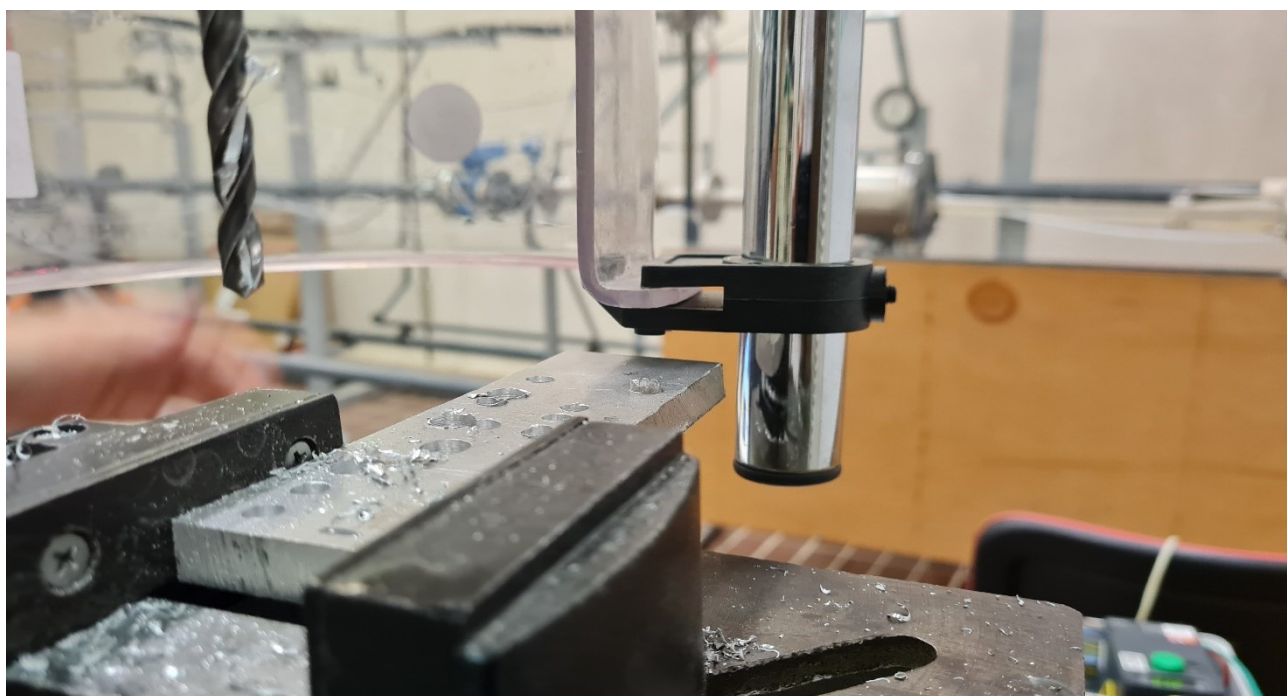


Figura 34: foratura in normali condizioni di lavoro. Foto scattata a prova ultimata

2.3 – Test 2: basso numero di giri del mandrino (1000 rpm)

In questo test è stata impostata una velocità di rotazione del mandrino di 1000 rpm, la metà della velocità consigliata per operare in condizioni di sicurezza, al fine di analizzare il grafico della coppia e studiare gli eventuali comportamenti anomali che possono essere pericolosi per l'operatore.

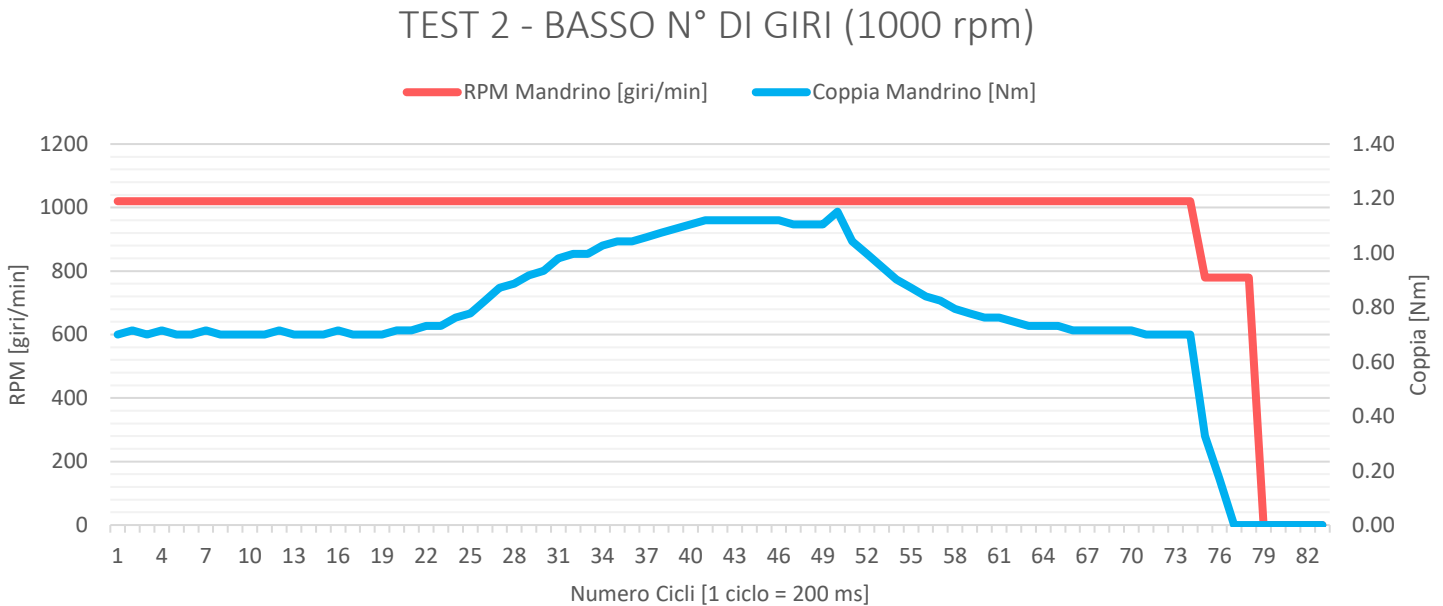


Grafico 2.1: rpm mandrino - coppia mandrino

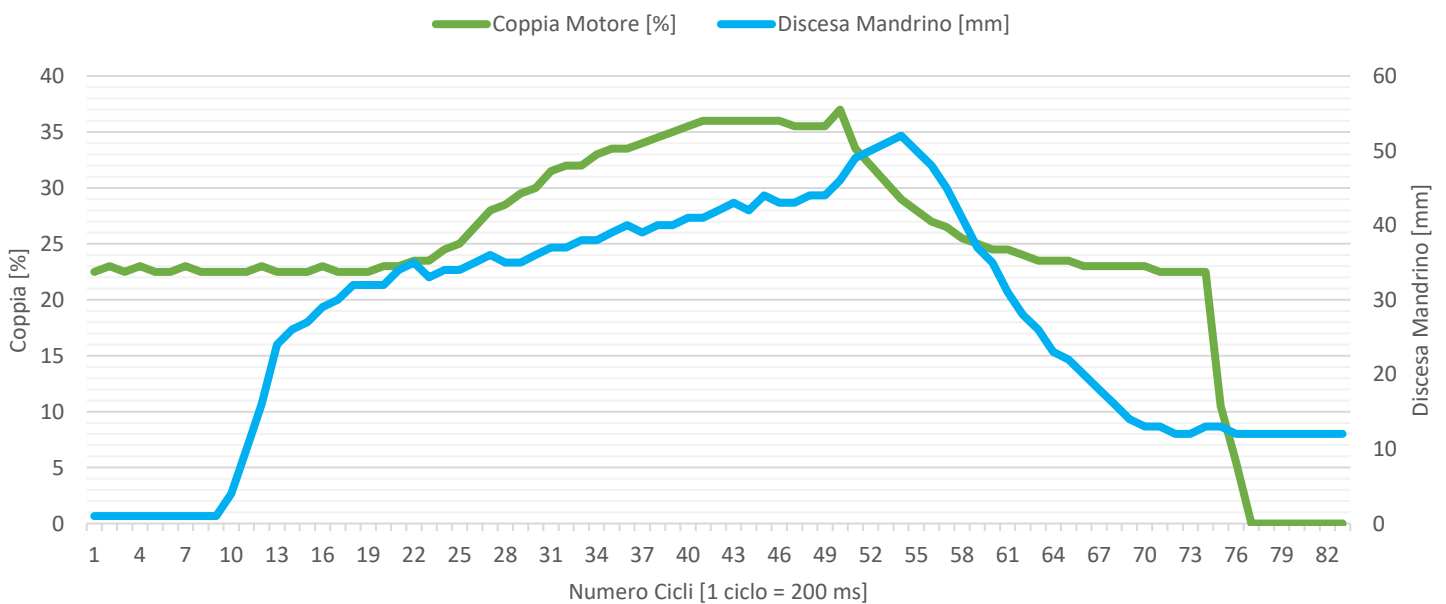


Grafico 2.2: coppia motore - discesa mandrino

TEST 2 - BASSO N° DI GIRI (1000 rpm)

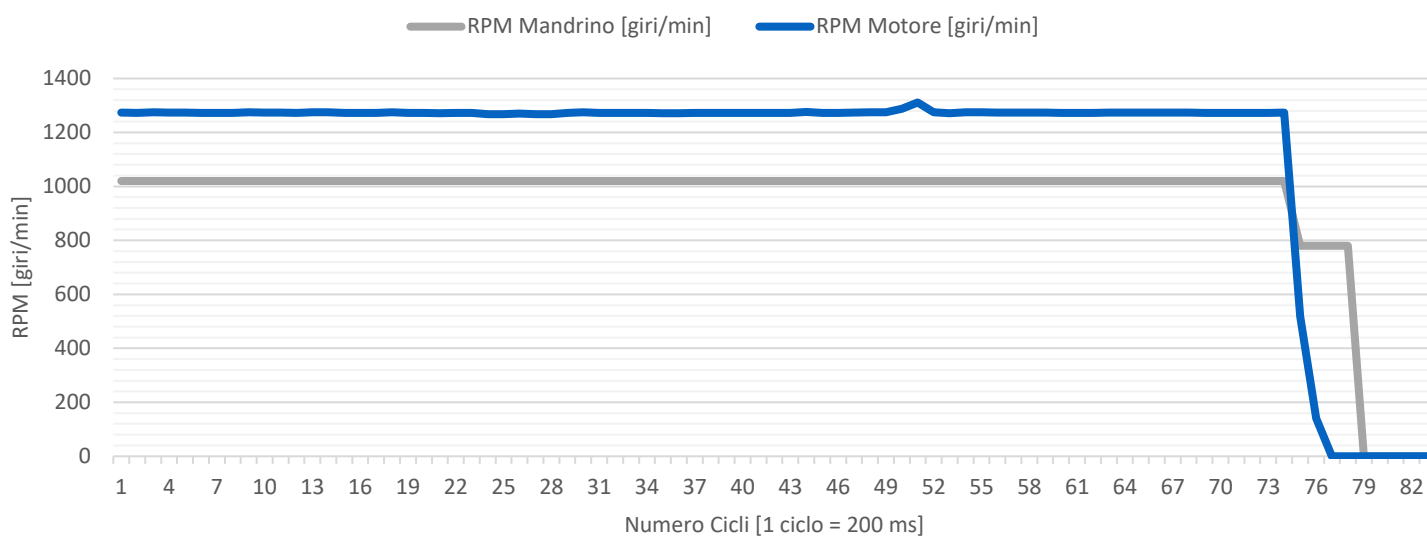


Grafico 2.3: rpm mandrino - rpm motore

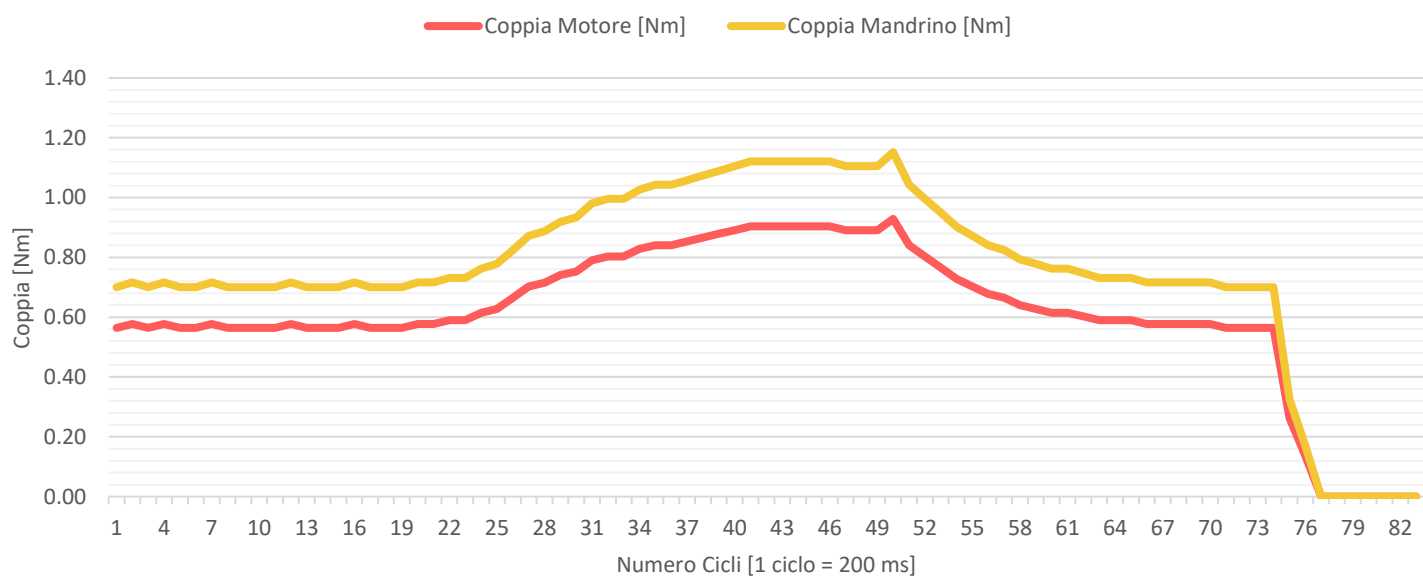


Grafico 2.4: coppia motore - coppia mandrino

Come quanto avvenuto nel “Test 1 – foratura in normali condizioni di lavoro e sicurezza”, anche in questo caso si può osservare un andamento regolare della coppia motore e della velocità di rotazione: alla discesa del mandrino corrisponde un aumento della coppia motore.

Tuttavia, il valore di coppia massima è di 0,93 Nm (*Grafico 2.4*) e si verifica poco prima della condizione di discesa massima del mandrino (*Grafico 2.2*), ovvero poco

prima che la punta attraversi il pezzo. Poiché il trapano mantiene costante la velocità di rotazione impostata, effettuando la foratura a 1000 rpm, la coppia richiesta è maggiore rispetto alla foratura effettuata a 2000 rpm.

In conclusione, seppur la macchina lavora sotto sforzo per via di una velocità ridotta, dovendo necessariamente aumentare la coppia fornita, si può affermare che, pur adottando una velocità di rotazione errata di 1000 rpm, l'operatore lavora in sicurezza. Quindi, utilizzare una velocità di poco inferiore rispetto a quella consigliata non dovrebbe compromettere la sicurezza dell'operatore, ma può portare ad un leggero sovraccarico della macchina.

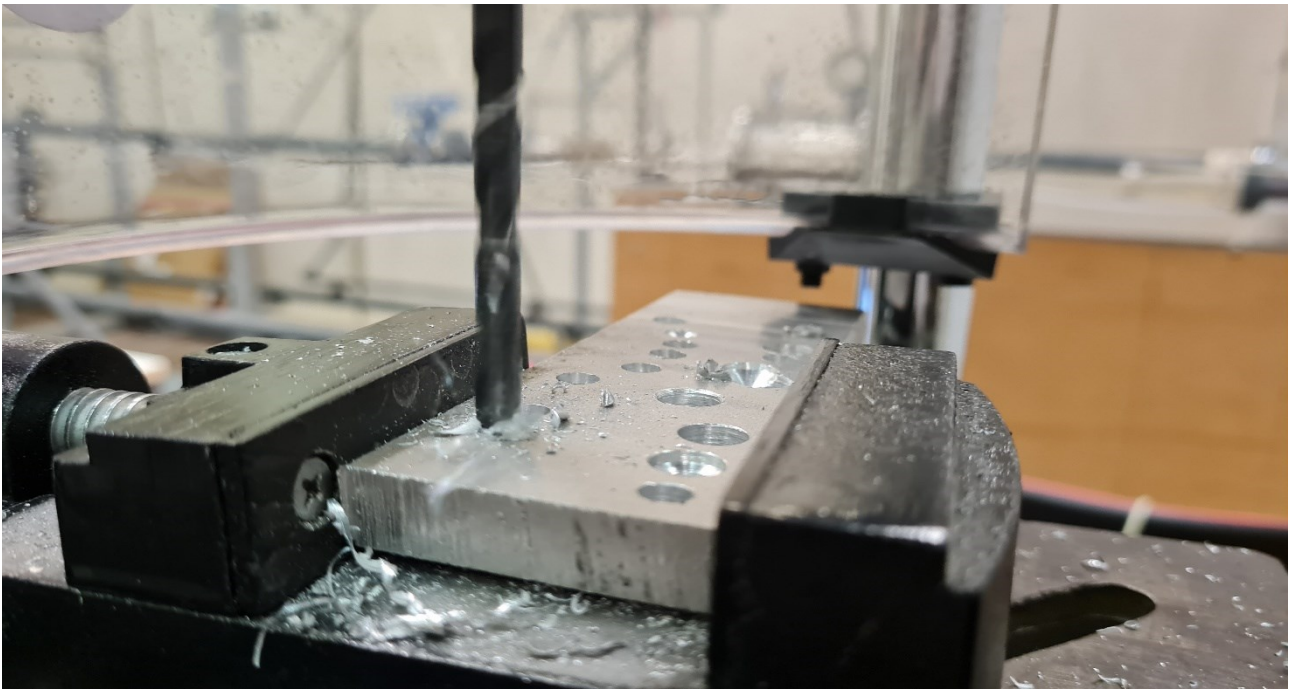


Figura 35: foratura a 1000 rpm. Foto scattata ad inizio lavorazione

2.4 – Test 3: basso numero di giri del mandrino (500 rpm)

Nel terzo test è stata adottata una velocità di rotazione della punta di circa 500 rpm, un quarto del valore consigliato dalle tabelle per la foratura dell'alluminio (*tab. INECO, Paragrafo 1.6*) pari a 2000 rpm.

Procedendo con la foratura ed abbassando gradualmente il mandrino, dopo pochi secondi dall'inizio della lavorazione (circa 16 sec.) si è verificato, per una piccola frazione di tempo, uno slittamento della punta sul mandrino (*Figura 36 e 37*): l'utensile, non riuscendo più a vincere l'attrito generato dal contatto col pezzo per via della bassa velocità di rotazione, rimane incastrato nel provino mentre il mandrino continua a girare alla velocità imposta. Per evitare danni, il mandrino è stato sollevato (*Grafico 3.2, 77° ciclo*) e la prova si è conclusa.

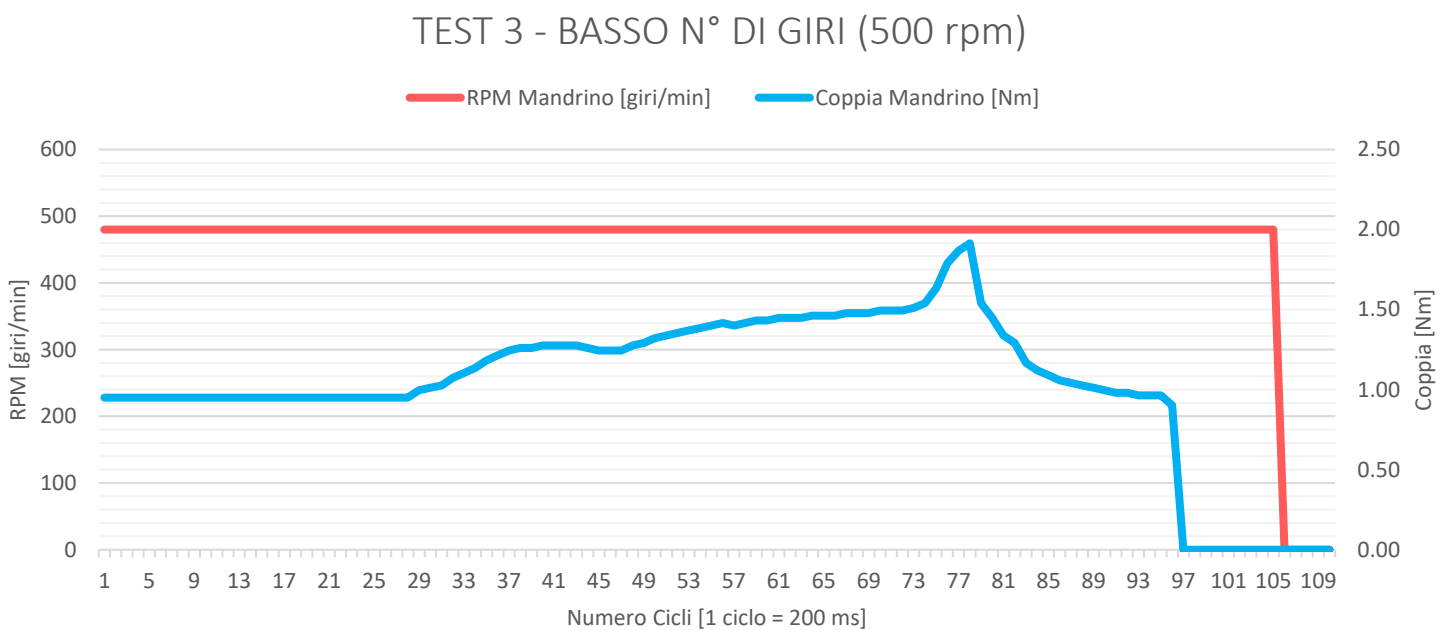


Grafico 3.1: rpm mandrino - coppia mandrino

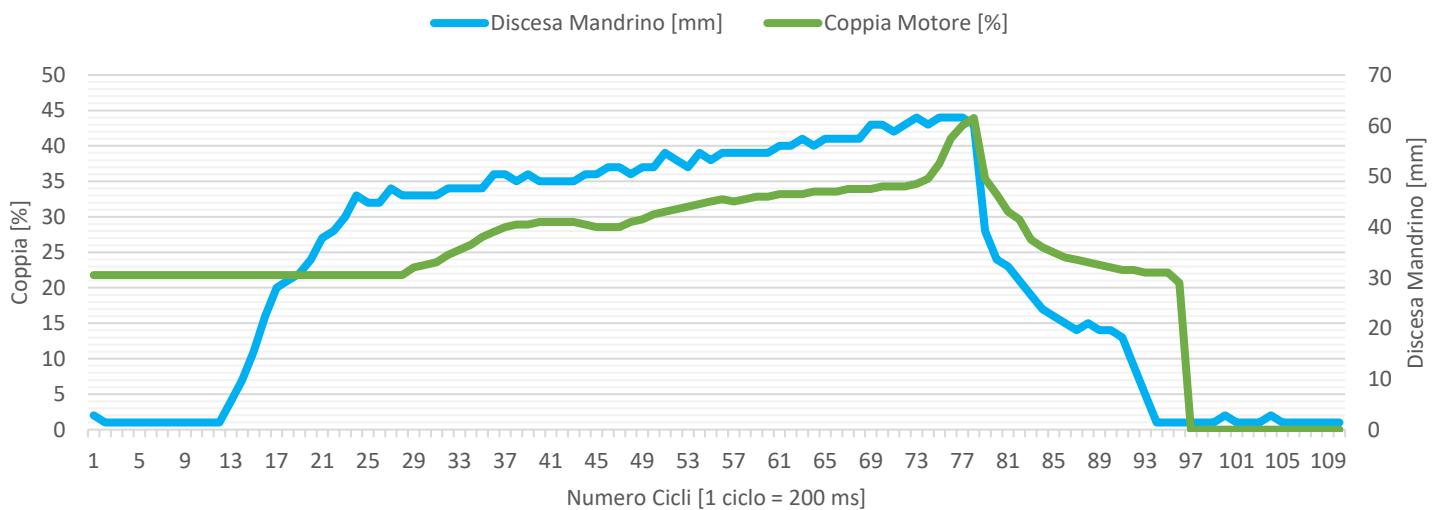


Grafico 3.2: discesa mandrino - coppia motore

TEST 3 - BASSO N° DI GIRI (500 rpm)

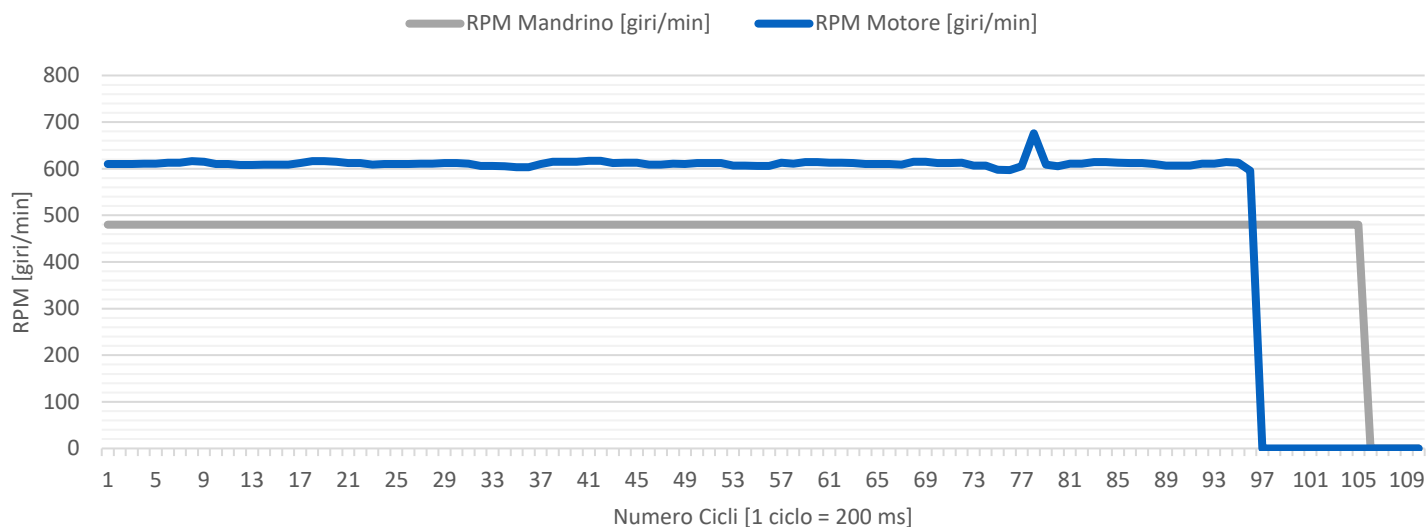


Grafico 3.3: rpm mandrino - rpm motore

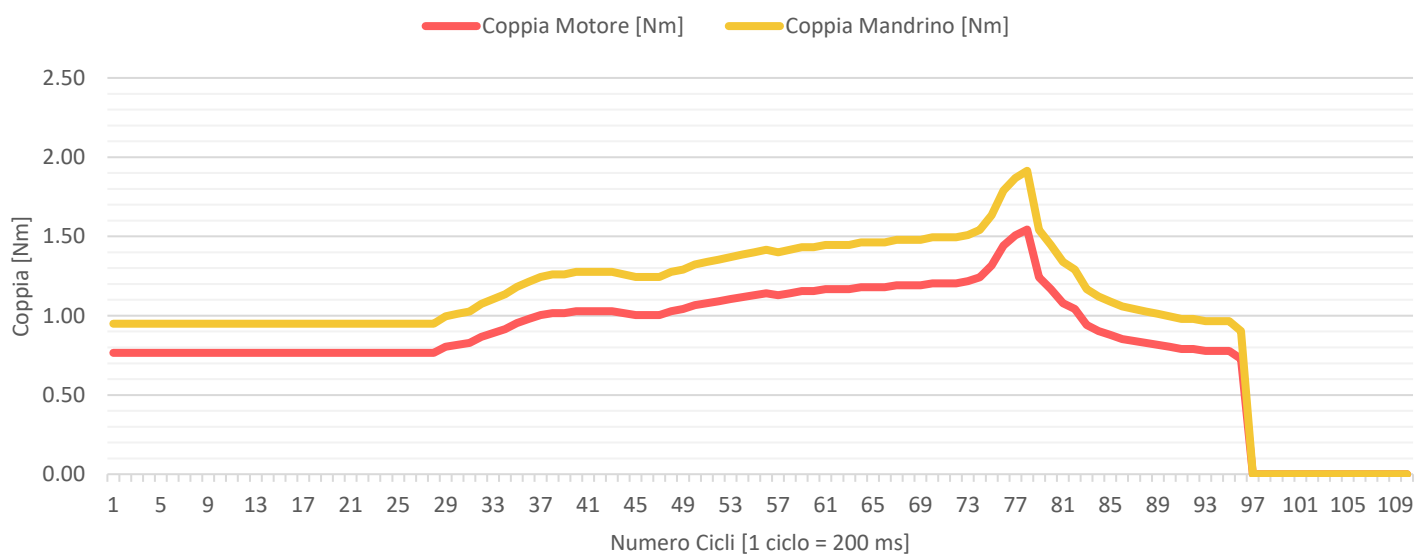


Grafico 3.4: coppia motore - coppia mandrino

Nel momento dello slittamento è stata registrato un picco di coppia del motore pari a 1,54 Nm, ovvero il doppio rispetto alla coppia massima registrata in condizioni di sicurezza (0,77 Nm), ed un leggero aumento della velocità di rotazione del motore (*Grafico 3.3*) dovuto, appunto, allo slittamento del mandrino.

Inoltre, si è visto che a tale velocità (500 rpm), rispetto a quella raccomandata, si genera truciolo continuo che tende ad “arrampicarsi” lungo la punta (*Figura 36 e 37*) senza riuscire ad essere evacuato dall’utensile stesso per via della bassa velocità di rotazione. In conclusione, una velocità di rotazione della punta eccessivamente bassa può provocare sia uno sforzo eccessivo per la macchina, sia danni al trapano stesso (al mandrino, al motore e all’utensile), sia mettere a rischio la sicurezza dell’operatore.



Figura 36: foratura a 500 rpm. Foto scattata all'inizio dello slittamento

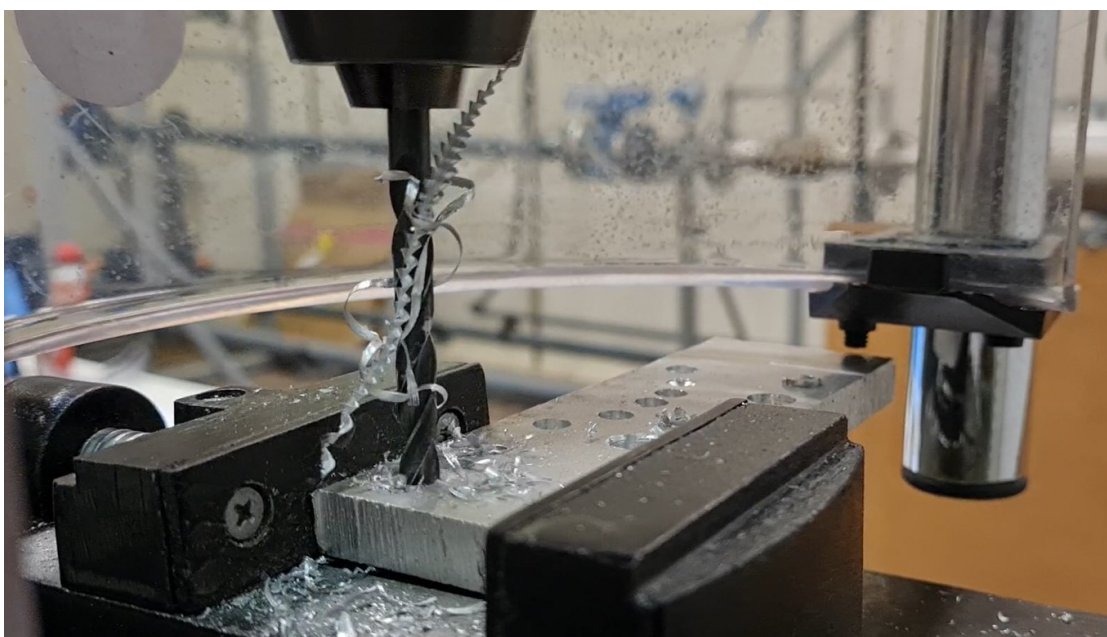


Figura 37: foto scattata alla fine dello slittamento



Figura 38: foratura a 500 rpm. Foto scattata al termine della prova

2.5 – Test 4: punta fuori asse (1000 rpm)

In questo quarto test la punta del mandrino è stata posizionata in modo scorretto per monitorare il comportamento di quest'ultima e della macchina al tocco dell'utensile col pezzo.

TEST 4 - PUNTA FUORI ASSE (1000 rpm)

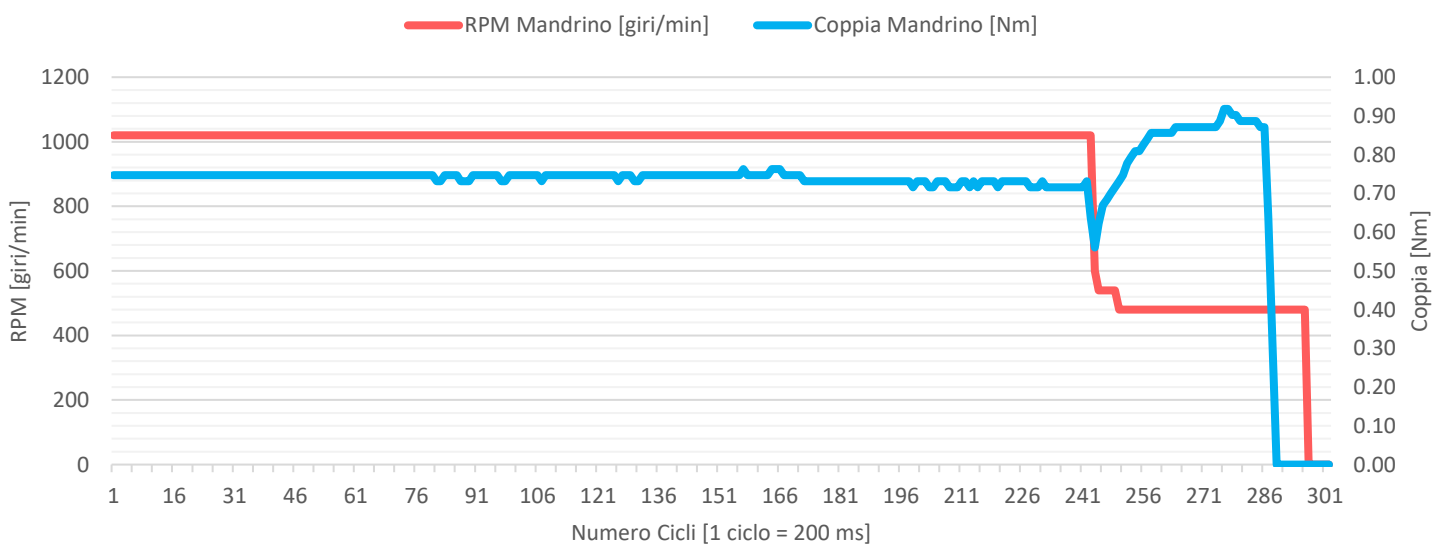


Grafico 4.1: rpm mandrino - coppia mandrino

TEST 4 - PUNTA FUORI ASSE (1000 rpm)

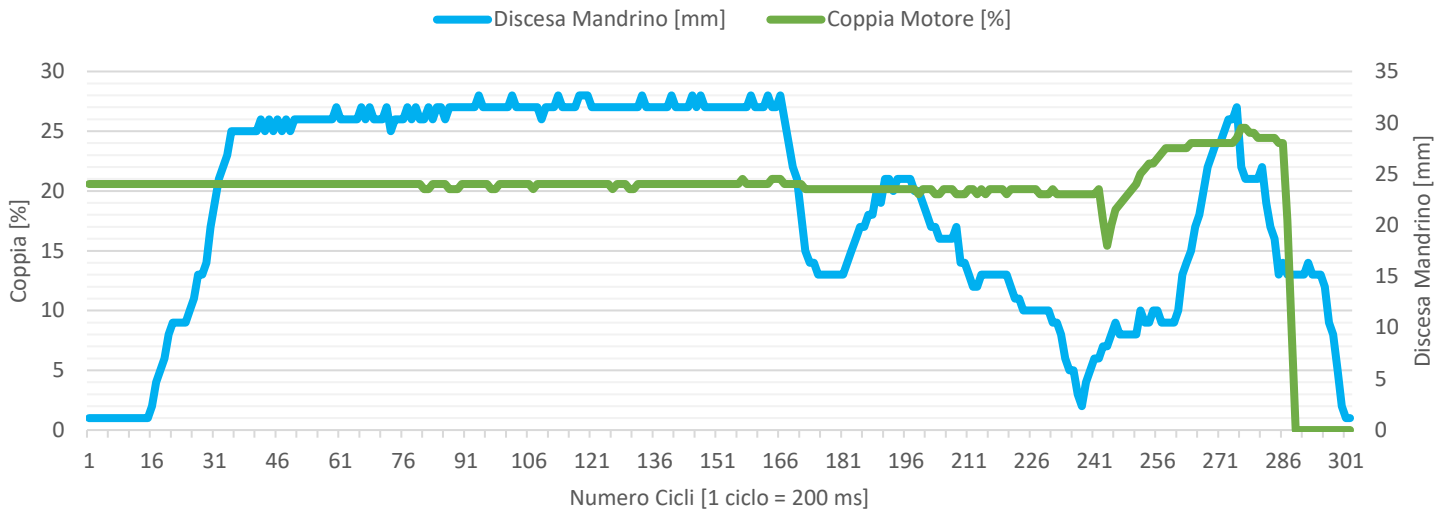


Grafico 4.2: discesa mandrino - coppia motore

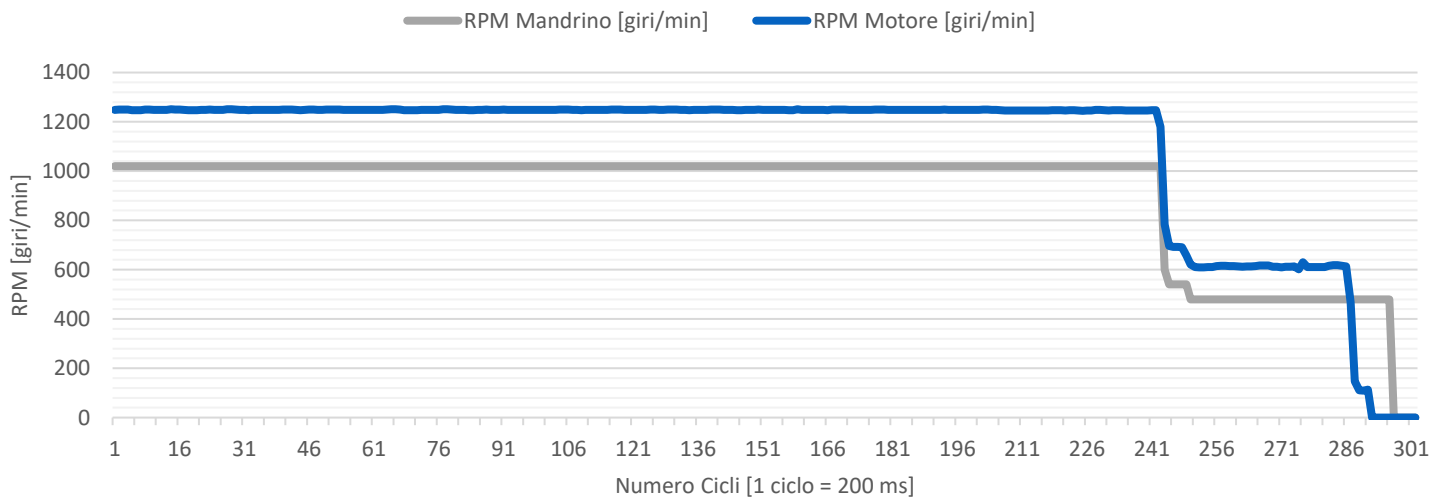


Grafico 4.3: rpm mandrino - rpm motore

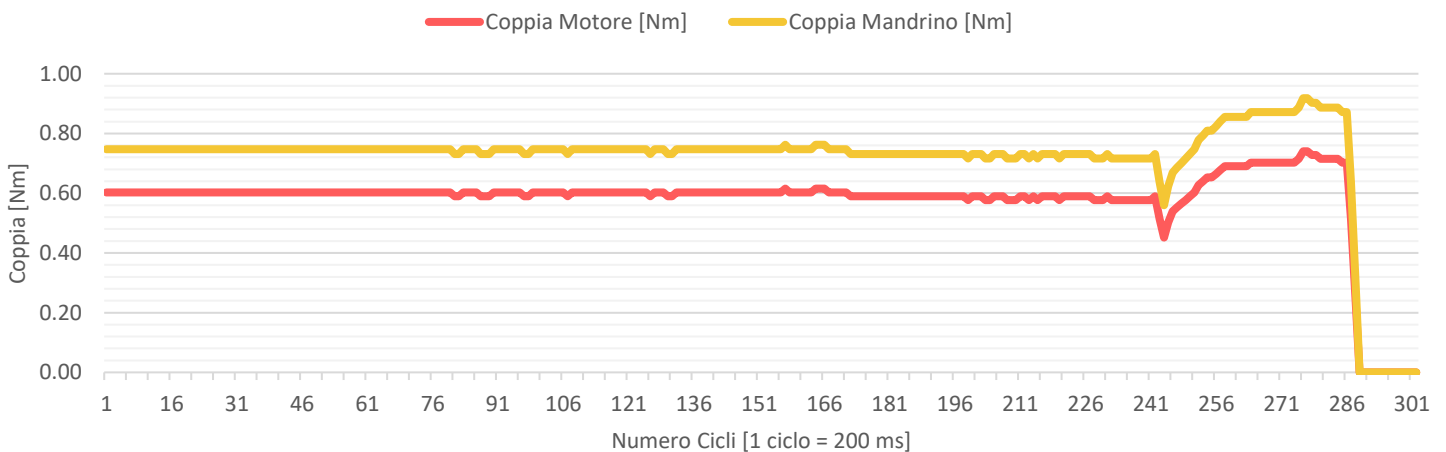


Grafico 4.4: coppia motore - coppia mandrino

Precisamente, la punta è stata inclinata di qualche grado rispetto all'asse verticale del mandrino (*Figura 39*). A causa delle eccessive vibrazioni dovute al saltellamento della punta al contatto col provino, non è stato possibile andare oltre i 1000 rpm.

Le elevate vibrazioni hanno in parte compromesso la lettura da parte dei sensori della velocità di rotazione e della coppia, e di conseguenza, le curve nei grafici presentano dei picchi anomali durante la discesa del mandrino, dovuti infatti al saltellamento della punta.

Pur disponendo della paratia di protezione davanti al mandrino, è stato ritenuto molto pericoloso completare la foratura del pezzo.

Seppur la durata del test sia maggiore, il massimo valore registrato di coppia motore è di 0,73 Nm ed è inferiore rispetto ai test precedenti in quanto non è stata completata la foratura.

In conclusione, una situazione di questo tipo in cui la punta viene ad essere fuori asse è sicuramente da evitare in quanto molto rischiosa per la sicurezza degli operatori, nonostante la presenza dei dispositivi di sicurezza indossati ed installati sulla macchina.

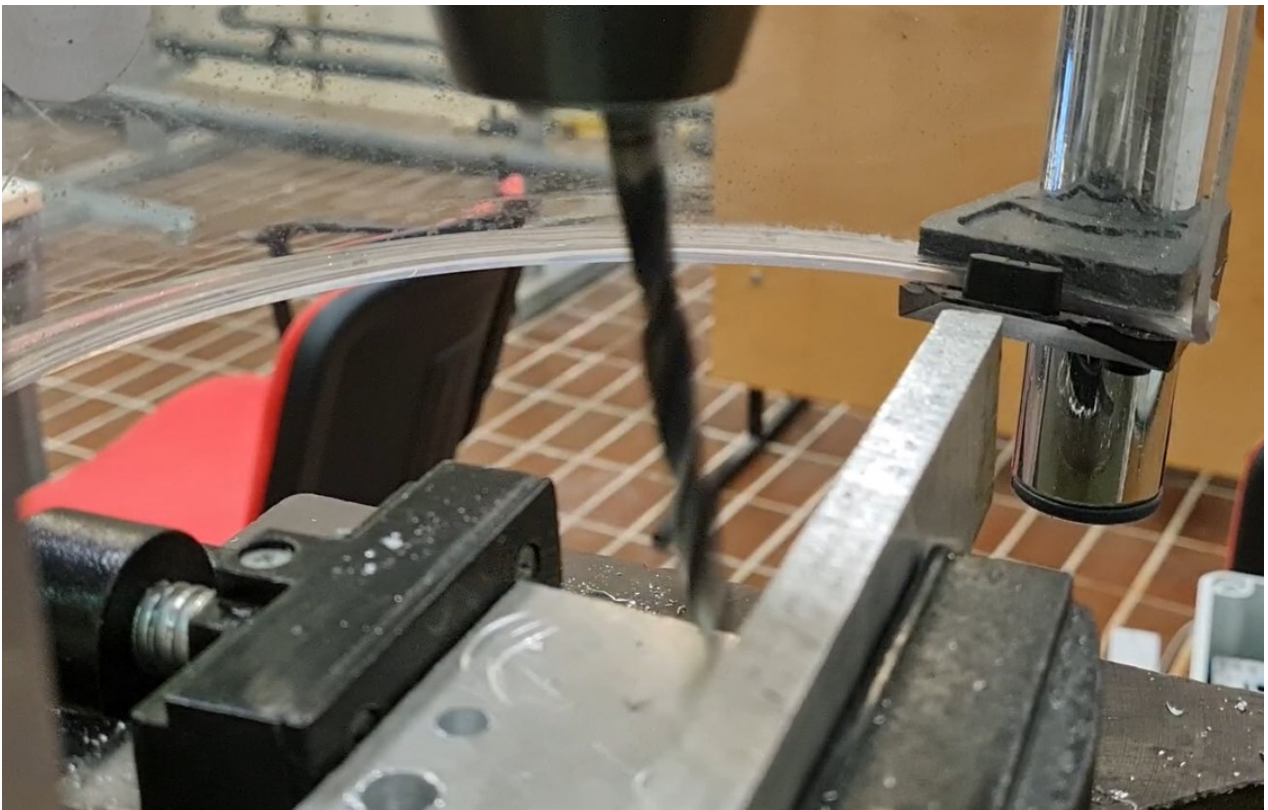


Figura 39: foratura con punta fuori asse

2.6 – Test 5: punta lenta (2000 rpm)

Nel quinto test la punta è stata posizionata nella sede del mandrino senza essere serrata adeguatamente. In questa prova, la velocità di rotazione della punta è di 2000 rpm.

A causa di leggeri slittamenti tra la punta e il mandrino, per mantenere costante la velocità di rotazione (come nel test di foratura a 500 rpm, *Paragrafo 2.4*), si possono osservare dei picchi di coppia motore in corrispondenza degli abbassamenti del mandrino (*Grafico 5.2*).

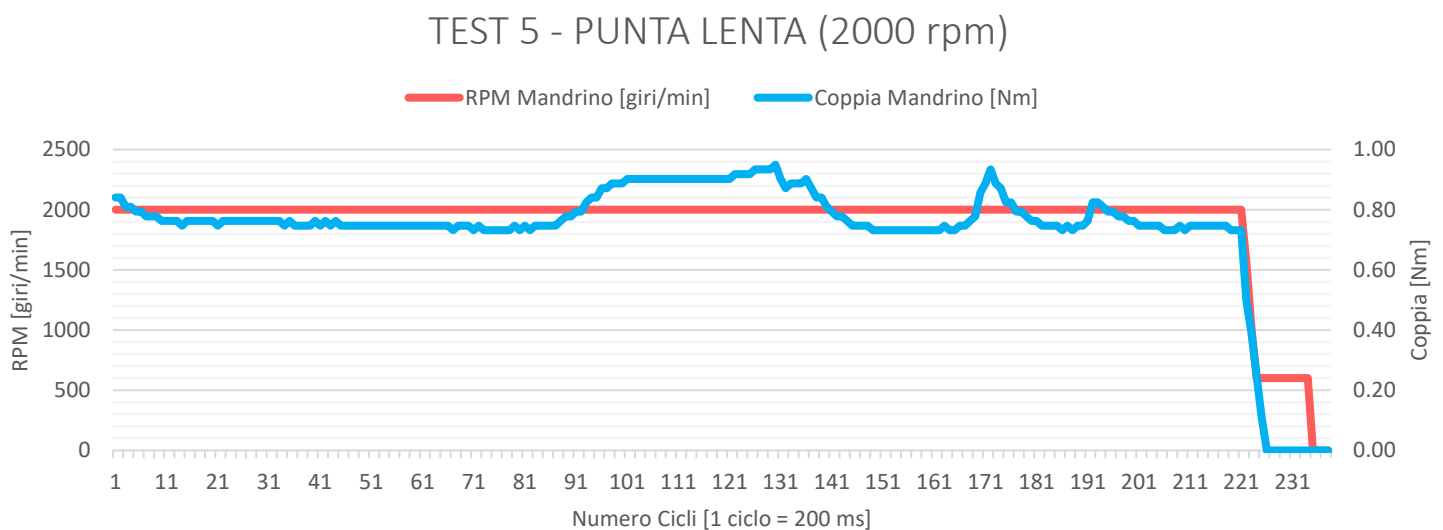


Grafico 5.1: rpm mandrino - coppia mandrino

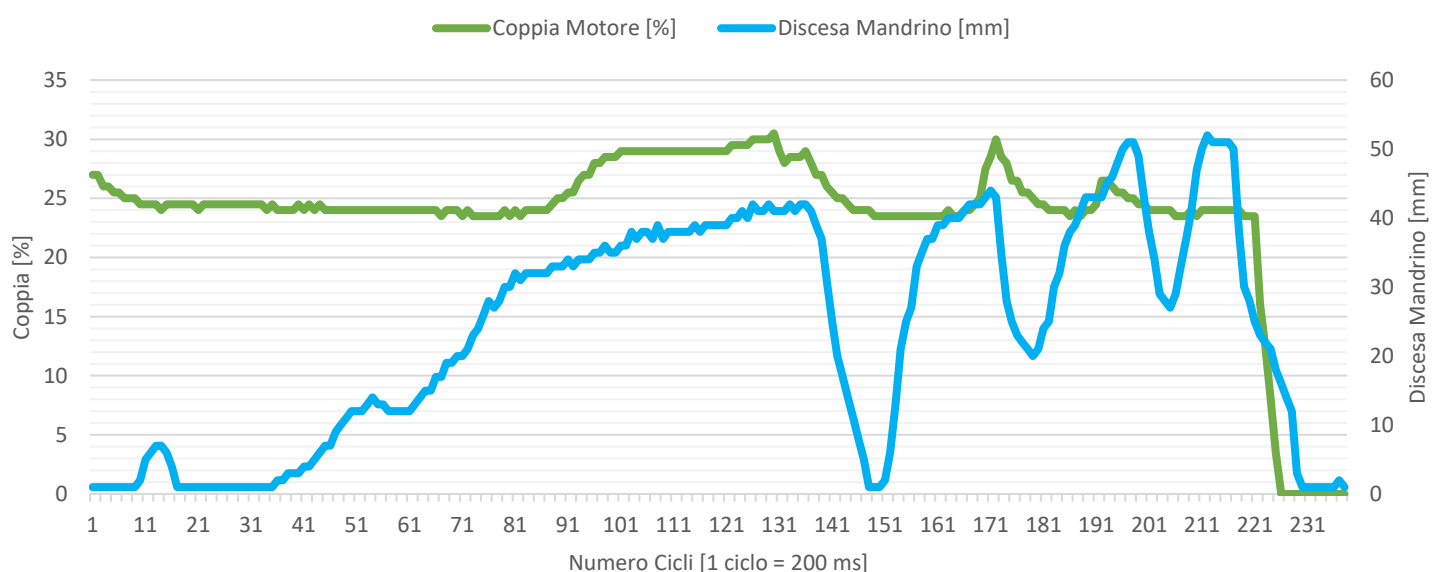


Grafico 5.2: coppia motore - discesa mandrino

TEST 5 - PUNTA LENTA (2000 rpm)

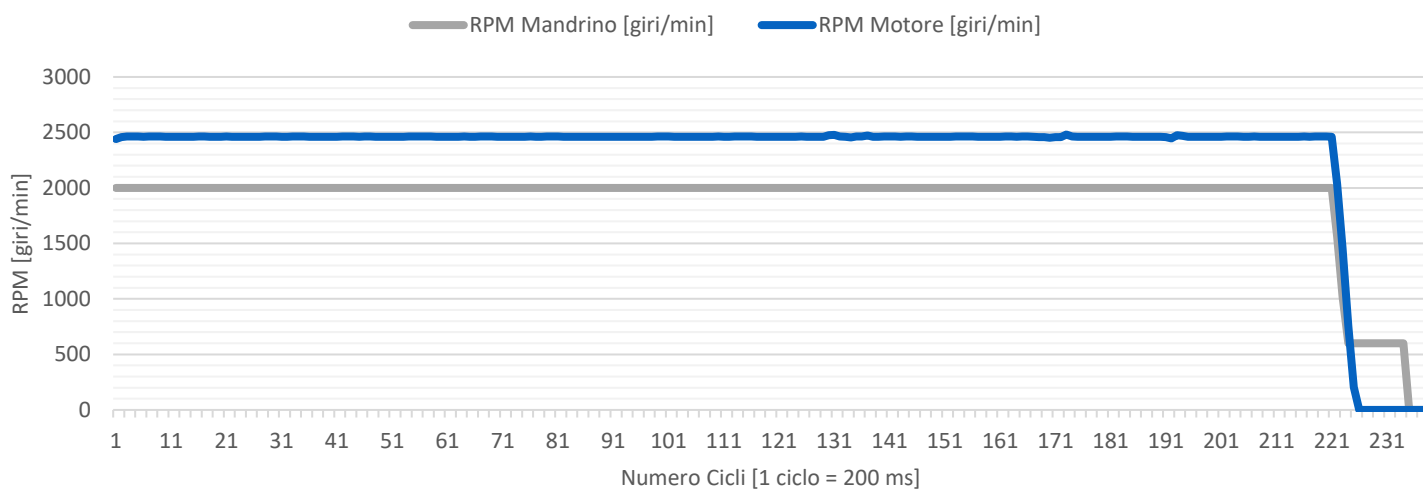


Grafico 5.3: rpm mandrino – rpm motore

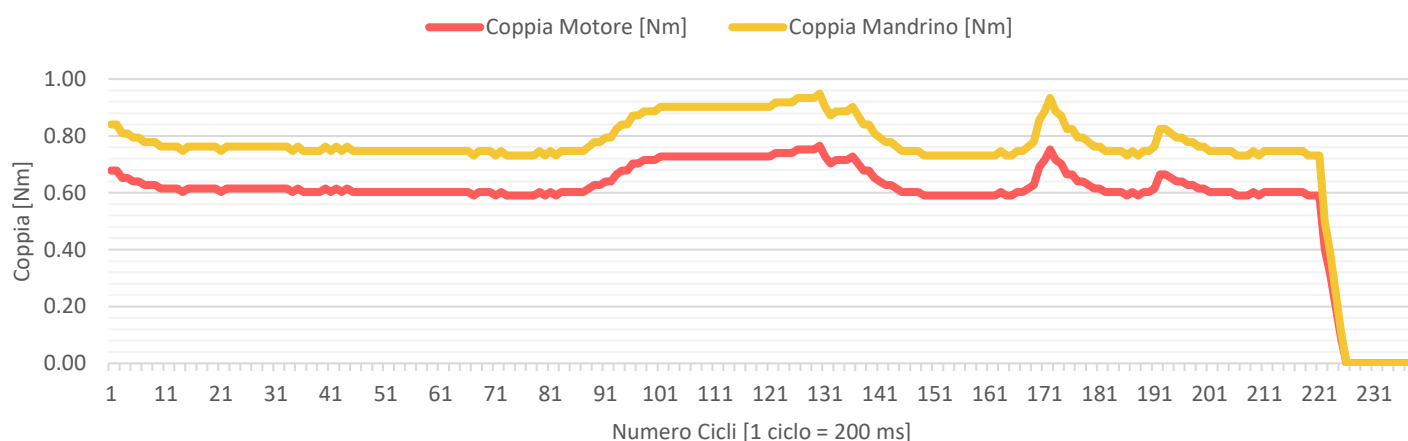


Grafico 5.4: coppia motore - coppia mandrino

Durante la fase di foratura, poco dopo che la punta è entrata in contatto con la superficie del provino, la resistenza al moto dovuta all'attrito tra utensile e pezzo ha portato ad una leggera auto-serratura della punta stessa, anche se non in maniera sufficiente da poter completare la foratura (*Figura 40*). In ogni caso la massima coppia motore registrata non è andata oltre 0,75 Nm (*Grafico 5.4*) per via degli slittamenti tra la punta e il mandrino.

In conclusione, una situazione di questo tipo non consente alla macchina di lavorare in piena efficienza, tuttavia non si sono verificati comportamenti pericolosi tali da mettere a rischio la sicurezza dell'operatore.



Figura 40: foratura con punta lenta. Foto scattata nel momento dello slittamento della punta sul mandrino

2.7 – Test 6: pezzo inclinato (2000 rpm)

In questo test il pezzo d'alluminio è stato posizionato con un'inclinazione di circa 21° rispetto al piano orizzontale della morsa (*Figura 42*).

TEST 6 - PEZZO INCLINATO (2000 rpm)

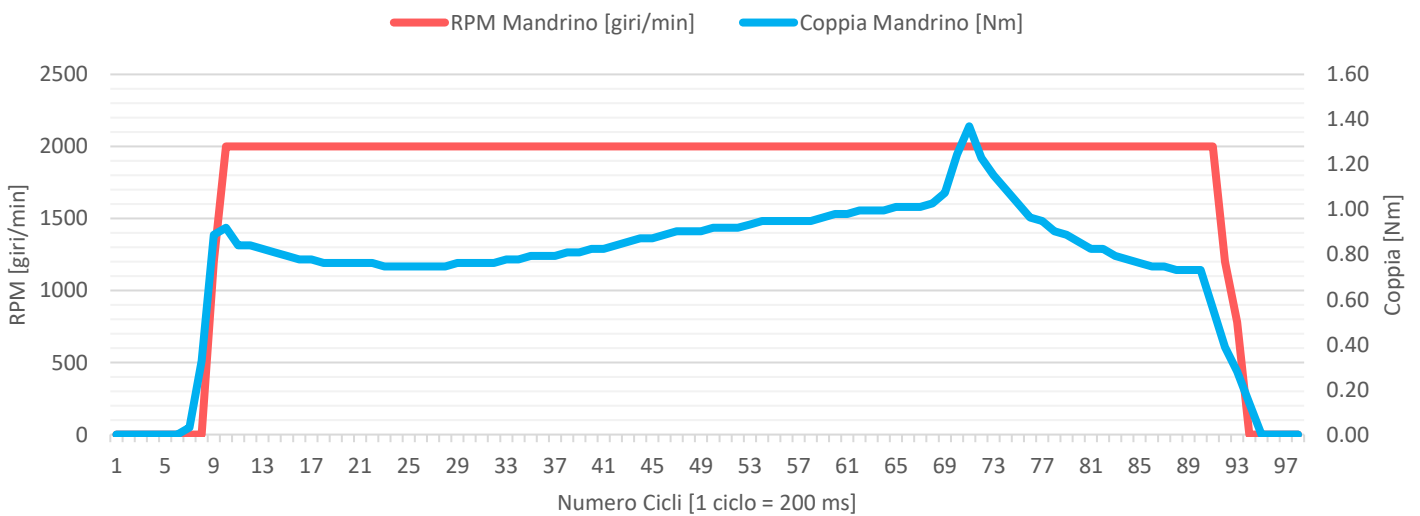


Grafico 6.1: rpm mandrino - coppia mandrino

TEST 6 - PEZZO INCLINATO (2000 rpm)

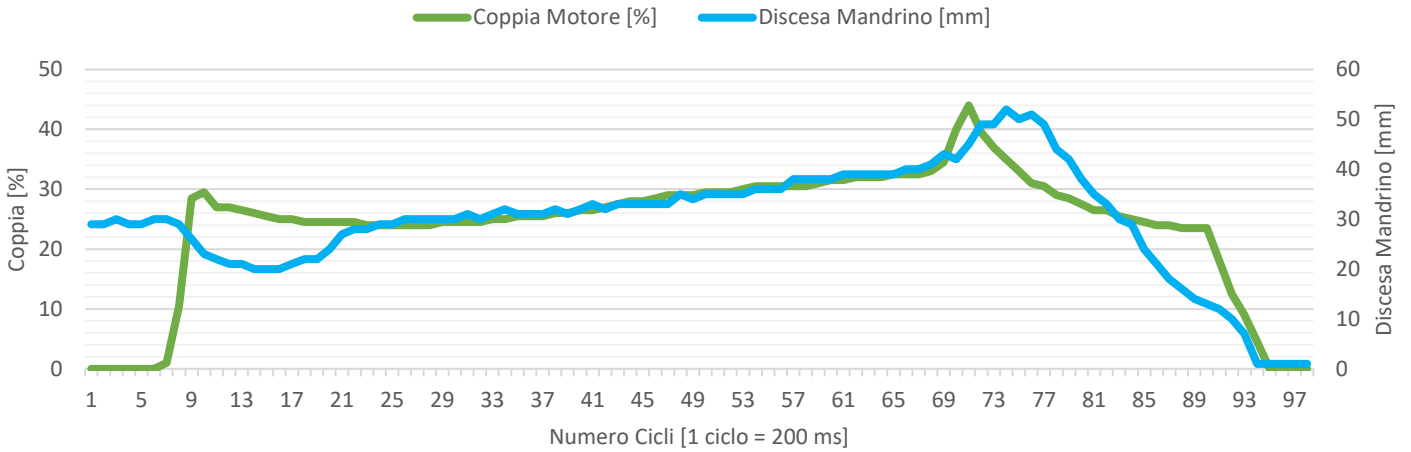


Grafico 6.2: coppia motore - discesa mandrino

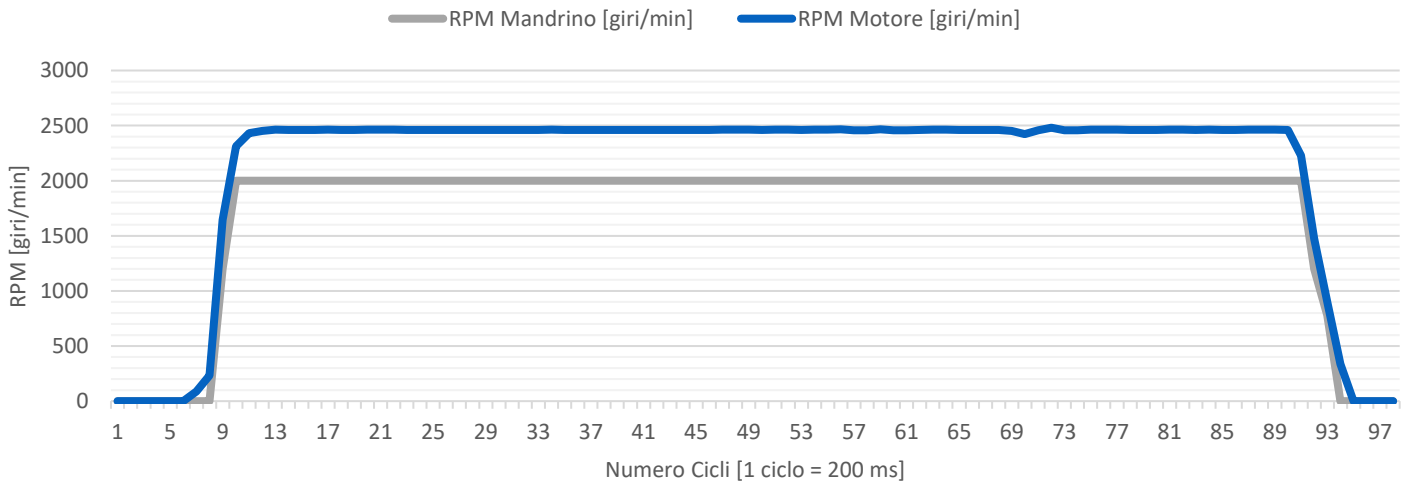


Grafico 6.3: rpm mandrino - rpm motore

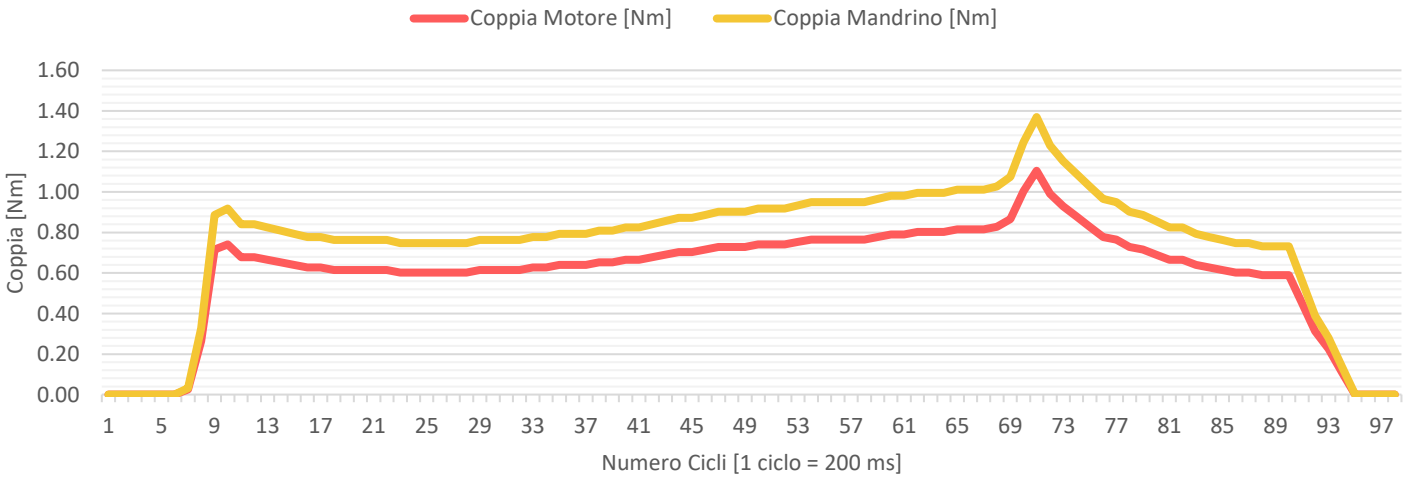


Grafico 6.4: coppia motore - coppia mandrino

La prova è stata svolta a 2000 rpm. Inizialmente, la discesa del mandrino è avvenuta senza ostacoli (*Grafico 6.2*), con un andamento della curva di coppia del motore pressoché proporzionale alla discesa del mandrino.

Nella parte finale del test si è verificato uno slittamento tra punta e mandrino, registrando un repentino incremento di coppia motore pari a 1,10 Nm (*Grafico 6.4*): come per il test a 500 rpm (*Paragrafo 2.4*), per mantenere costante la velocità di rotazione la coppia deve necessariamente aumentare; anche in questo caso il mandrino ha continuato a ruotare con la punta rimasta bloccata nel pezzo di alluminio causando lo slittamento.

In conclusione, forare un pezzo inclinandolo rispetto all'asse orizzontale della morsa non è consigliato in quanto, a causa delle vibrazioni, potrebbe sfuggire al bloccaggio della morsa ed essere proiettato verso l'operatore. Inoltre, in questa situazione la punta tende a lavorare in modo poco efficiente, generando possibili slittamenti col mandrino. Tuttavia, per eseguire fori in diagonale su un pezzo, è possibile inclinare il piano di lavoro su cui poggia la morsa tramite l'apposita manovella posta dietro la colonna del trapano.

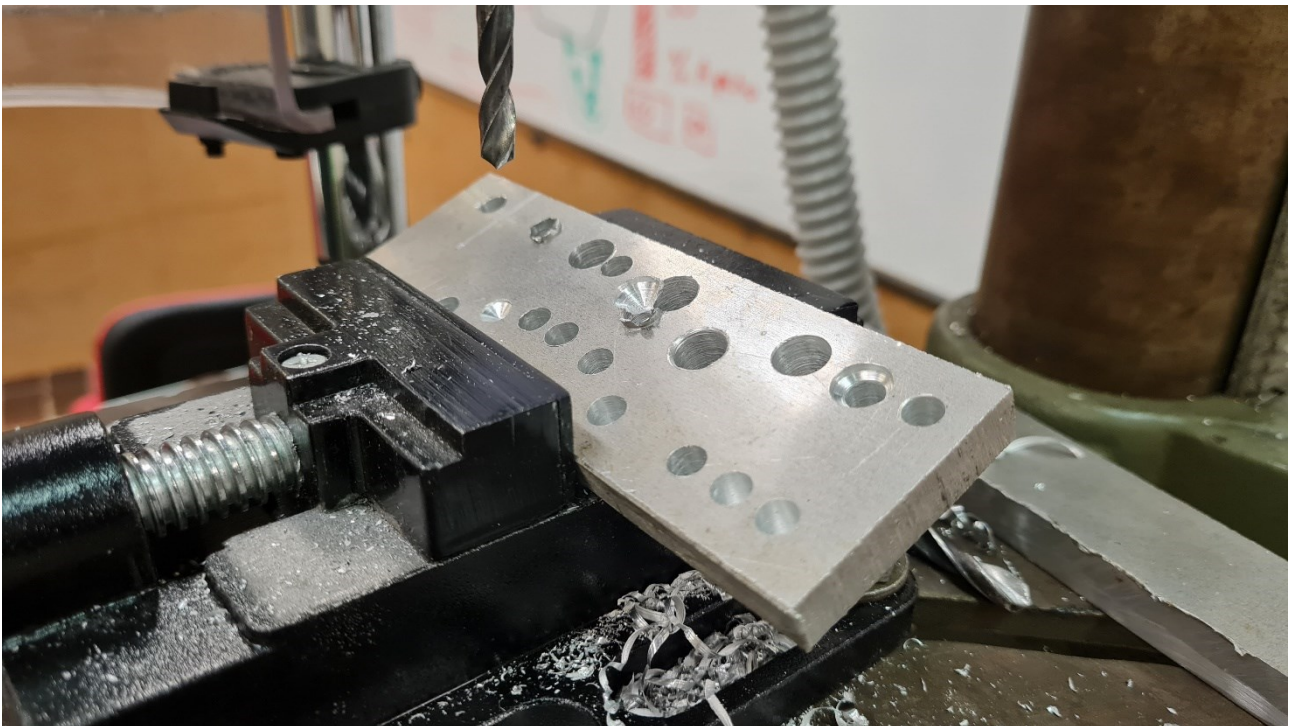


Figura 41: foratura con pezzo inclinato

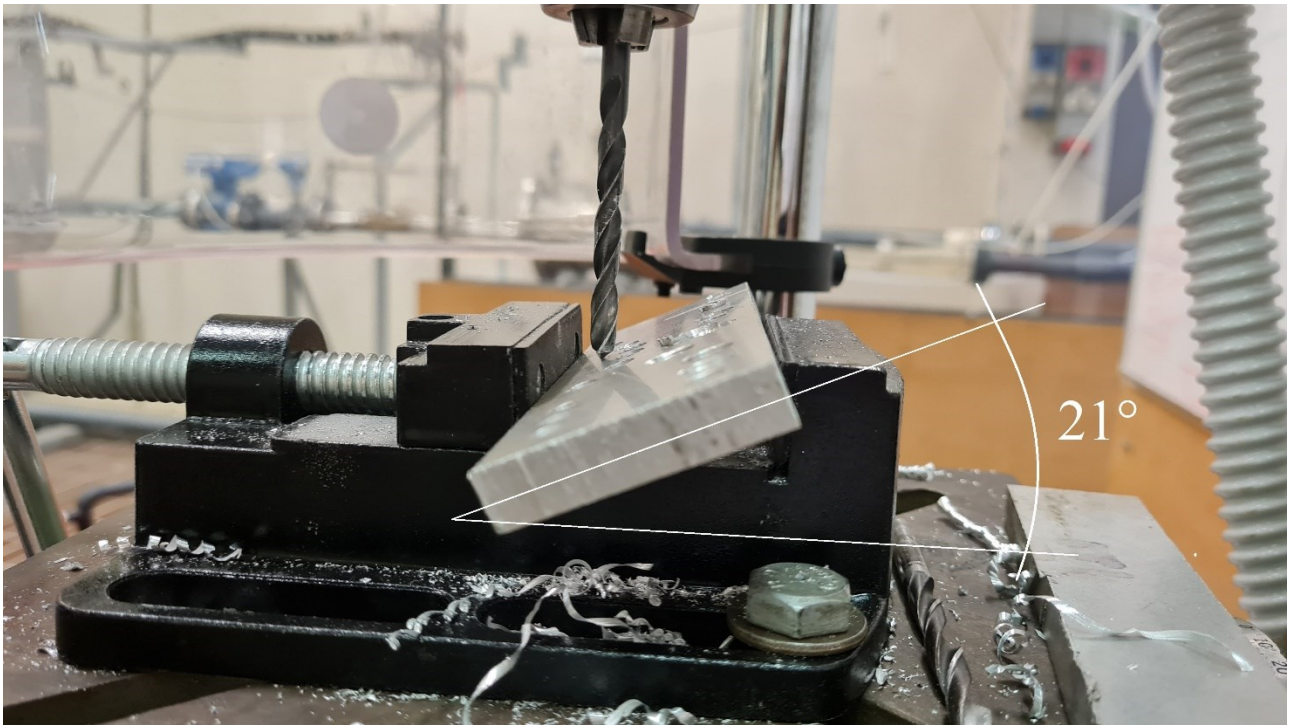


Figura 42: pezzo inclinato di 21 gradi

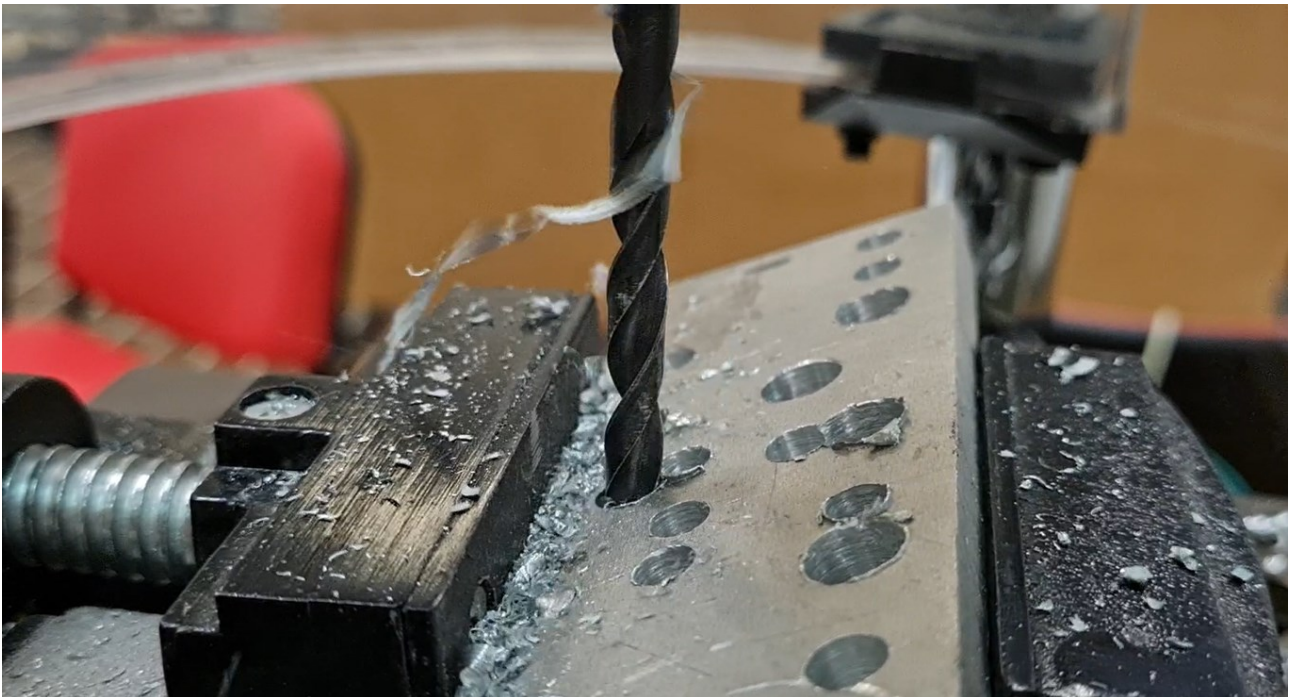


Figura 43: foratura con pezzo inclinato. Foto scattata nel momento dello slittamento

2.8 – Test 7: pezzo non bloccato (2000 rpm)

Nel settimo ed ultimo test è stata simulata la situazione in cui il pezzo d'alluminio non è correttamente bloccato sulla morsa porta pezzo posta sopra la tavola di lavoro.

La prova è stata svolta seguendo i parametri di foratura consigliati (2000 rpm).

Inizialmente il pezzo, schiacciato dalla pressione indotta dalla punta, dovuta all'abbassamento del mandrino, è rimasto saldato alla morsa, potendo così procedere con la lavorazione. Si nota infatti che all'inizio della prova la coppia è proporzionale alla discesa del mandrino (*Grafico 7.2*).

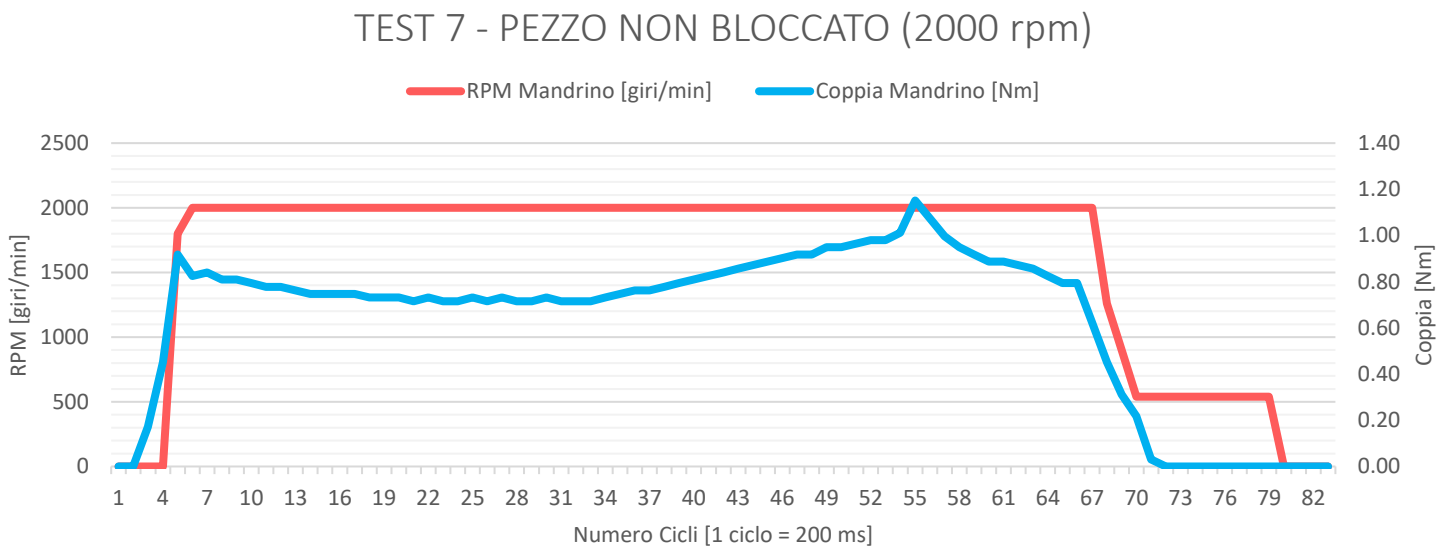


Grafico 7.1: rpm mandrino - coppia mandrino

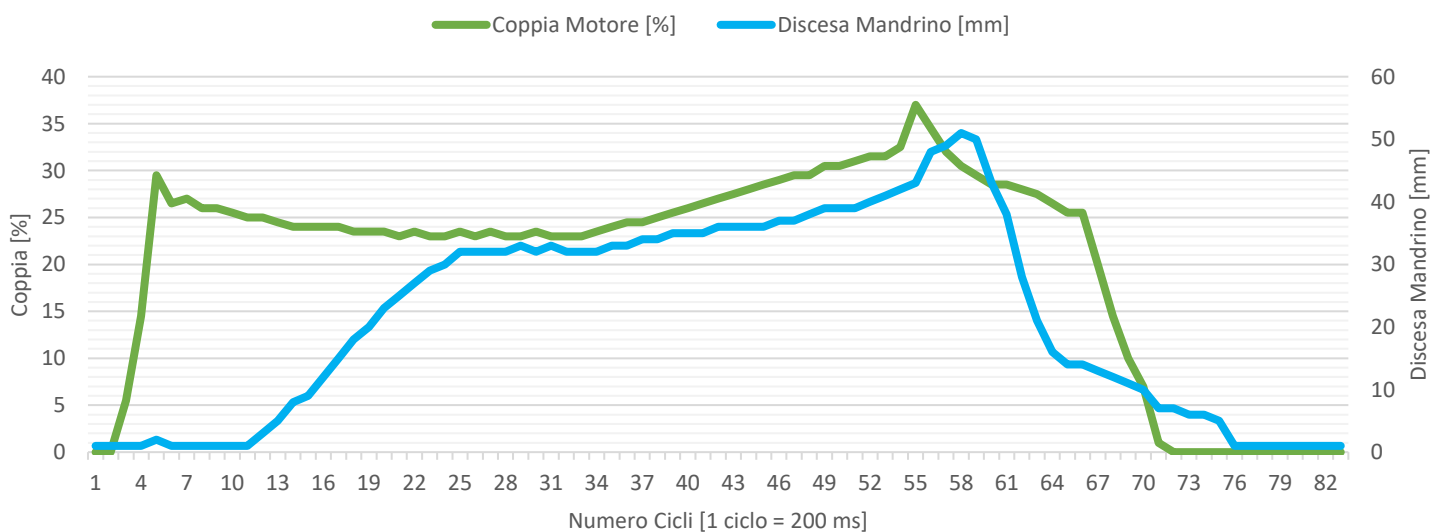


Grafico 7.2: coppia motore - discesa mandrino

TEST 7 - PEZZO NON BLOCCATO (2000 rpm)

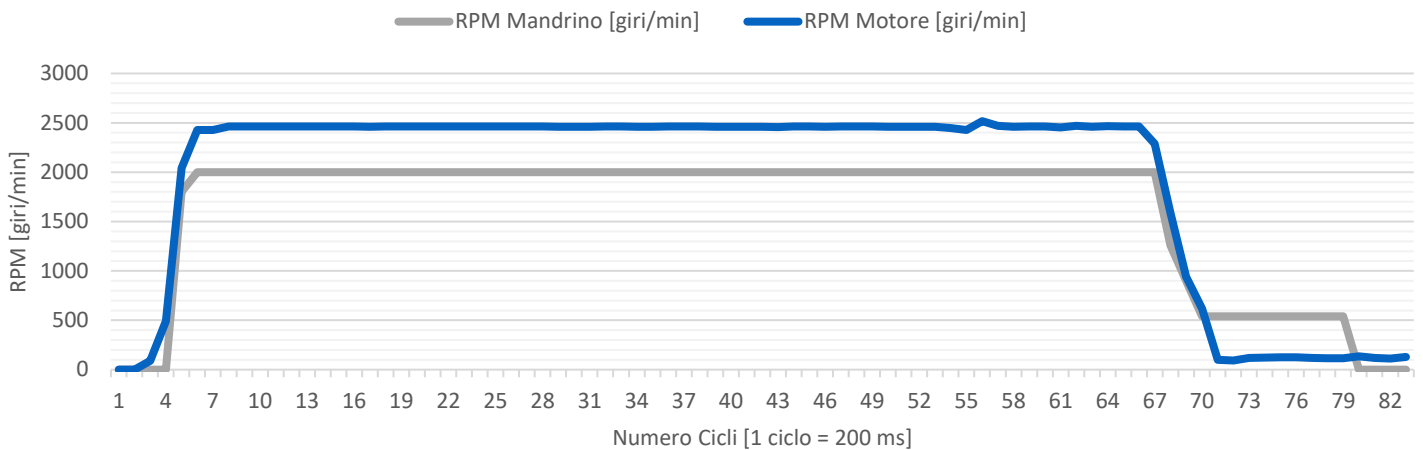


Grafico 7.3: rpm mandrino - rpm motore

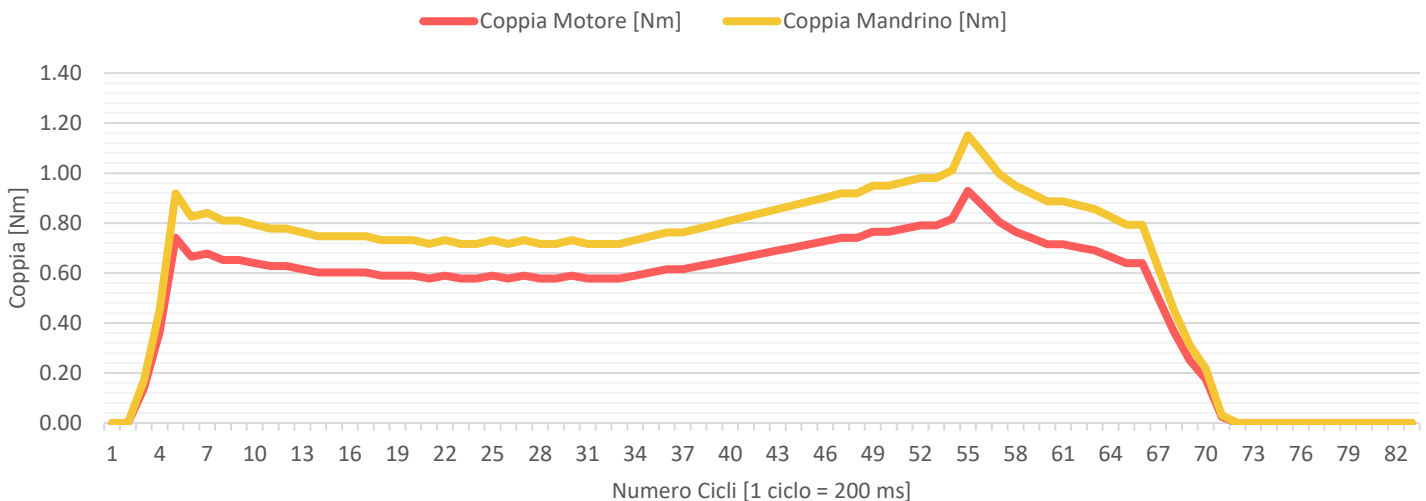


Grafico 7.4: coppia motore - coppia mandrino

Continuando l'operazione di foratura, e quindi abbassando il mandrino, il provino ha iniziato a vibrare. Nel momento in cui l'utensile ha attraversato il pezzo, questo si è sollevato dalla morsa ed ha iniziato poi a ruotare con la punta alla stessa velocità (2000 rpm) (Figura 45, 46 e 47). Tempestivamente, il trapano è stato arrestato tramite l'interruttore di spegnimento e grazie alla paratia di sicurezza posta davanti al mandrino sono stati evitati possibili rischi di proiezione del pezzo.

Dal *Grafico 7.4* si nota un picco di coppia motore (0,93 Nm), dovuto al maggior sforzo della macchina per eseguire la foratura dato che il pezzo non era correttamente ancorato, e una conseguente riduzione dovuta al sollevamento del pezzo.

In conclusione, la condizione di lavoro con pezzo non bloccato è una situazione molto pericolosa e da evitare in quanto potrebbe provocare danni sia alla macchina che all'operatore, soprattutto a velocità di rotazione più elevate.

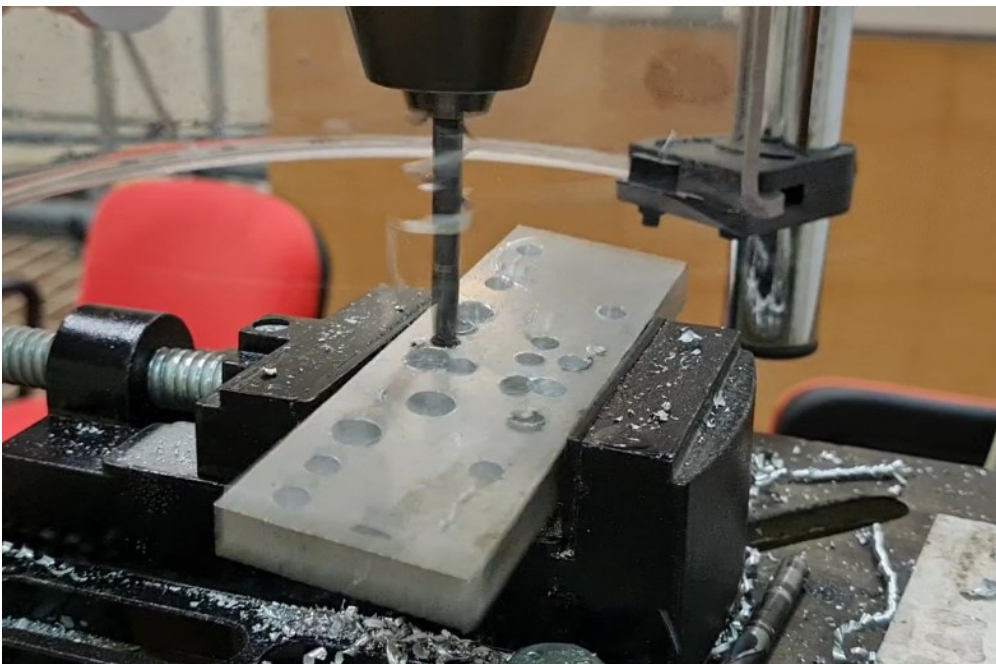


Figura 44: foratura con pezzo non bloccato. Foto scattata nel momento dell'inizio delle vibrazioni

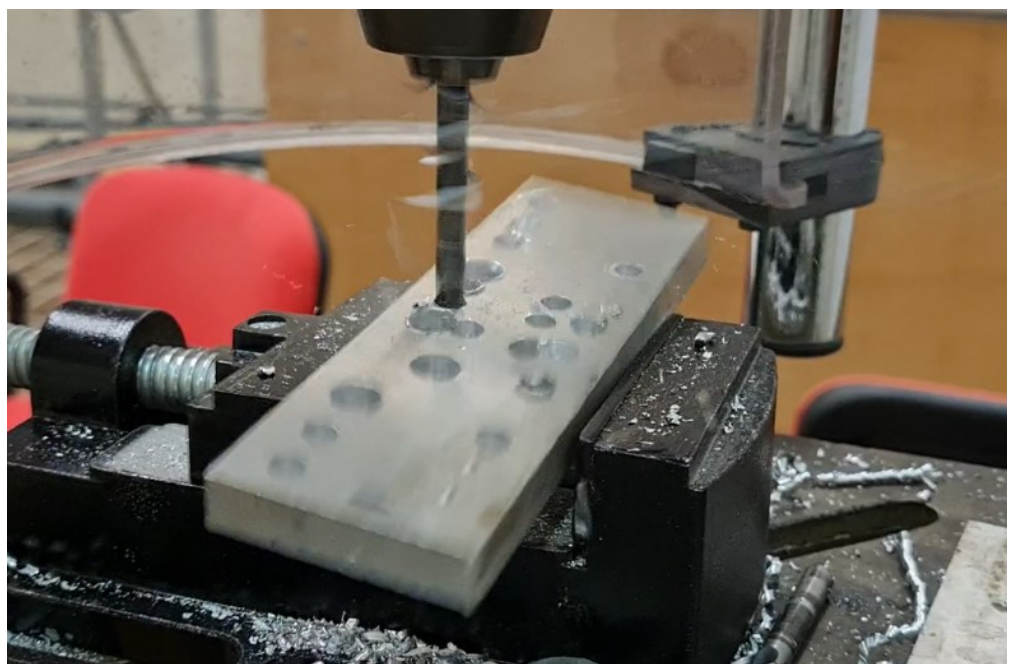


Figura 45: foto scattata nel momento in cui il pezzo si inizia a sollevare



Figura 46: foto scattata nel momento in cui il pezzo inizia a ruotare con la punta

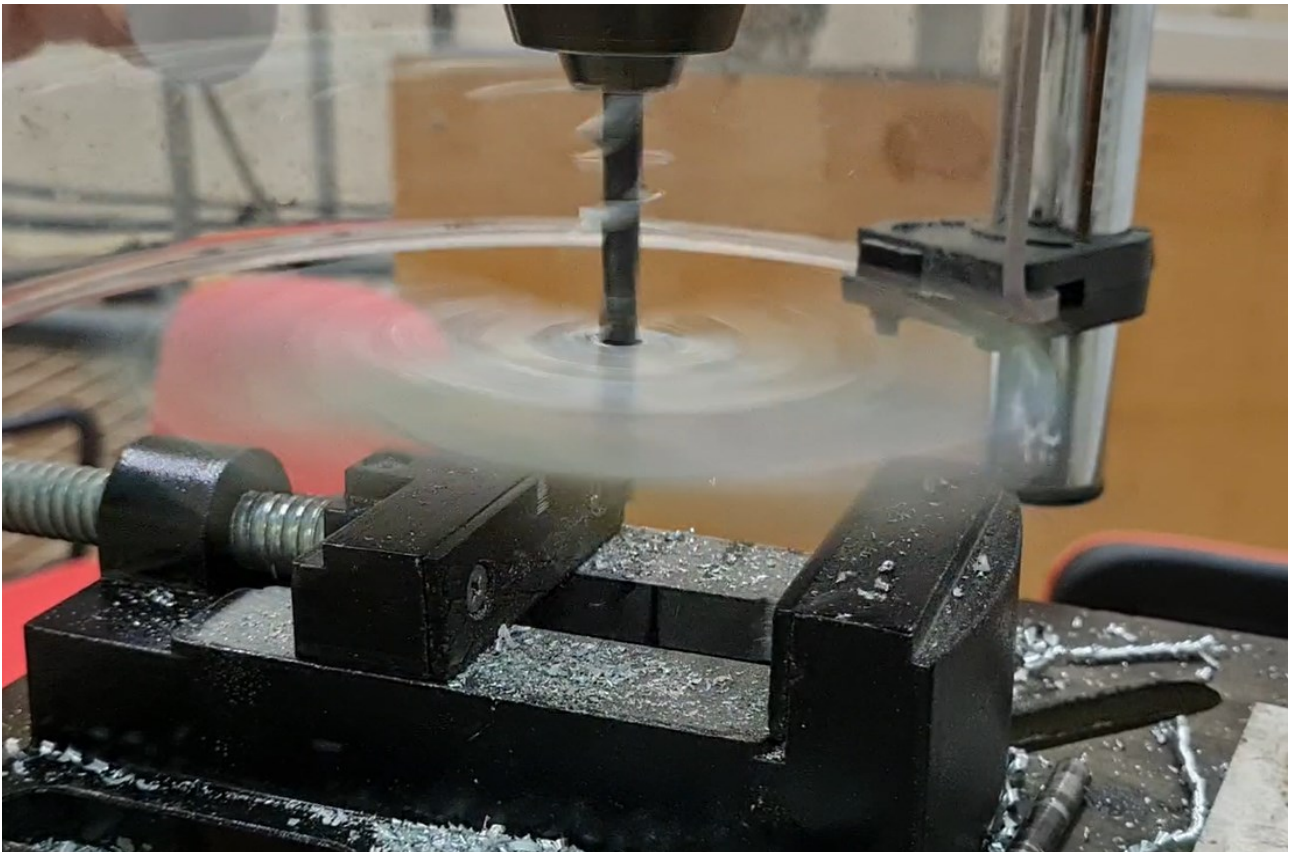


Figura 47: pezzo che ruota con la punta

Capitolo 3

Confronto prove e conclusioni

3.1 – Confronto generale

In quest'ultima parte si confronteranno le varie prove sostenute con la macchina, focalizzandoci sulla comparazione delle coppie motore.

Per facilitare la comprensione dei grafici di confronto, dato che alcuni test hanno una durata maggiore rispetto ad altri, sono stati presi in esame gli ultimi istanti di ogni prova, fino allo spegnimento della macchina; in questo modo tutte le prove possono essere confrontate nello stesso periodo di monitoraggio, senza perdere dati preziosi in quanto gli eventi di maggior importanza si sono sempre verificati nelle ultime battute dei vari test.

Si andrà quindi a paragonare la coppia motore della prova in “normali condizioni di sicurezza” (*Paragrafo 2.2*) con le coppie motore di tutte le altre prove, sviluppando le proprie conclusioni in merito ai test effettuati.

Dal *Grafico 8.1* si possono comparare le varie coppie nello stesso periodo di acquisizione dati. Come visto nel capitolo 2, si ha il valore di coppia motore più elevato (1,54 Nm) nella prova effettuata a “basso numero di giri (500 rpm)”, indice che la macchina, lavorando ad una velocità di rotazione della punta troppo bassa, fatica di più per completare la lavorazione di foratura. Seguono poi i valori di coppia della prova con “pezzo inclinato” (1,10 Nm), a “basso numero di giri (1000 rpm)” e con “pezzo non bloccato” (entrambi a 0,93 Nm).

I test con “punta lenta” (picco di coppia pari a 0,75 Nm) e con “punta fuori asse” (coppia massima pari a 0,74 Nm) hanno valori di coppia che si aggirano intorno a quelli della prova in “normali condizioni di sicurezza”, ma entrambe, comunque, sono condizioni da evitare per non sovraccaricare la macchina, per non arrecare danni agli utensili e per non mettere a rischio la sicurezza dell'operatore.

CONFRONTO TEST - COPPIE MOTORE

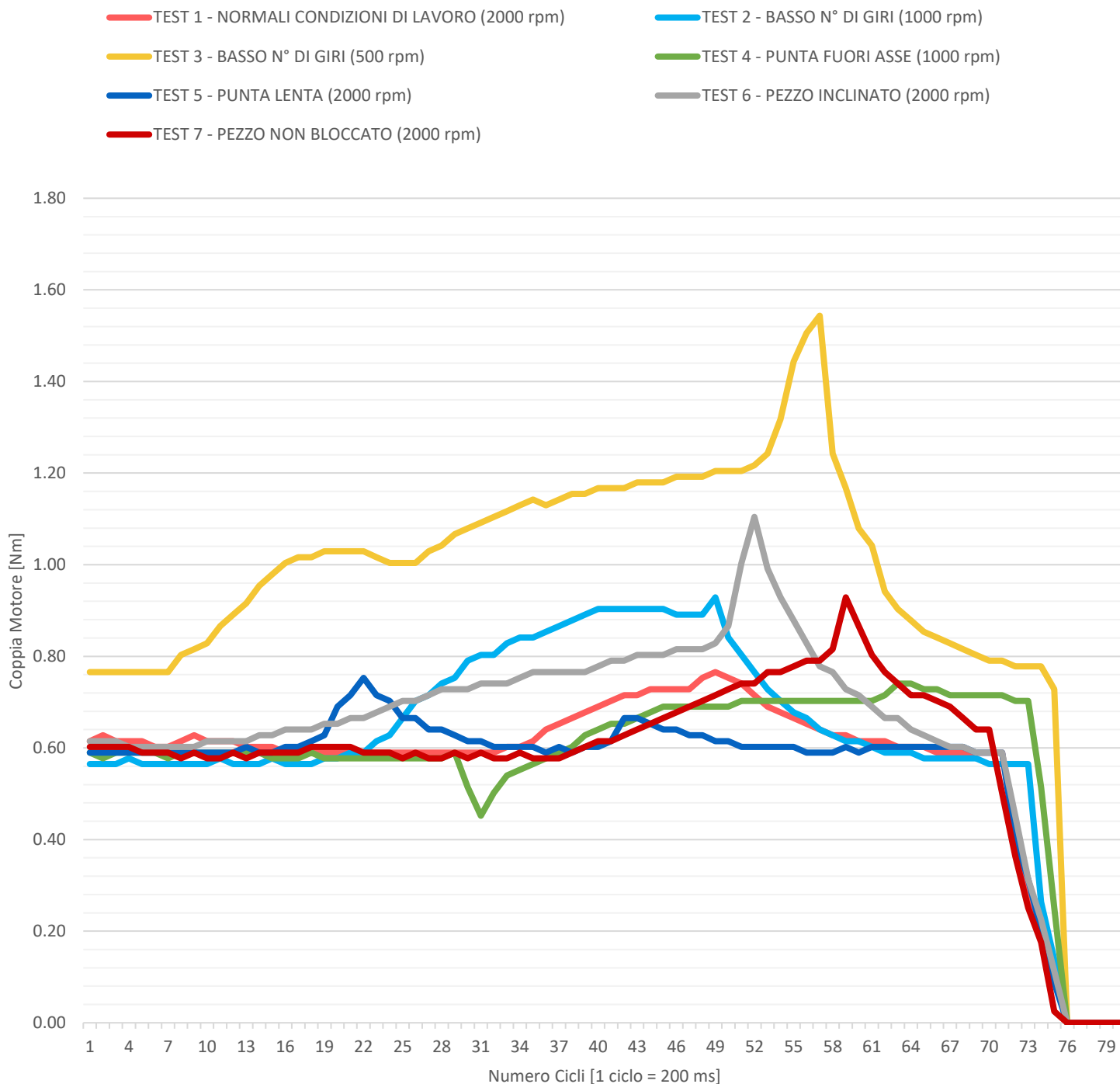


Grafico 8.1: comparazione coppie motore

3.2 – Confronto coppie motore

Si confronteranno i valori di coppia motore della prova svolta in normali condizioni di lavoro e sicurezza (2000 rpm) con i valori di coppia motore di tutte le altre prove svolte in condizioni di lavoro anomale e di non sicurezza.

3.2.1 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 2 (basso numero di giri - 1000 rpm)

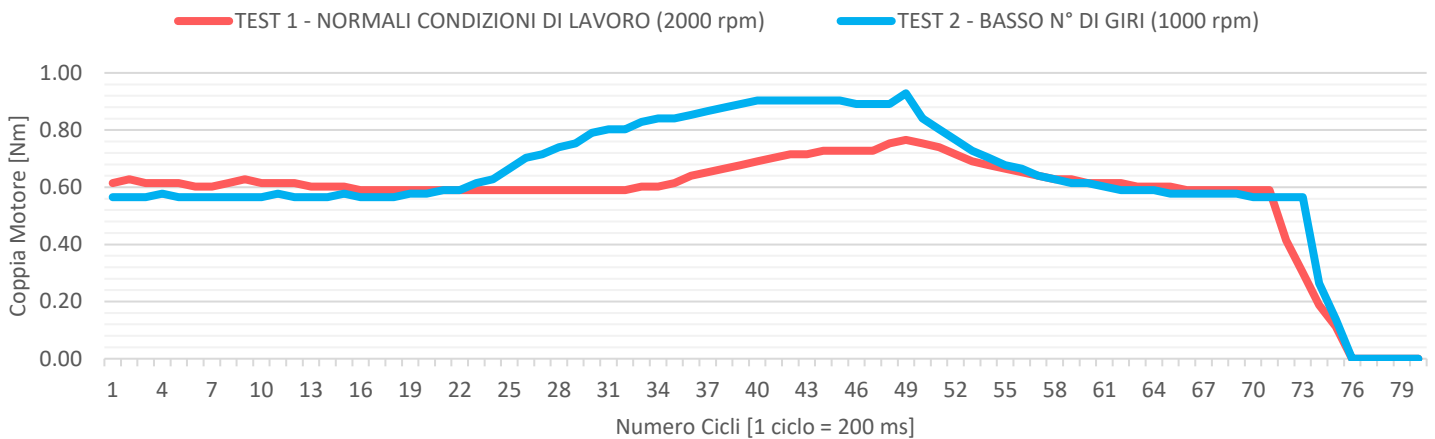


Grafico 8.2: confronto coppie test 1 - test 2

Nel *Grafico 8.2*, la coppia motore del test 2 “a basso numero di giri (1000 rpm)” non si discosta molto dalla coppia monitorata nel test 1 “in normali condizioni di lavoro”, tuttavia si evidenzia un leggero aumento (da 0,77 Nm nel primo test a 0,93 Nm nel secondo test) dovuto alla minor velocità rispetto a quella consigliata (2000 rpm).

3.2.2 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 3 (basso numero di giri - 500 rpm)

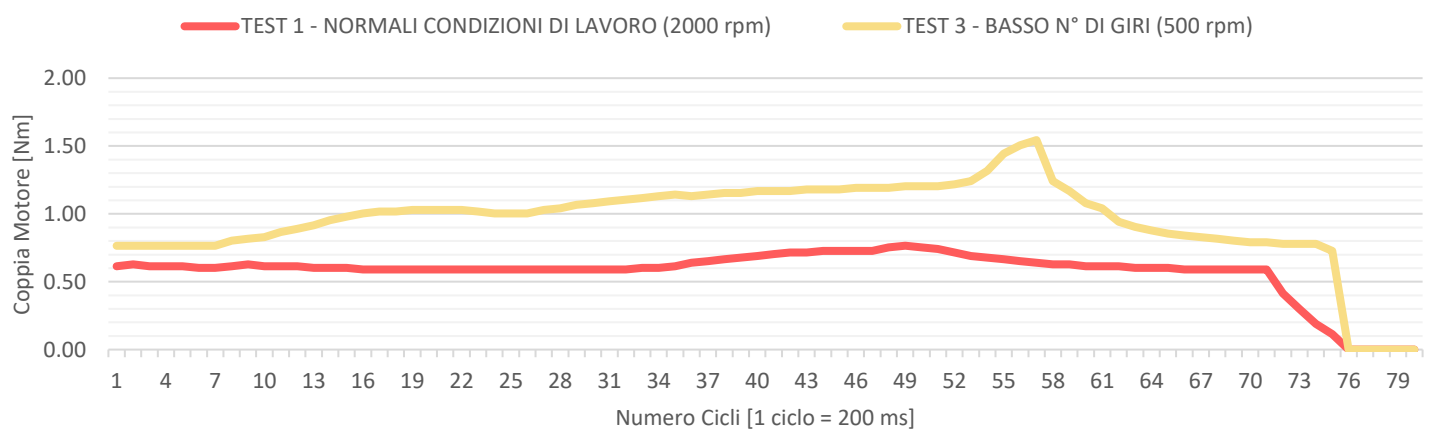


Grafico 8.3: confronto coppie test 1 - test 3

Dal *Grafico 8.3*, la coppia motore del test 3 “a basso numero di giri (500 rpm)” risulta essere quasi il doppio della coppia misurata nel test 1 “in normali condizioni di lavoro”; questo avviene per via del maggior sforzo della macchina per praticare la foratura ad una velocità eccessivamente bassa. Si registra infatti aumento significativo della coppia rispetto al test in sicurezza svolto a 2000 rpm (da 0,77 Nm nel primo test a 1,54 Nm nel terzo test).

3.2.3 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 4 (punta fuori asse)

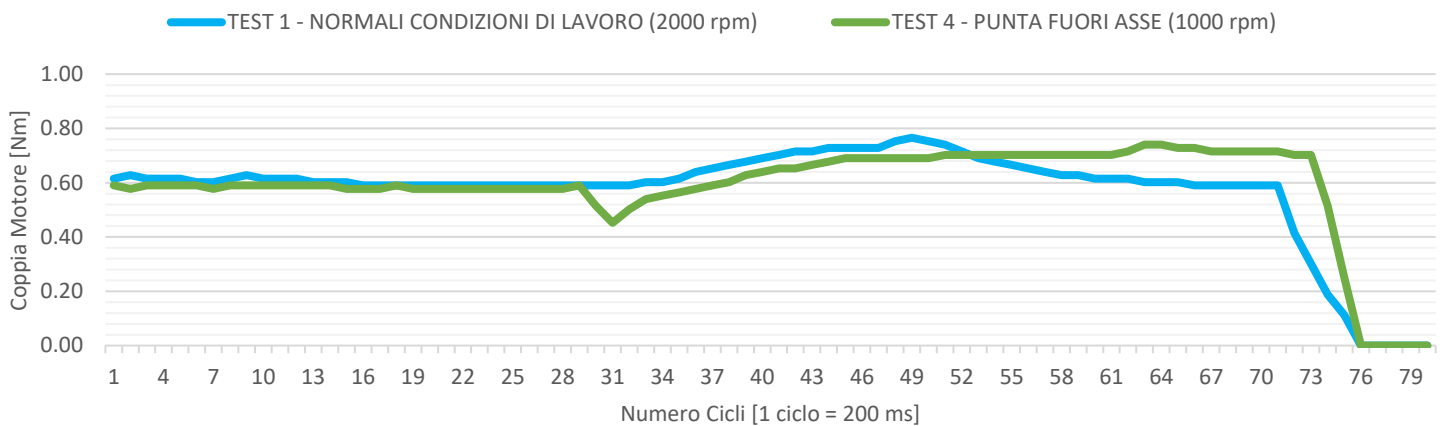


Grafico 8.4: confronto coppie test 1 – test 4

Nel *Grafico 8.4*, si evince che la coppia motore del test 4 “con punta fuori asse” risulta allinearsi alla coppia del test 1 “in normali condizioni di lavoro”.

Tuttavia, come precedentemente detto nel *Paragrafo 2.5*, le elevate vibrazioni dovute al saltellamento della punta sul pezzo hanno in parte compromesso la lettura dei dati; inoltre non è stata completata la lavorazione poiché è stato ritenuto molto pericoloso continuare. Quindi, seppur i valori ottenuti sono da considerarsi poco validi, è stato comunque centrato l’obiettivo di valutare la situazione come pericolosa o meno.

3.2.4 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 5 (punta lenta)

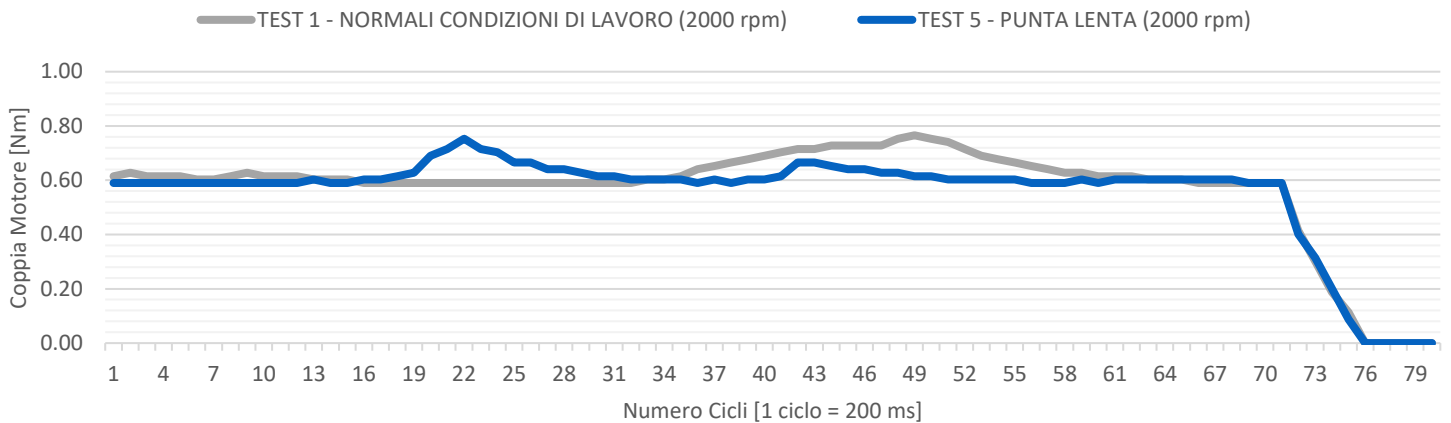


Grafico 8.5: confronto coppie test 1 - test 5

Anche in questo caso, la coppia motore del test 5 “con punta lenta” risulta allinearsi alla coppia del test 1 “in normali condizioni di lavoro”. Tuttavia, come esplicitato nel *Paragrafo 2.6*, l’errato serraggio della punta sulla sede del mandrino non ha permesso di concludere la foratura in quanto si sono generati slittamenti punta - mandrino. Anche il valore massimo di coppia motore (0,75 Nm per la prova con punta lenta) si aggira intorno a quello della prova in sicurezza (0,77 Nm).

3.2.5 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 6 (pezzo inclinato)

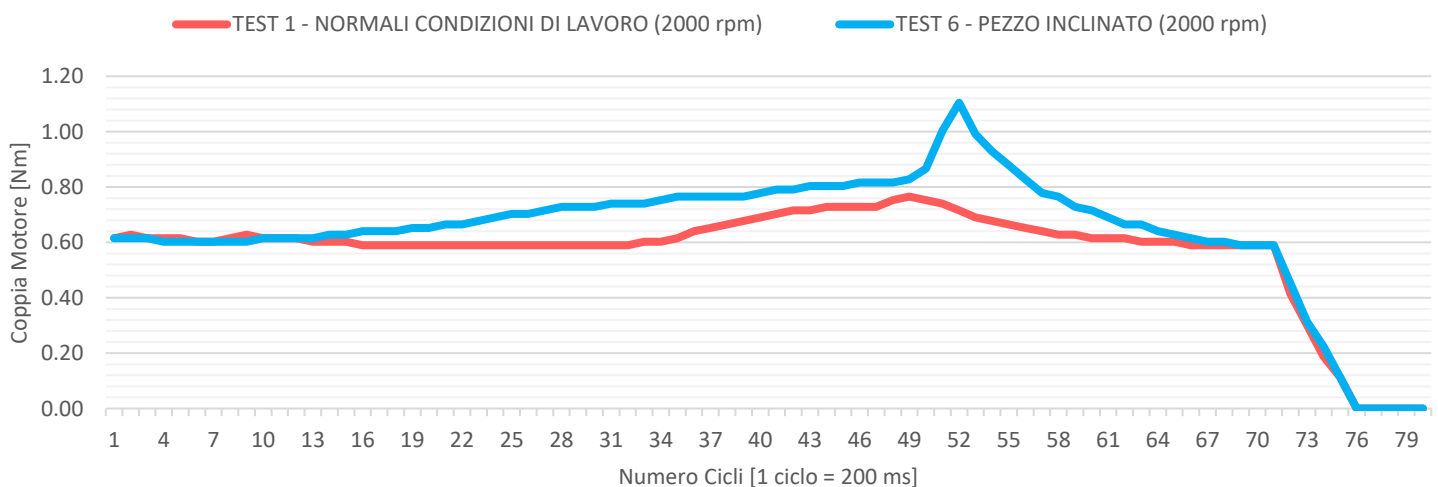


Grafico 8.6: confronto coppie test 1 - test 6

Dal *Grafico 8.6*, la coppia motore del test 6 “con pezzo inclinato” risulta essere maggiore rispetto a quella registrata nel test 1 “in sicurezza”; ciò indica che il trapano durante la prova ha lavorato sotto sforzo: per mantenere costante la velocità di rotazione ha dovuto necessariamente aumentare la coppia. Inoltre, si nota un picco di coppia motore pari a 1,10 Nm (maggiore di quello avuto nella prova in sicurezza pari a 0,77 Nm) causato da uno slittamento tra punta e mandrino.

3.2.6 – Test 1 (normali condizioni di lavoro) con test 7 (pezzo non bloccato)

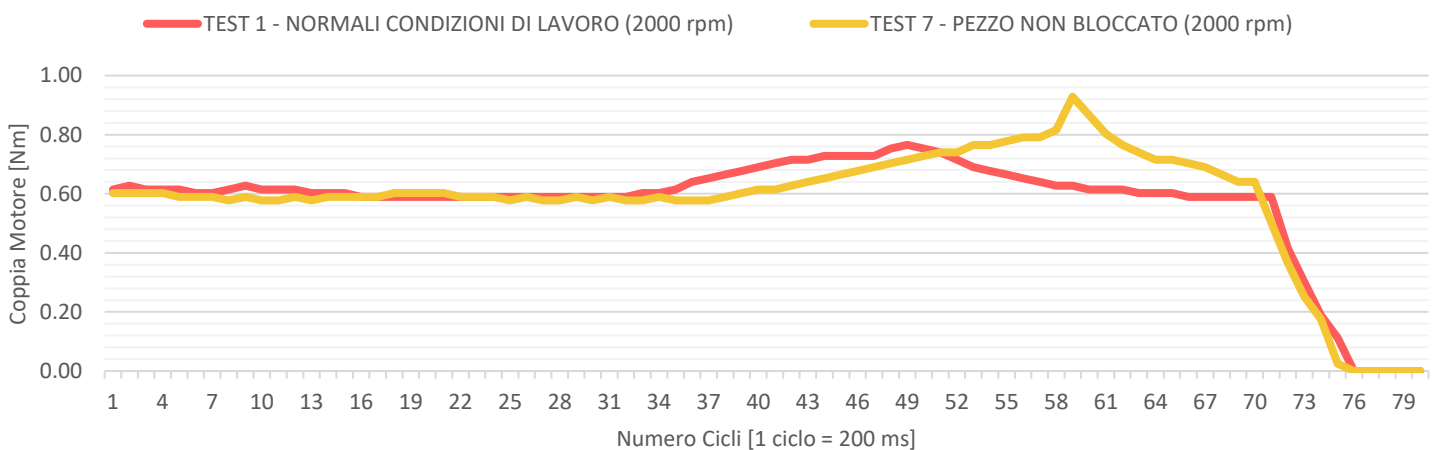


Grafico 8.7: confronto coppie test 1 - test 5

Da questo ultimo confronto si può dedurre che inizialmente la coppia motore registrata nel test 7 “con pezzo non bloccato” è in linea con la coppia motore del test 1 “in normali condizioni di lavoro”. Successivamente il valore di coppia della prova non in sicurezza è aumentato, raggiungendo un picco pari a 0,93 Nm dovuto alla maggior forza necessaria per eseguire la foratura in quanto il pezzo non era correttamente bloccato dalla morsa. Alla fine della prova, la coppia motore è andata via via diminuendo in quanto il provino d’alluminio è stato proiettato verso l’alto dalla punta, iniziando poi a ruotare con essa (*Paragrafo 2.8*).

3.3 – Conclusioni

Questo lavoro propone un quadro generale del comportamento di una macchina utensile, quale un trapano a colonna, in diverse condizioni operative. Tutto ciò è stato possibile grazie all'implementazione di un sistema di controllo, all'installazione di sistemi di protezione e all'inserimento della sensoristica necessaria al monitoraggio dei parametri funzionali della macchina.

Analizzando i test di foratura svolti e confrontandoli tra loro, l'unica situazione in cui l'operatore si è trovato in condizioni di piena sicurezza è stato durante la prova "a basso numero di giri (1000 rpm)" in cui non sono stati riscontrati comportamenti pericolosi da parte del trapano (senza considerare il leggero sovraccarico dovuto alla velocità inferiore rispetto a quella consigliata dai parametri di foratura).

Invece, le altre prove svolte in condizioni anomale non hanno garantito la sicurezza dell'operatore, creando sia situazioni di rischio per lo stesso, sia possibili danni alla macchina e agli utensili.

Dalla comparazione delle prove è emerso che, per mantenere inalterata la velocità di rotazione, nel caso di inosservanza delle buone prassi per lavorare in sicurezza (*Paragrafo 1.8*), come avvenuto nella simulazione delle prove in condizioni anomale, il trapano tende a lavorare sotto sforzo ed in maniera poco efficiente, aumentando la coppia erogata dal motore anche del doppio rispetto alla normale condizione di lavoro. In conclusione, qualsiasi situazione al di fuori delle condizioni consigliate per una lavorazione sicura ed efficiente sono da evitare. In ogni caso, la presenza dei dispositivi di sicurezza installati sul trapano e indossati dall'operatore, qualora queste procedure non vengano rispettate, possono limitare i rischi per la sicurezza sul lavoro e i possibili danni causati a persone o cose.

Bibliografia

- C. Amerio, R. D. (2011). Lavorazioni per asportazione di truciolo. In R. D. C. Amerio, *Elementi di tecnologia*. © SEI .
- Consystem S.r.l. (2022, Aprile 12). *Che cosa è un INVERTER? come funziona?* Tratto da CONSYSTEM: <https://consystem.it/faq/cose-un-inverter-come-funziona/>
- Crisantemi, M. (2022, Maggio 19). *Digital Twin: che cos'è, come funziona e quali sono i vantaggi del gemello digitale*. Tratto da INNOVATION Post: <https://www.innovationpost.it/2021/10/12/digital-twin-che-cose-come-funziona-e-quali-sono-i-vantaggi-del-gemello-digitale/>
- Manzonelli, A. (2020-21). *REALIZZAZIONE DI UN DIGITAL TWIN DI MACCHINE UTENSILI INDUSTRIALI TRAMITE AZIONI DI SMART RETROFITTING*. Tesi registrata presso l' Univesità Politecnica delle Marche - Facoltà di Ingegneria.
- R+W ITALIA S.R.L. (2022, Maggio 19). *Le lavorazioni per asportazione di truciolo*. Tratto da R+W - A POPPE+POTTHOFF COMPANY: <https://blog.rw-italia.it/lavorazioni-asportazione-truciolo>
- Torchiani, G. (2022, Maggio 19). *Cos'è il condition monitoring e come funziona*. Tratto da LUMI 4 innovation: <https://www.lumi4innovation.it/cos-e-condition-monitoring-come-funziona/>