

SUPSI

Studio e realizzazione di un banco di prova per utensili monotagliante

Studente/i

Ivan Beljan

Relatore

Ing. Galli Andrea

Correlatore

Ing. Dotta Matteo

Committente

-

Corso di laurea

Ingegneria meccanica (TP)

Modulo

M-P6070

Progetto di diploma C10419

Anno

2020/2021

PAGINA BIANCA

Abstract

L'obiettivo di questo lavoro è quello di realizzare un sistema di monitoraggio delle forze per verificare la validità delle formule teoriche apprese durante le lezioni di tecniche d'asportazione di truciolo per utensili a taglio ortogonale e obliquo. Il dispositivo progettato è implementabile su torni convenzionali e a controllo numerico.

La soluzione proposta prevede di scomporre la forza risultante in tre forze ortogonali monitorabili tramite la deformazione di trasduttori elettrici, i quali sono formati da anelli ottagonali e muniti di estensimetri a foglio. Secondo la teoria della deformazione del cerchio, gli anelli permettono una deformazione ottimale per il controllo delle forze applicate in direzione tangenziale e di compressione.

Il sistema di monitoraggio è composto da quattro anelli suddivisi in coppie di due elementi. Gli anelli spessi sono disposti in direzione del vettore della forza di taglio ed essendo la componente con l'intensità maggiore hanno un'elevata resistenza alla deformazione. Gli anelli sottili sono allineati in modo perpendicolare rispetto alla coppia opposta ed hanno l'obiettivo di monitorare la forza di resistenza all'avanzamento, ovvero la componente con l'intensità minore fra le forze presenti. La forza di repulsione è misurata dalla coppia degli anelli spessi i quali garantiscono una deformazione ottimale sulle estremità laterali. Tutti i carichi presenti vengono misurati tramite quattro estensimetri collegati ad un ponte intero di Wheatstone. La posizione di quest'ultimi, per le componenti di taglio e di resistenza all'avanzamento, sono situati sulle superfici inclinate inferiori dell'anello ottagonale, mentre per la forza di repulsione sono collocati nelle aree laterali.

La soluzione sviluppata permette di monitorare i carichi nelle tre direzioni ortogonali ed è possibile utilizzare diverse tipologie d'utensile da tornio. Gli ingombri totali dell'intero assieme sono 90x108x180 [mm].

Il macchinario è implementabile nella torretta del tornio senza modifiche geometriche o lavorazioni ausiliarie.

PAGINA BIANCA

Indice generale

Abstract	3
Indice generale	5
Progetto assegnato	9
1 Introduzione	11
2 End user requirements	13
2.1 <i>Bisogni primari</i>	13
2.2 <i>Bisogni secondari</i>	13
3 Specifiche progetto	13
3.1 <i>Limiti</i>	13
3.2 <i>Prestazioni</i>	13
4 Accenni di teoria	15
4.1 <i>Taglio ortogonale</i>	15
4.1.1 Rappresentazione e parametri dell'utensile.....	15
4.1.2 Rappresentazione e parametri della lavorazione.....	16
4.1.3 Parametri del taglio ortogonale	16
4.1.4 Angolo di spoglia inferiore α	17
4.1.5 Angolo di spoglia superiore γ	17
4.1.6 Angolo di taglio β	17
4.1.7 Piano di scorrimento.....	17
4.1.8 Determinazione dell'angolo di scorrimento φ	18
4.1.9 Cinematica di taglio	18
4.1.10 Relazione tra velocità di scorrimento e velocità di taglio	19
4.1.11 Dinamica del taglio-Modello di Merchant	19
4.1.12 Forza risultante sul truciolo.....	20
4.1.13 Circonferenza di Marchant	20
4.1.14 Tensione tangenziale di scorrimento	21
4.1.15 Tensione normale di compressione	21
4.2 <i>Riassunto taglio ortogonale</i>	22
4.2.1 Taglio obliquo	23
4.2.2 Angolo di spoglia frontale reale γ_r	23
4.2.3 Le tre forze del taglio obliquo	24
4.2.4 Scomposizione della forza F_n	24
4.2.5 Riassunto taglio obliquo.....	25
4.2.6 Andamento della forza di taglio F_t	26
5 Sensorica	27
5.1 <i>Piezoelettricità</i>	27
5.1.1 Sensore piezoelettrico di forza.....	29
5.2 <i>Estensimetri</i>	30
5.2.1 Ponte di Wheatstone	30
6 Stato dell'arte	33

6.1	<i>Sistemi presenti in commercio</i>	33
6.1.1	Sistema di monitoraggio Kistler	33
6.2	<i>Sistemi esistenti</i>	34
6.2.1	Sistema ad anelli ottagonali	34
6.2.2	Sistema a doppio anello.....	36
6.3	<i>Sistemi ideati</i>	39
6.3.1	Sistema piezoelettrico triassiale	39
6.3.2	Sistema ibrido	40
6.3.3	Sistema di monitoraggio di forze biassiali	41
7	Cassa Morfologica	43
8	Analisi e valutazione delle varianti	45
8.1	<i>Funzione: Sensorica</i>	46
8.2	<i>Funzione: Sistema di fissaggio</i>	48
8.3	<i>Funzione: Struttura del sistema</i>	50
8.4	<i>Funzione: Bloccaggio utensile</i>	53
9	Variante finale	57
9.1	<i>Punto d'azione delle forze</i>	57
9.1.1	Variante A	58
9.1.2	Variante B	58
9.1.3	Variante definitiva	59
9.1.4	Problematiche.....	59
9.1.5	Semplificazione utensile	60
10	Spessore anelli	61
10.1	<i>Anelli spessi</i>	61
10.2	<i>Anelli sottili</i>	62
10.3	<i>Lunghezza utensile</i>	62
11	Scelta estensimetri	63
11.1	<i>Estensimetro definitivo</i>	64
11.2	<i>Materiale legante</i>	64
11.3	<i>Cavi estensimetro</i>	64
11.4	<i>Cava base</i>	65
12	Calcoli	67
12.1	<i>Calcoli delle velocità</i>	67
12.1.1	Velocità di taglio	67
12.1.2	Velocità d'avanzamento	68
12.2	<i>Rilevamento delle forze</i>	68
12.3	<i>Calcolo potenza di tornitura</i>	70
12.4	<i>Calcolo viti</i>	71
12.4.1	Momento di Serraggio	71

12.4.2	Tensione.....	73
12.4.3	Pressione sui filetti.....	74
13	Analisi numerica FEM.....	75
13.1	<i>Variante A</i>	75
13.1.1	Infittimenti.....	77
13.1.2	Applicazione delle forze.....	78
13.1.3	Risultati simulazione.....	78
13.2	<i>Variante B</i>	79
13.2.1	FEM.....	79
13.2.2	Infittimenti.....	80
13.2.3	Fissaggio.....	81
13.2.4	Carichi.....	81
13.2.5	Analisi dei risultati.....	82
13.2.6	Analisi tensioni.....	82
14	Rilevamento delle deformazioni.....	83
14.1	<i>Forza di taglio</i>	83
14.2	<i>Forza di resistenza all'avanzamento</i>	84
14.3	<i>Forza di repulsione</i>	84
15	Tornio KD 400.....	85
16	Materiale.....	87
16.1	<i>X5CrNi18-10</i>	87
17	Trattamenti termici.....	89
17.1	<i>Tempra totale o cementazione a zone</i>	89
17.2	<i>Rischio rottura</i>	89
17.3	<i>Problematica flangia</i>	90
18	Ingombro.....	91
19	Lista pezzi.....	93
19.1	<i>Pezzi di fabbricazione</i>	93
19.2	<i>Pezzi di commercio</i>	93
19.1	<i>Assiemi</i>	93
19.2	<i>Schema di montaggio</i>	94
19.3	<i>Analisi dei costi</i>	94
20	Miglioramenti.....	95
21	Conclusioni.....	97
22	Sitografia.....	99
	Indice delle figure.....	100
	Indice delle tabelle.....	102
23	Allegati.....	103

PAGINA BIANCA

Progetto assegnato

Studio e realizzazione di un banco di prova per utensili monotagliante

Persone coinvolte

Proponente	Galli Andrea
Relatore	Galli Andrea
Correlatore	Dotta Matteo
Studente	Ivan Beljan
Studente	--

Dati generali

Codice	C10419
Anno accademico	2020/2021
Semestre	Estivo
Corso di laurea	Ingegneria Meccanica
Opzione	Nessuna
Tipologia del progetto	Diploma
Stato	Proposta
Confidenziale	NO
Pubblicabile	NO

Descrizione

Per il corso tecniche di fabbricazione si vuole realizzare un banco di prova a scopo didattico per verificare la validità di quanto appreso nelle lavorazioni per asportazione di truciolo per utensili a taglio ortogonale e obliquo. Il sistema deve essere aperto con la possibilità di aggiungere ulteriori tools per la caratterizzazione degli utensili.

Compiti

- Pianificazione del progetto;
- Raccolta dei requisiti (End User Requirements), analisi e stesura del quaderno dei compiti;
- Ricerca, analisi, confronto e valutazione di diverse soluzioni possibili con selezione della variante ottimale;
- Sviluppo della soluzione scelta con definizione di tutti i componenti necessari;
- Dimensionamenti necessari;
- Analisi obbiettiva della soluzione proposta;
- Rapporto;

Obbiettivi

- Definire tutte le specifiche del progetto;
- Fornire una soluzione attuabile;
- Fornire i disegni d'assieme della soluzione sviluppata;
- Fornire i disegni di dettaglio;
- Rapporto completo del lavoro svolto;

Tecnologie

- Tecniche di progettazione meccanica;
- Tecniche di fabbricazione;
- Elementi di macchine;
- CAD;
- Resistenza dei materiali;
- Analisi FEM;

Contatto esterno

Nessun contatto esterno presente.

Documenti allegati

Nessun allegato presente.

1 Introduzione

Attualmente il monitoraggio delle forze sugli utensili da taglio è un'operazione ampiamente richiesta dalle industrie meccaniche. Il motivo di tale importanza risiede nel fatto che i calcoli teorici non sono sufficientemente accurati, perciò si necessita un dinamometro per un controllo in tempo reale. Le forze generate nelle lavorazioni di tornitura oblique e ortogonali influiscono sulla qualità del pezzo da lavorare, sulla sua precisione e sull'usura del tagliente. Avendo la possibilità di correggere i parametri in tempo reale si riducono i costi di lavorazione migliorandone l'efficienza, inoltre si allunga la durata di vita dell'utensile.

Le metodologie maggiormente utilizzate per eseguire queste operazioni sono il rilevamento della deformazione plastica dei materiali misurate tramite estensimetri o sensore piezoelettrici. La risultante delle forze è tridimensionale ed è scomponibile in forza di taglio, forza di repulsione e forza di resistenza all'avanzamento.

Un'ulteriore richiesta del mercato delle industrie è la necessità di lavorazione di materiali con durezza sempre più elevata, come acciai inossidabili o acciai ad elevate concentrazioni di carbonio. Con il monitoraggio delle forze è possibile sostituire il più possibile le operazioni di rettifica con quelle di tornitura, migliorando considerevolmente l'aspetto economico della produzione, rendendo così indispensabile il controllo dell'usura degli utensili.

In commercio è possibile ottenere dinamometri in grado di rilevare le forze triassiali con estrema precisione, il prezzo di tali prodotti è tuttavia molto elevato, portando ad avere un vantaggio economico solo in caso di produzione di pezzi in serie.

In questo rapporto per il monitoraggio delle forze è stato creato un dispositivo implementabile sulla torretta del tornio, composto da due piastre in acciaio X5CrNi1810 distanziate da quattro anelli ottagonali muniti di estensimetri.

2 End user requirements

2.1 Bisogni primari

- Realizzazione di un dinamometro in grado di monitorare separatamente le forze agenti sull'utensile durante una lavorazione di tornitura in taglio obliquo e ortogonale.
- Il sistema progettato deve essere applicabile sul tornio presente in officina SUPSI.

2.2 Bisogni secondari

- Il sistema deve avere la possibilità di utilizzare utensili differenti.

3 Specifiche progetto

3.1 Limiti

Titolo	Ingombri		
Descrizione	Il volume occupato dal macchinario		
Quantità	Minima	Ideale	Massima
	-	Dimensione torretta utensile	-
Commento	La dimensione ideale del dispositivo deve essere simile alla grandezza della torretta utensile, in quanto deve essere implementabile senza eseguire modifiche alla postazione del tornio.		

Titolo	Costi		
Descrizione	Costi per la realizzazione		
Quantità	Minima	Ideale	Massima
	-	-	-
Commento	Non c'è un budget fisso. Bisogna però prevedere un budget in linea con la realizzazione di un dinamometro ed evitare sensori con un prezzo di commercio elevato.		

3.2 Prestazioni

Titolo	Monitoraggio forze		
Descrizione	Le forze devono essere misurate separatamente		
Quantità	Minima	Ideale	Massima
	-	-	-
Commento	Bisogna monitorare le forze in tempo reale con l'ausilio di estensimetri o sensori piezoelettrici		

Titolo	Versatilità		
Descrizione	Il dispositivo deve supportare diversi tipi d'utensile		
Quantità	Minima	Ideale	Massima
	-	-	-
Commento	Deve esserci la possibilità di inserire diversi tipi d'utensile, la struttura non deve essere progettata per un solo tipo		

4 Accenni di teoria

Le tipologie di lavorazione sul tornio sono le lavorazioni di taglio ortogonale e taglio obliquo. Il taglio ortogonale comprende le operazioni in cui le forze agenti sono bidimensionali come: la troncatura, la sfacciatura, la rettifica o la piallatura. Nel taglio obliquo sono presenti tre forze ortogonali ed esse si manifestano nell'operazione più comunemente utilizzata, ovvero la tornitura.

4.1 Taglio ortogonale

Il taglio ortogonale è una lavorazione per asportazione di truciolo eseguita su macchine utensili (quali tornio, piallatrice, ...) il quale sussiste nel distacco di un volume di materiale attraverso l'interazione di un utensile che agisce in maniera progressiva (moto relativo). L'utensile agisce direttamente sul grezzo asportando il materiale sotto forma di truciolo per ottenere il pezzo finito con la geometria e la qualità superficiale richiesta.

Una caratteristica interessante di questo tipo di lavorazione sussiste nel fatto che l'analisi delle forze di taglio può essere trattata in forma bidimensionale, poiché il tagliente dell'utensile è posizionato in modo perpendicolare alla direzione del moto di taglio, in questo modo il truciolo ha solo modo di formarsi sul petto dell'utensile. [1]

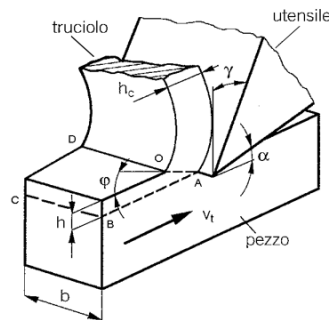


Figura 1 Rappresentazione dell'operazione di tornitura

4.1.1 Rappresentazione e parametri dell'utensile

L'utensile per il tornio si presenta con le seguenti caratteristiche geometriche:

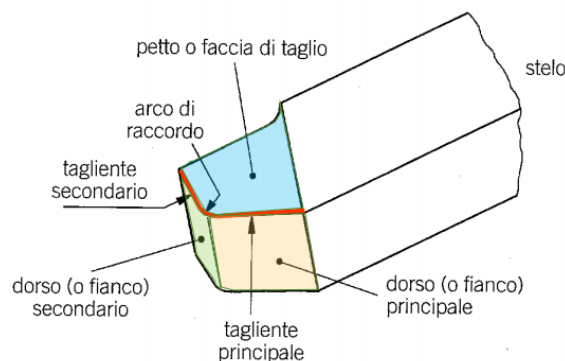


Figura 2 Caratteristiche geometriche di un utensile da tornio

- Stelo: è il corpo dell'utensile il quale viene fissato alla torretta, solitamente ha una sagoma rettangolare.
- Petto: è la superficie sul quale il materiale da asportare scorre trasformandosi in truciolo.
- Fianchi: sono le superfici adiacenti al petto.
- Taglienti: sono gli spigoli formati dall'intersezioni del petto con i fianchi.

4.1.2 Rappresentazione e parametri della lavorazione

Per effettuare un'operazione d'asportazione di materiale bisogna definire i seguenti parametri di taglio:

- Moto di avanzamento: è il movimento longitudinale dell'utensile verso l'asse del pezzo da lavorare, è uno spostamento continuo ed è definito dalla velocità di avanzamento V_a espresso in mm/giro
- Moto di taglio: è la movimentazione circolare del pezzo da lavorare ed è definita dalla velocità di taglio V_t espressa in mm/min
- Moto di registrazione: è definito dalla profondità di passata, ovvero la profondità di strato di materiale da asportare.

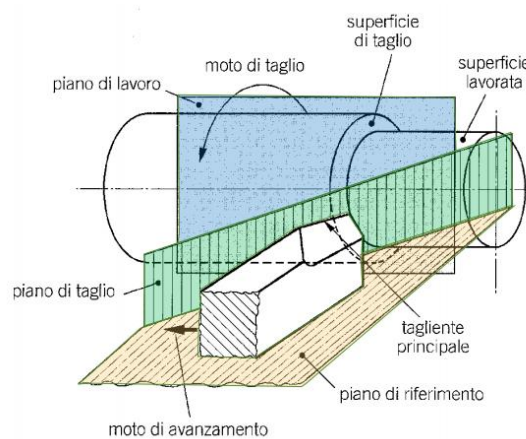


Figura 3 Schematizzazione della lavorazione

4.1.3 Parametri del taglio ortogonale

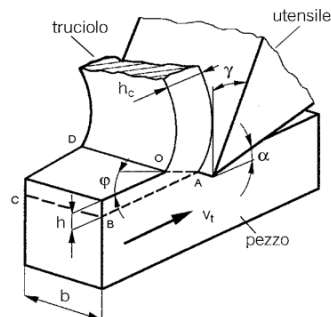


Figura 4 Schematizzazione della lavorazione

- b = larghezza del truciolo indeformato
- b_c = larghezza del truciolo deformato
- h = altezza del truciolo indeformato
- h_c = altezza del truciolo deformato
- A = sezione asportata ($A = b * h$)
- φ = angolo di scorrimento
- γ = angolo di spoglia superiore
- α = angolo di spoglia inferiore

4.1.4 Angolo di spoglia inferiore α

Lo scopo di quest'angolo è di evitare lo strisciamento tra il fianco dell'utensile e la superficie del pezzo appena lavorato, se non ci fosse si creerebbe un contatto che rovinerebbe la rugosità generando un riscaldamento indesiderato.

4.1.5 Angolo di spoglia superiore γ

Quest'angolo è formato dall'intersezione dell'utensile con il piano di scorrimento ed influisce sulla formazione del truciolo. Grazie a questo angolo si possono ottenere le varie forme dei trucioli (continuo, segmentato, discontinuo).

4.1.6 Angolo di taglio β

È l'angolo d'ampiezza dell'utensile ed è possibile ricavarlo sottraendo gli angoli α e γ ad un angolo retto.

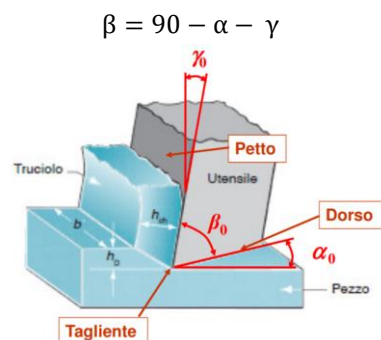


Figura 5 Rappresentazione degli angoli

Osservando l'immagine dell'utensile schematizzato, è possibile affermare che non conviene aumentare in modo eccessivo gli angoli α e γ , in quanto porterebbero una diminuzione dell'angolo β il quale diminuirebbe la resistenza dell'utensile. L'angolo β conferisce una robustezza necessaria per sopportare le azioni dinamiche che si sviluppano durante la lavorazione. [2]

4.1.7 Piano di scorrimento

Il piano di scorrimento è l'area in cui il materiale si distacca dal grezzo per trasformarsi in truciolo, questa trasformazione avviene per una deformazione plastica, la quale produce uno scorrimento dei piani cristallini. Il truciolo in deformazione è composto da un gran numero di piani di spessori infinitesimi che scorrono fra essi per l'effetto dell'azione esercitata dall'utensile.

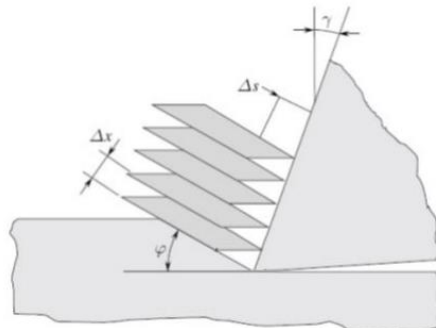


Figura 6 Rappresentazione dei piani cristallini

4.1.8 Determinazione dell'angolo di scorrimento φ

Per ottenere l'angolo di scorrimento, si utilizza la trigonometria sfruttando il triangolo ABO con le rispettive proiezioni dei cateti. È necessario conoscere il fattore di ricalcamento, il quale si esprime come:

$$r_c = \frac{h}{h_c}$$

Sostituendo i valori degli spessori si può isolare φ

$$r_c = \frac{h}{h_c} = \frac{OA \sin \varphi}{OA \cos(\varphi - \gamma)} = \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma)} \quad (r_c < 1)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{r_c \cos(\gamma)}{1 - r_c \sin(\gamma)} \right)$$

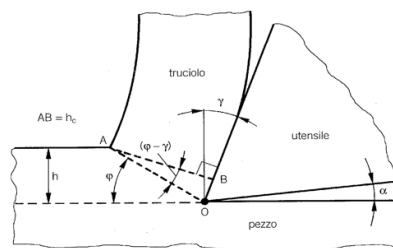


Figura 7 determinazione dell'angolo di scorrimento φ

4.1.9 Cinematica di taglio

Analizzando la situazione del moto di taglio è possibile suddividere la velocità di taglio V_t per ottenere le velocità di deformazione del truciolo. Le due componenti sono la velocità di scorrimento V_s e la velocità di flusso V_f . È importante conoscere questi valori poiché essi influenzano la resistenza e la duttilità del materiale e il tipo di truciolo prodotto.

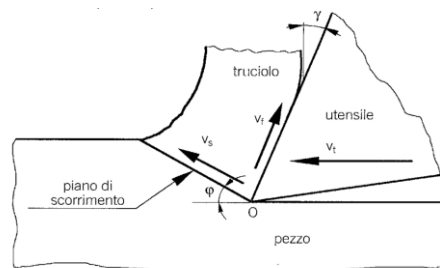


Figura 8 Schematizzazione delle velocità

Il truciolo indeformato h è leggermente minore del truciolo deformato h_c , e la velocità di flusso V_f è minore rispetto alla velocità di taglio V_t . In questo modo si può applicare la legge della conservazione della massa e ricavare la componente V_f , ricordando che il rapporto fra gli spessori dei trucioli è il fattore di ricalcamento r_c .

$$V_f h_c = V_t h$$

Isolando V_f si ottiene:

$$V_f = V_t \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma)}$$

4.1.10 Relazione tra velocità di scorrimento e velocità di taglio

Riportando lo schema delle velocità si ottiene:

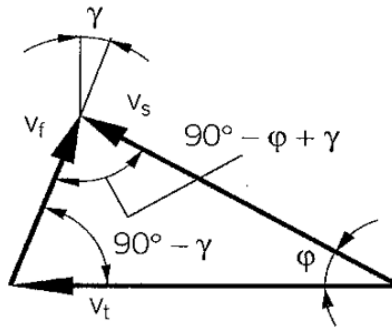


Figura 9 Schema delle velocità

$$\vec{V}_s = \vec{V}_t + \vec{V}_f$$

E tramite il teorema del seno si può ottenere la relazione fra le velocità:

$$\frac{V_t}{\sin(90^\circ - (\varphi - \gamma))} = \frac{V_s}{\sin(90^\circ - \gamma)} = \frac{V_f}{\sin(\varphi)}$$

$$\frac{V_t}{V_s} = \frac{\cos(\gamma)}{\cos(\varphi - \gamma)}$$

$$\frac{V_f}{V_t} = \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi - \gamma)} = r_c$$

Tramite questo risultato possiamo affermare che il rapporto fra la velocità di flusso con quella di taglio è medesimo al fattore di ricalcamento r_c . Mentre con il rapporto tra velocità di scorrimento V_s e lo spessore si ottiene la velocità di deformazione.

$$\dot{\gamma} = \frac{V_s}{\Delta x}$$

4.1.11 Dinamica del taglio-Modello di Merchant

Supponendo di trascurare la curvatura del truciolo, le forze applicate sul truciolo saranno:

- La forza risultante applicata dal pezzo in lavorazione R
- La forza risultante applicata sull'utensile R'

La forza risultante R può essere scomposta nel seguente modo:

- La forza N, ovvero quella normale al contatto con il petto dell'utensile
- La forza F, ovvero quella tangenziale al petto dell'utensile

Per quanto riguarda l'angolo di inclinazione ρ , esso è in funzione del coefficiente d'attrito ed è chiamato angolo d'attrito.

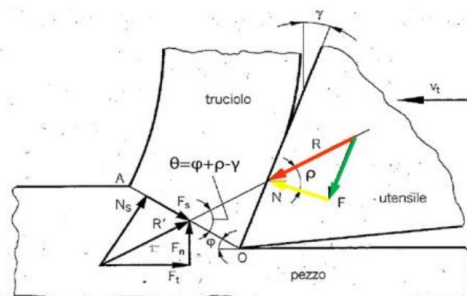


Figura 10 Schema delle forze agenti

Con le informazioni date è possibile ricavare analiticamente i valori:

$$\rho = \tan^{-1}(\mu)$$

$$F = R \sin(\rho)$$

$$N = R \cos(\rho)$$

4.1.12 Forza risultante sul truciolo

Essendo in una condizione di equilibrio, all'applicazione della forza R avviene una forza di reazione contraria R' , la quale può essere scomposta secondo la direzione del moto di taglio e secondo la direzione ortogonale di quest'ultima.

- La forza di taglio F_t , indirizzata verso la direzione del moto di taglio
- La forza di repulsione o normale F_n , indirizzata perpendicolarmente al moto di taglio

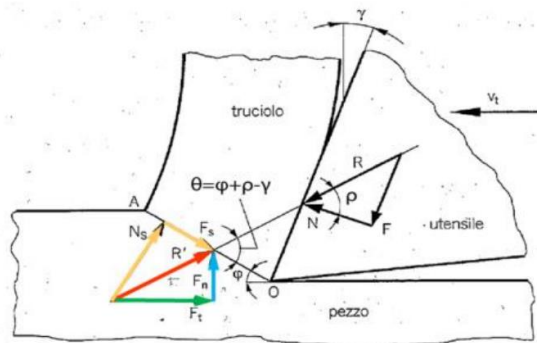


Figura 11 Forze di reazione

4.1.13 Circonferenza di Marchant

Grazie a questo metodo è possibile ricavare la tensione di compressione e la tensione tangenziale che agiscono sul pezzo. Per realizzarlo bisogna traslare la forza risultante R sullo spigolo del tagliente, in questo modo si ottiene la circonferenza di Marchant.

Tramite le formule trigonometriche è possibile ricavare tutte le forze:

- Forza di taglio: $F_t = R \cos(\varphi - \gamma)$
- Forza normale: $F_n = R \sin(\varphi - \gamma)$
- Forza sul piano di scorrimento: $F_s = R \cos(\rho + \varphi - \gamma)$
- Forza normale sul piano di scorrimento: $N_s = R \sin(\rho + \varphi - \gamma)$

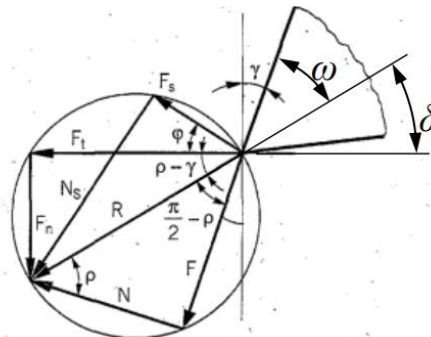


Figura 12 Circonferenza di Marchant

4.1.14 Tensione tangenziale di scorrimento

Siccome secondo il modello a piano di scorrimento tutta la deformazione si produce sullo stesso, la componente F_s si può calcolare in termini della tensione tangenziale di scorrimento del materiale. Quindi F_s la si può ricavare con A_s l'area del piano di scorrimento e τ_s la tensione tangenziale di scorrimento agente sul piano.

$$F_s = \tau_s A_s$$

A_s la si trova secondo la relazione:

$$A_s = \frac{A}{\sin(\varphi)}$$

Quindi F_s risulta essere:

$$F_s = \tau_s \frac{A}{\sin(\varphi)}$$

4.1.15 Tensione normale di compressione

In questa situazione si andranno a ricavare le restanti forze, con la tensione normale di compressione σ_s si ottiene:

$$N_s = \sigma_s \frac{A}{\sin(\varphi)}$$

In questo modo è possibile ricavare la forza risultante R:

$$R = \frac{F_s}{\cos(\rho + \varphi - \gamma)} = A_s \tau_s \frac{1}{\cos(\rho + \varphi - \gamma)} = A \tau_s \frac{1}{\sin(\varphi) \cos(\rho + \varphi - \gamma)}$$

Analogamente la forza di taglio F_t :

$$F_t = R \cos(\rho - \gamma) = A \tau_s \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\sin(\varphi) \cos(\rho + \varphi - \gamma)}$$

Ed infine la forza normale F_n :

$$F_n = R \sin(\rho - \gamma) = A \tau_s \frac{\sin(\rho - \gamma)}{\sin(\varphi) \cos(\rho + \varphi - \gamma)} = F_t \tan(\rho - \gamma)$$

4.2 Riassunto taglio ortogonale

In conclusione, le ipotesi e le forze agenti da considerare sono le seguenti:

- La formazione del truciolo è continua per scorrimento secondo il piano OA.
- Non è presente un coefficiente d'attrito nel contatto fianco utensile-superficie in lavorazione.
- Il coefficiente d'attrito è costante e non cambia da statico a dinamico.

Per quanto riguarda le forze utili sono:

- Forza sul piano di scorrimento

$$F_s = \tau_s \frac{A}{\sin(\varphi)}$$

- Forza normale al piano di scorrimento

$$N_s = \sigma_s \frac{A}{\sin(\varphi)}$$

- Forza risultante

$$R = A\tau_s \frac{1}{\sin(\varphi)\cos(\rho + \varphi - \gamma)}$$

- Forza di taglio

$$F_t = A\tau_s \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\sin(\varphi)\cos(\rho + \varphi - \gamma)}$$

- Forza normale

$$F_n = F_t \tan(\rho - \gamma)$$

- Relazione di Ernst e Merchant che lega gli angoli caratteristici

$$2\varphi + \rho - \gamma = \frac{\pi}{2}$$

4.2.1 Taglio obliquo

La gran parte delle lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo avviene in condizioni di taglio obliquo, cioè con il tagliente dell'utensile non perpendicolare alla velocità di taglio. In questa situazione non si presenta più un caso bidimensionale ma un caso tridimensionale.

Le differenze principali fra il taglio ortogonale e quello obliquo sono le seguenti:

- È presente un ulteriore angolo λ (angolo di inclinazione), ed è l'inclinatura del tagliente rispetto all'asse y , perpendicolare al moto di taglio.
- Il truciolo indeformato (sovrametallo) viene asportato dal tagliente con la velocità di taglio V_t , successivamente a truciolo formato fluisce sul petto dell'utensile con un angolo di flusso del truciolo α_f ed una velocità V_f .
- Il piano di taglio in questa situazione è definito dalla velocità di taglio V_t e dalla velocità di flusso del truciolo V_f e viene marcato come piano π .

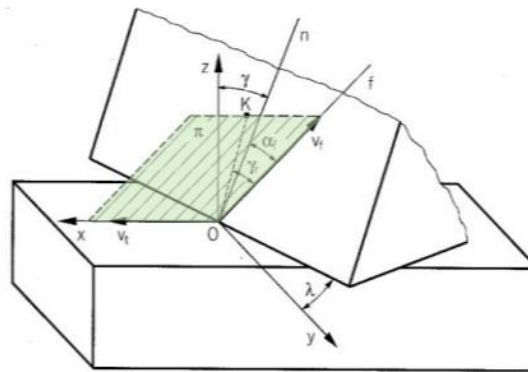


Figura 13 Piano del taglio obliquo

4.2.2 Angolo di spoglia frontale reale γ_r

L'angolo di flusso α_f è creato dall'intersezione del moto di flusso e dalla retta n , ovvero una retta perpendicolare al tagliente che giace sul petto dell'utensile. Con una sufficiente approssimazione è possibile assumere $\alpha_f = \lambda$.

In condizioni di taglio obliquo, l'angolo di spoglia frontale è l'angolo formato sul piano π , tra la direzione di V_f della velocità di flusso e dalla direzione della OK che giace sul piano π ed è normale alla direzione x della velocità di taglio.

Questo angolo viene detto angolo di spoglia frontale reale γ_r , esso può essere espresso in funzione di γ , misurabile sul tagliente, dell'angolo di flusso α_f e l'angolo di inclinazione γ .

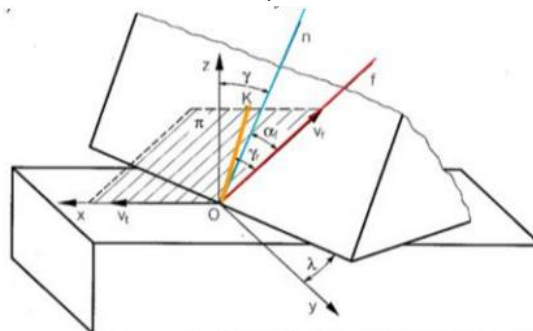


Figura 14 angolo di spoglia frontale reale

Angolo di spoglia frontale reale γ_r si ottiene nel seguente modo, tenendo in considerazione $\alpha_f = \lambda$.

$$\sin(\gamma_r) = \sin(\lambda) \sin(\alpha_f) + \cos(\lambda) \cos(\alpha_f) \sin(\gamma)$$

$$\sin(\gamma_r) = \sin^2(\lambda) + \cos^2(\lambda) \sin(\gamma)$$

4.2.3 Le tre forze del taglio obliquo

La risultante delle forze può essere scomposta in tre forze principali F_r , F_t e F_a . Per illustrare lo schema delle forze si riporta un utensile mono tagliente con un angolo d'attacco κ diverso da 90° . Il punto marcato come "P" è l'origine di applicazione delle forze.

La forza di taglio F_t genera la maggior flessione dell'utensile ed è tangente alla circonferenza del diametro del pezzo da lavorare.

La forza normale F_n ha un'inclinazione di α_f rispetto alla normale del tagliente ed è perpendicolare rispetto alla forza di taglio F_t .

Le formule per ottenere i valori sono le medesime, con la differenza che bisogna inserire l'angolo di spoglia frontale reale γ_r .

$$F_t = A\tau_s \frac{\cos(\varphi - \gamma_r)}{\sin(\varphi)\cos(\rho + \varphi - \gamma_r)}$$

$$F_n = A\tau_s \frac{\sin(\varphi - \gamma_r)}{\sin(\varphi)\cos(\rho + \varphi - \gamma_r)} = F_t \tan(\rho - \gamma_r)$$

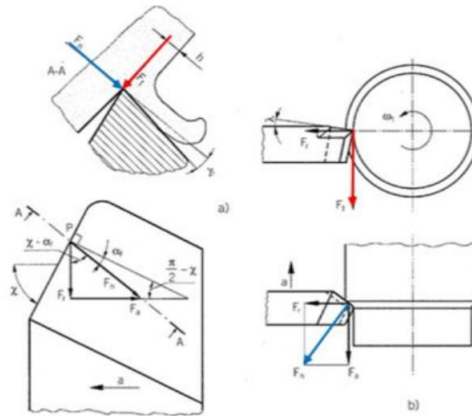


Figura 15 F_t e F_n nel taglio obliquo

4.2.4 Scomposizione della forza F_n

La forza F_n in questa situazione è orientata in modo non parallelo rispetto al moto di avanzamento, per questo motivo la si suddivide in forza di resistenza all'avanzamento F_a e in forza di repulsione F_r .

La forza F_a agisce creando un momento flettente all'utensile, mentre la forza di repulsione F_r crea una sollecitazione di compressione.

Dunque, per trovare i valori analitici:

- F_a forza di resistenza all'avanzamento

$$F_a = F_n \sin(\kappa - \alpha_f) \cong F_n \sin(\kappa - \lambda)$$

- F_r forza di repulsione

$$F_r = F_n \cos(\kappa - \alpha_f) \cong F_n \cos(\kappa - \lambda)$$

- R forza risultante fra le forze F_a , F_r e F_t

$$R = \sqrt{F_t^2 + F_r^2 + F_a^2}$$

4.2.5 Riassunto taglio obliquo

In conclusione, le ipotesi e le forze agenti da considerare sono le seguenti:

- La formazione del truciolo è continua per scorrimento secondo il piano OA.
- Non è presente un coefficiente d'attrito nel contatto fianco utensile-superficie in lavorazione.
- Il coefficiente d'attrito è costante e non cambia da statico a dinamico

Per quanto riguarda le forze utili sono:

- Forza di taglio

$$F_t = A\tau_s \frac{\cos(\rho - \gamma_r)}{\sin(\varphi)\cos(\rho + \varphi - \gamma_r)}$$

- Forza normale

$$F_n = F_t \tan(\rho - \gamma_r)$$

- Forza resistenza all'avanzamento

$$F_a = F_n \sin(\chi - \alpha_f) \cong F_n \sin(\chi - \lambda)$$

- Forza di repulsione

$$F_r = F_n \cos(\chi - \alpha_f) \cong F_n \cos(\chi - \lambda)$$

- Forza risultante

$$R = \sqrt{F_t^2 + F_r^2 + F_a^2}$$

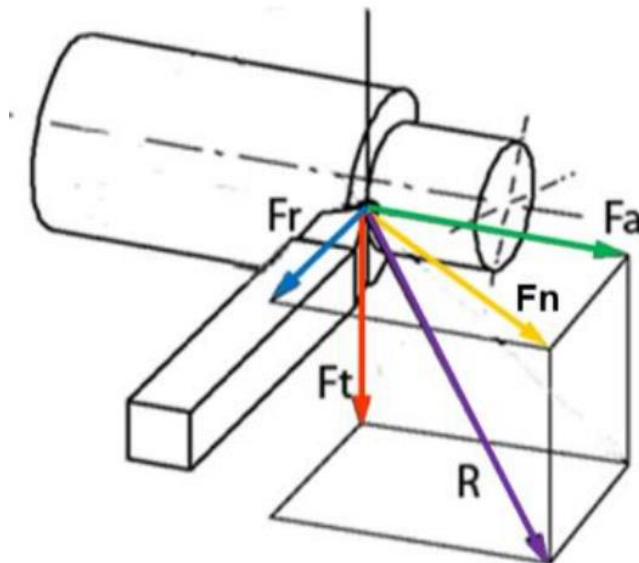


Figura 16 Forze agenti su taglio obliquo

4.2.6 Andamento della forza di taglio F_t

L'andamento caratteristico della forza di taglio in funzione della velocità di taglio è riportato nella figura seguente:

La zona AB: formazione del tagliente di riporto ($\gamma \uparrow$, $F_z \downarrow$);

La zona BC: la forza di taglio aumenta all'aumentare della velocità (prevale l'incrudimento);

La zona CD: la forza di taglio diminuisce a causa della maggiore deformabilità del materiale ad alta temperatura;

La zona D: la forza di taglio è indipendente dalla velocità.

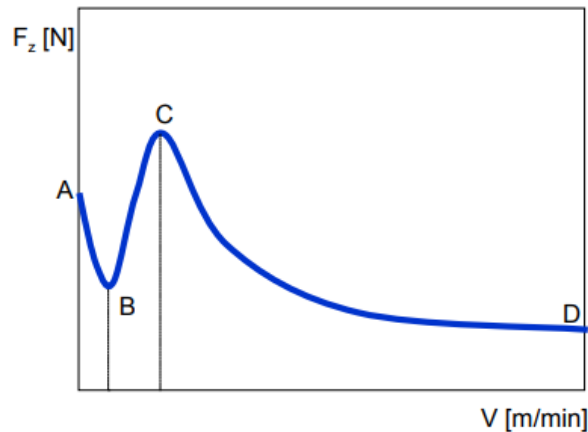


Figura 17 andamento della forza

La forza di taglio è influenzata dall'ampiezza dell'angolo di spoglia superiore secondo il seguente grafico.

La forza di taglio diminuisce all'aumentare di γ e per questo motivo, a parità di potenza della macchina ed a parità di velocità di taglio, un aumento dell'angolo di spoglia superiore corrisponde alla possibilità di asportare volumi di materiale maggiori.

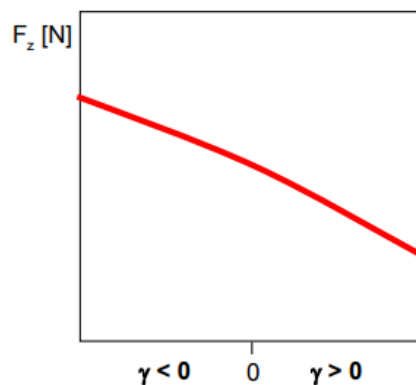


Figura 18 andamento della forza di taglio in funzione dell'angolo

Tutte le informazioni del capitolo provengono dai seguenti documenti citati nella sitografia [3] [4] [5] [6]

5 Sensorica

I metodi principali per il monitoraggio delle forze sono essenzialmente due: i sensori piezoelettrici e i trasduttori estensimetrici. Entrambi i modi permettono di misurare una forza mediante una deformazione reversibile, la quale emette un segnale elettrico d'uscita misurabile in mV/V.

5.1 Piezoelettricità

Per lo svolgimento di questo lavoro è necessario comprendere in funzionamento del principio piezoelettrico.

All'interno di un trasduttore elettrico di forza piezoelettrico è sempre presente un cristallo piezoelettrico (solitamente in quarzo), il quale produce un segnale d'uscita elettrico quando esso è sotto l'effetto di sollecitazioni meccaniche quali deformazioni o vibrazioni.

La particolare utilità di questo principio per ottenere ordini di misura estremamente precisi consiste nel fatto che il rapporto tra sollecitazione meccanica e la variazione della carica elettrica è direttamente proporzionale. In questo modo il segnale d'uscita non dipende dalla grandezza del sensore, e questo permette di realizzare sensori di dimensioni molto ridotte.

Solitamente, un sensore contiene due cristalli piezoelettrici di forma circolare tra i quali viene inserito un elettrodo in grado di captare la carica elettrica, la quale verrà trasmessa all'amplificatore tramite un cavo d'uscita.

Di seguito due esempi di sensore, entrambi captano le vibrazioni e generano un impulso elettrico in uscita:

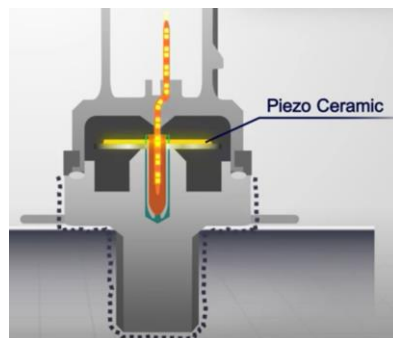


Figura 19 Accelerometro, Sensore ad un disco

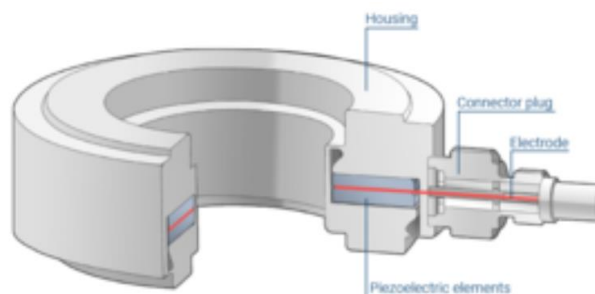


Figura 20 Cella di carico, Sensore a due dischi

La caratteristica che rende questo tipo di trasduttore ampiamente utilizzato in tutti gli ambiti è quella di coprire intervalli di misura molto grandi, in quanto è possibile misurare forze piccole e forze intense con lo stesso sensore. Questa particolarità lo rende un sensore molto versatile senza avere problemi di *range* d'applicazione. Altri fattori a favore sono la prontezza, ovvero la velocità di risposta, e la resistenza agli shock termici.

Lo svantaggio principale di questi sensori è la variazione del valore del segnale d'uscita in funzione del tempo. Questo problema sorge perché le cariche tendono ad equilibrarsi, quindi se una forza viene applicata in modo statico, con il tempo il segnale di carica tende ad aumentare. Questo effetto è più evidente quando si misurano piccole forze per un periodo prolungato, per ovviare questo problema è necessario azzerare regolarmente il sensore oppure utilizzare dei filtri passa alto.

Di seguito un esempio di variazione del segnale:

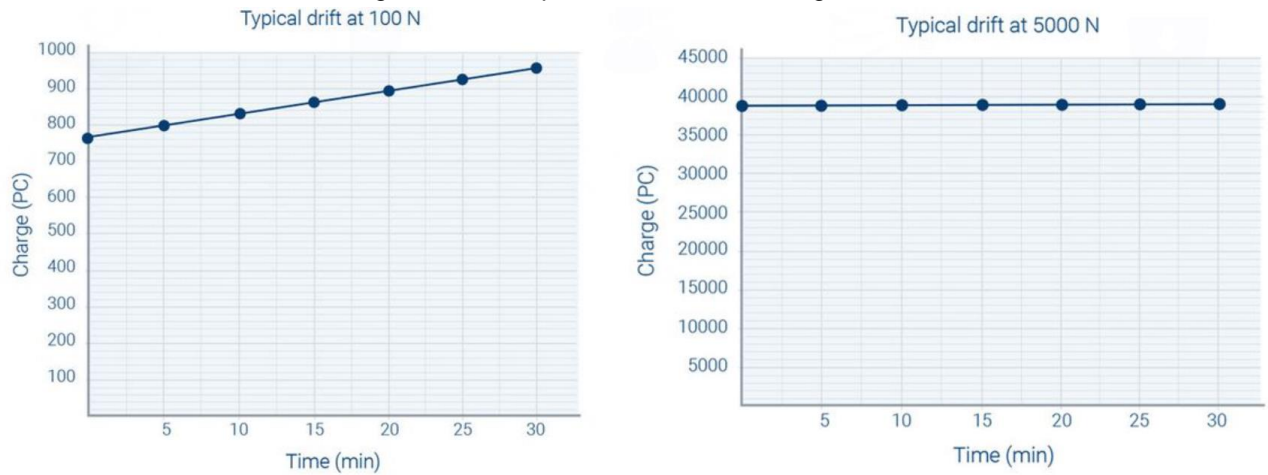


Figura 21 Variazione del segnale [7]

Un'ulteriore caratteristica importante di questi trasduttori elettrici è la necessità di eseguire una taratura per garantire la precisione in corrispondenza dell'ambiente di lavoro.

5.1.1 Sensore piezoelettrico di forza

Lo scopo di questo progetto è rilevare con precisione le forze che agiscono su un utensile da taglio, per ottenere questi risultati le celle di carico piezoelettriche sono le ideali. Questi sensori sono formati da due cristalli piezoelettrici a forma di disco, tra i quali è inserito un elettrodo a foglio.

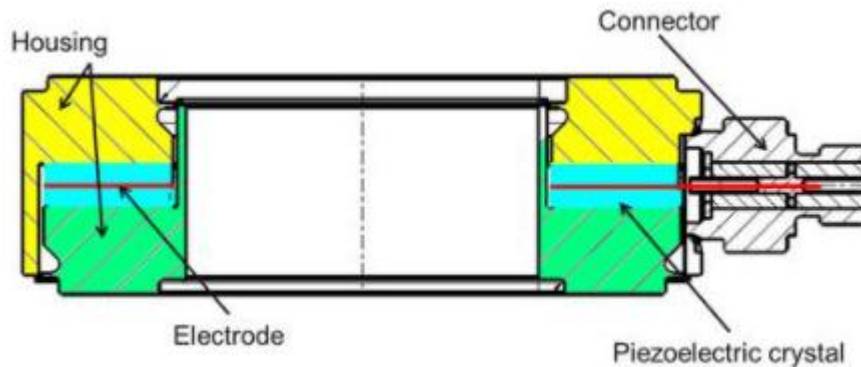


Figura 3 Sensore di forza piezoelettrico

Quando il sensore è sottoposto ad una forza, si genera una carica elettrica che riferisci il segnale in uscita, il quale viene mandato ad un amplificatore per ottenere il segnale definitivo. Come tutti i sensori piezoelettrici, la carica è proporzionale all'intensità della forza in azione. La variazione del segnale in caso di periodo prolungato della forza è di 1 [N/min]. Per quanto riguarda le deflessioni subite, essi hanno deformazioni minime offrendo una rigidità molto elevata. Questa particolarità risulta molto utile poiché garantisce alte frequenze di risonanza, rendendo favorevoli le applicazioni dinamiche o quasi statiche.

Questi sensori non sono molto sensibili per quanto riguarda il campo delle temperature, riuscendo a lavorare in condizioni tra i $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ e i $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$, e pure per l'ambiente di lavoro essendo in acciaio inossidabile. Essendo di piccole dimensioni, sono facilmente applicabili anche in luoghi difficilmente accessibile, inoltre non necessitano di nessun tipo di manutenzione.

È possibile ottenere questi trasduttori elettrici da calibrare oppure già calibrati, tramite delle rondelle di forza è essenziale eseguire una taratura nell'ambiente di lavoro. Quando si utilizzano le rondelle, è necessario che esse vengano pre-caricate al 50%, in questo modo è possibile sopportare i massimi momenti flettenti.

Le rondelle di forza calibrate possiedono un alto grado di protezione e vengono fornite pronte per il montaggio, in linea di massima è preferibile utilizzare rondelle pre-caricate oppure calibrate rispetto a quelle non calibrate. [7]

5.2 Estensimetri

Un estensimetro è una resistenza elettrica sensibile alla deformazione relativa (ε) solo nella sua direzione sensibile. La sua variazione di resistenza è proporzionale alla deformazione relativa secondo la legge:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$

- Dove R un valore di resistenza, standardizzato per 120, 350, 700, 1000 Ω
- K è il coefficiente di proporzionalità dell'estensimetro, vale circa 2

Il problema principale di utilizzare un solo estensimetro è che la variazione di resistenza è molto piccola, di conseguenza anche molto difficile da misurare.

L'estensimetro si presenta fisicamente come una piccola membrana di materiale plastico nella quale è presente un sottilissimo filo metallico di costantina. Per utilizzare questo elemento lo si pone sulla superficie da analizzare e lo si incolla con collanti istantanei, solitamente queste operazioni vengono eseguite manualmente.

Questi elementi hanno un'elevata importanza in quanto sono ampiamente utilizzati nell'ambito industriale, sia nei prodotti d'alta gamma, sia nelle fabbricazioni di massa. [8]

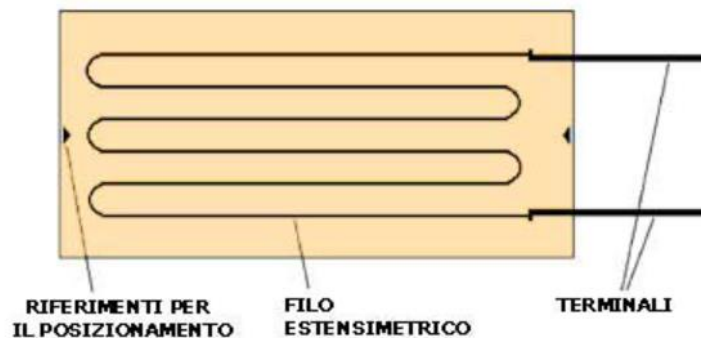


Figura 22 Rappresentazione estensimetro

5.2.1 Ponte di Wheatstone

La caratteristica principale di questa configurazione elettrica è la capacità di isolare le deformazioni di un corpo elastico in base alla loro origine.

Il ponte di Wheatstone permette di ottenere una tensione relativamente semplice da misurare considerando solo la variazione di tensione (senza misurare il valore di resistenza). Variando il valore della resistenza in alto a sinistra, si può ottenere una tensione U_A nulla. Di conseguenza è possibile calcolare il valore della resistenza sull'estensimetro. La misura della differenza di potenziale è più sensibile rispetto alla misura della resistenza. L'equazione meccanica che descrive questo comportamento è:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

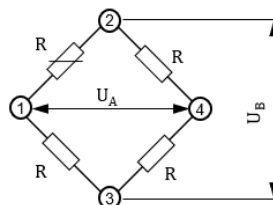


Figura 23 Schema ponte di Wheatstone

Le caratteristiche principali di questo montaggio sono:

- Rende facilmente misurabile il segnale di un estensimetro
- Permette di aumentare il segnale di misura

- Permette di ridurre l'influsso della temperatura sulla misura
- Permette di ridurre l'influsso di altre deformazioni parassite sulla misura

Esistono principalmente 3 tipi di montaggio, quello a $\frac{1}{4}$ di ponte, a $\frac{1}{2}$ ponte e a ponte intero, a dipendenza del numero di estensimetri utilizzati.

5.2.1.1 Configurazione a $\frac{1}{4}$ ponte

In questo caso viene utilizzato solo un estensimetro. L'equazione si riduce a:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot \varepsilon_1$$

Di conseguenza il segnale di misura è una funzione lineare della forza applicata. Nel caso in cui si volesse misurare una deformazione e ci fossero dei gradienti di temperatura, la deformazione termica verrebbe inglobata direttamente nella misura. Di conseguenza il segnale misurato in funzione del carico applicato risulta essere non veritiero.

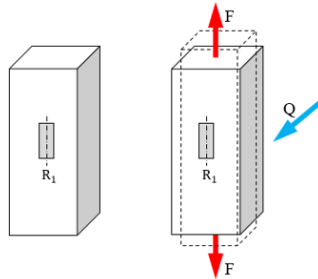


Figura 24 Configurazione a 1/4 di ponte

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 + \varepsilon_T)$$

5.2.1.2 Configurazione a $\frac{1}{2}$ ponte

Per compensare il problema della temperatura, è possibile utilizzare una configurazione a $\frac{1}{2}$ ponte. In questo caso vengono utilizzati due estensimetri, uno allineato con il carico, l'altro posto trasversalmente. Sfruttando i segni discordi dell'equazione che descrive il ponte di Wheatstone, è possibile compensare la dilatazione termica (ricordiamo che gli estensimetri 3 e 4 non sono presenti). In questo caso, però, l'estensimetro 2 misura anche la deformazione dovuta alla strizione.

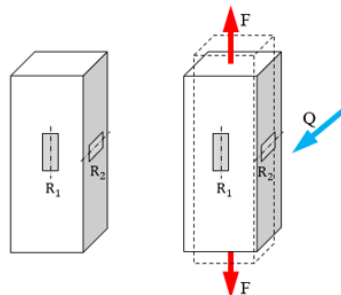


Figura 25 Configurazione a 1/2 di ponte

La rispettiva relazione risulta:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot \varepsilon_1 \cdot (1 + \nu)$$

Nonostante ciò, si ottiene un segnale di misura linearmente dipendente dalla funzione applicata. Questa configurazione non permette però di compensare le deformazioni dovute a momenti applicati alla barra (carichi parassiti). Questo fattore esterno provoca ulteriori deformazioni che verranno misurate

dell'estensimetro, allontanandoci quindi dal valore del segnale di misura relativo unicamente alla forza agente lungo il lato sensibile dell'estensimetro.

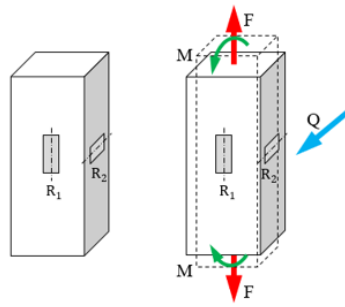


Figura 26 Configurazione a 1/2 di ponte, influenza dei momenti

La rispettiva soluzione risulta:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon + \varepsilon_M + \nu \cdot \varepsilon)$$

5.2.1.3 Configurazione a ponte intero

È la configurazione che permette di compensare i carichi parassiti (lungo la direzione sensibile dell'estensimetro) e le deformazioni termiche. In questo caso vengono utilizzati tutti e quattro gli estensimetri del ponte, posizionati a coppie parallele (una lungo l'asse del carico e una trasversale).

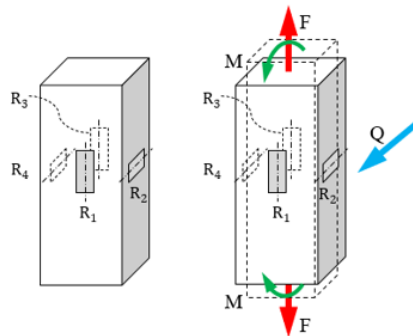


Figura 27 Configurazione a ponte intero

La rispettiva relazione risulta:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{2} \cdot \varepsilon \cdot (1 + \nu)$$

Il segnale di misura ottenuto è linearmente dipendente dalla forza applicata e non dipende dai carichi parassiti.

Riassumendo:

Configurazione	Estensimetri attivi
1/4 di ponte	1
1/2 di ponte	1 e 2
Ponte intero	1,2,3,4

Figura 28 Estensimetri attivi

Per tutte le configurazioni, il comportamento segue un andamento lineare in funzione del carico applicato. Questo perché ci troviamo nel campo elastico del materiale, quindi le deformazioni misurate non irreversibili e sono direttamente proporzionali al carico applicato.

6 Stato dell'arte

In questo capitolo si descrive il principio di funzionamento dei dinamometri, in particolar modo il monitoraggio delle forze nell'operazione di tornitura. Verranno inoltre presentati dei sistemi esistenti e reperibili in commercio.

6.1 Sistemi presenti in commercio

6.1.1 Sistema di monitoraggio Kistler

Il leader mondiale dei sistemi di monitoraggio delle forze è l'azienda Kistler. I loro dinamometri utilizzano i cristalli piezoelettrici per misurare le tre componenti ortogonali di una forza. Questi sistemi sono implementabili su varie tipologie di lavorazioni quali fresatura, tornitura e rettifica. Ogni dispositivo contiene quattro sensori di forza piezoelettrici dei quali tre misurano l'intensità della forza verso le direzioni ortogonali. I segnali d'uscita vengono trasmessi tramite un cavo connesso ad un amplificatore e successivamente in un centro di raccolta dati. I sistemi sono resistenti alle variazioni di temperatura grazie allo speciale rivestimento isolante termico integrato sulla piastra superiore, inoltre sono immuni alla corrosione e protetti dai spruzzi d'acqua e agenti di raffreddamento. [7]

Il sistema è composto da due piastre munite di fori filettati, utili per facilitare il fissaggio di supporti. Il sistema si presenta nel seguente modo:

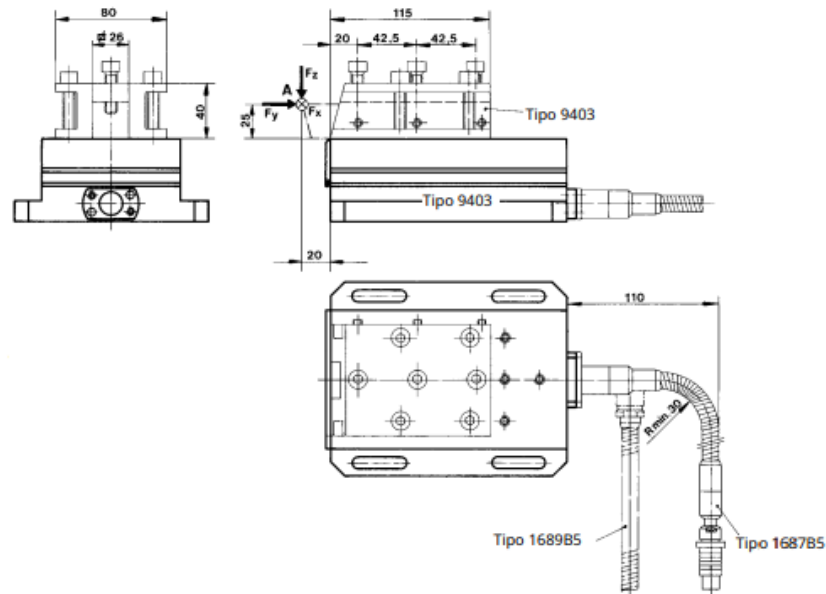


Figura 29 Schema dinamometro



Figura 30 Dinamometro Kistler

6.2 Sistemi esistenti

Il monitoraggio delle forze durante le lavorazioni è un'operazione molto richiesta negli ultimi anni, per questo motivo è facilmente reperibile nel web dei progetti in cui propongono delle possibili soluzioni. In questo sotto capitolo sono elencati due dei sistemi più diffusi.

6.2.1 Sistema ad anelli ottagonali

Il sistema ad anelli ottagonali permette di misurare e monitorare le forze agenti sull'utensile in tempo reale. L'acquisizione dei dati è completamente digitale ed è in grado di misurare separatamente le tre forze principali.

Questo dispositivo è composto principalmente da due piastre, tra le quali sono posizionati quattro anelli ottagonali provvisti di estensimetri in grado di misurare le forze in tutte le tre direzioni necessarie. Per ciascuna forza, sono presenti quattro estensimetri collegati tramite un ponte intero di Wheatstone, in questo modo è possibile compensare tutti i carichi parassiti quali deformazioni in altre direzioni e gradienti termici.

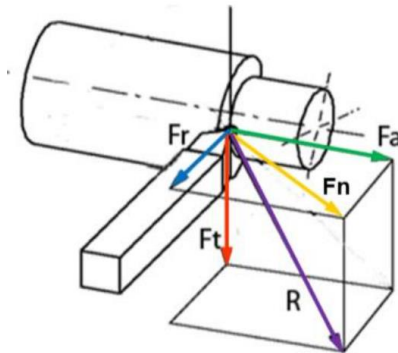


Figura 31 forze agenti sul taglio obliquo

6.2.1.1 Anello ottagonale

I parametri che influenzano la rigidità e la possibilità di deformazione di questo pezzo sono lo spessore "t" ed il raggio "r", mentre il parametro di larghezza "b" non influisce sulle misure. Per semplificare la visione delle deformazioni, si mostra l'andamento delle sollecitazioni su un cerchio teorico.

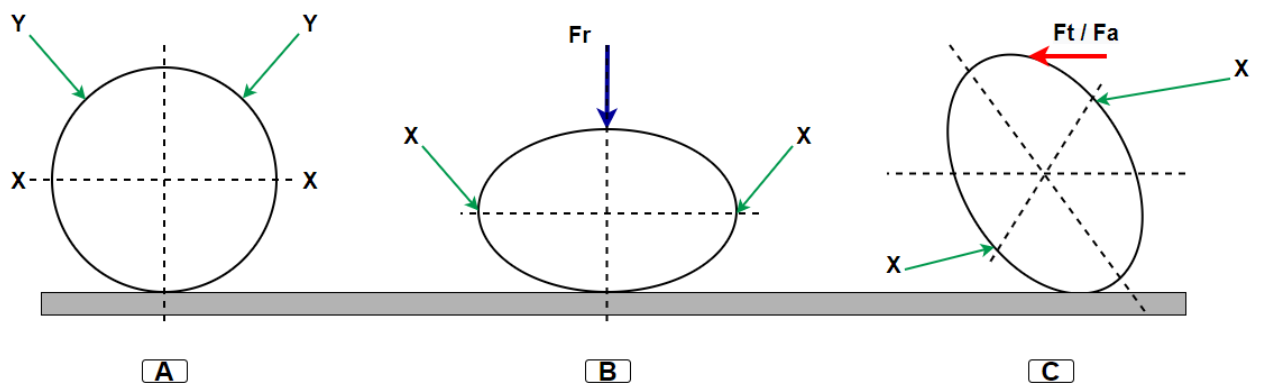


Figura 32 Deformazione dell'anello in funzione delle forze agenti

Dall'immagine sovrastante è possibile vedere l'andamento della deformazione dell'anello, nella prima situazione è presente una forza che agisce per compressione ed è possibile affermare che le deformazioni maggiori si trovino nei vertici orizzontali. Nella seconda situazione, la forza in gioco è tangente con la circonferenza e provoca una deformazione che porta la geometria ad una forma ovale, in questa situazione le deformazioni massime sono rilevate nel primo e nel terzo quadrante.

Gli estensimetri devono essere posizionati dove la concentrazione delle sollecitazioni ha un valore massimo, dunque nei punti indicati nell'immagine. Per una questione di rigidità aumentata, la forma

dell'anello è esagonale con l'ulteriore vantaggio di avere una superficie piana e rettificata sulla quale applicare l'estensimetro.

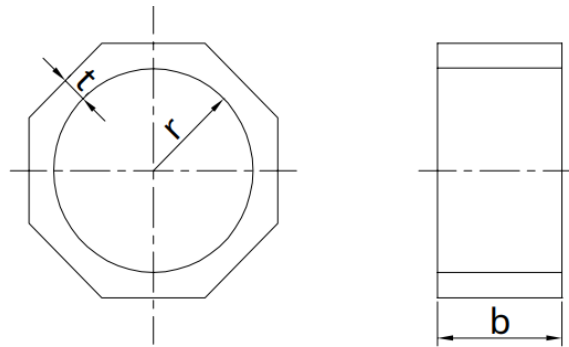


Figura 33 forma definitiva dell'anello ottagonale

Per quanto riguarda il materiale di questi componenti, essi devono essere realizzati in acciaio, poiché si necessita di elevate rigidità e non bisogna entrare in un campo di deformazione plastica.

Il dispositivo costruito non deve avere vibrazioni, in quanto esse comprometterebbero le misure interessate oltre che alla qualità delle lavorazioni. In linea di massima, il dinamometro deve avere una frequenza di risonanza almeno quattro volte maggiore rispetto a quella del tornio, così da avere la certezza di lavorare in un regime stabile.

6.2.1.2 Disposizione degli estensimetri sull'anello

Come detto in precedenza, ogni forza viene misurata tramite una deformazione elastica di quattro estensimetri, i quali sono collegati tra loro tramite un ponte di Wheatstone completo. La disposizione dei trasduttori elettrici è riportata nella seguente immagine.

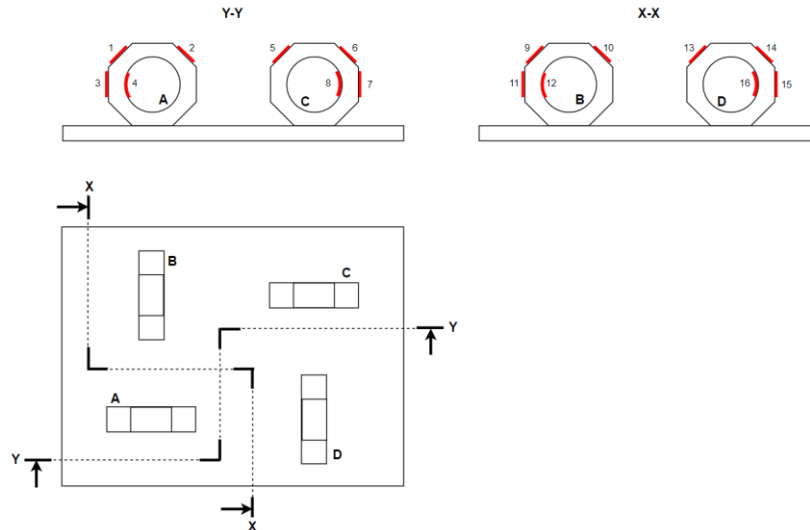


Figura 34 disposizione di anelli ed estensimetri

La Forza di compressione viene rilevata dagli estensimetri disposti sui piani verticali degli ottagoni, precisamente i trasduttori 3,7,11 e 15 (quelli esterni) sono soggetti ad una sollecitazione di trazione, mentre 4,8,12 e 16 (quelli interni) sono soggetti a sollecitazioni di compressione.

Le forze che agiscono in modo tangenziale, vengono rilevate dagli estensimetri disposti sulle facce diagonali, e rilevano la forza di resistenza all'avanzamento e la forza di taglio a dipendenza della posizione degli anelli (gli estensimetri sono disposti in direzione della forza da analizzare).

Un piccolo dettaglio rilevante è che bisogna tenere in conto che la capacità di deformazione massima di un estensimetro si aggira intorno al 5%. [9]

6.2.2 Sistema a doppio anello

Questo sistema è in grado di monitorare e misurare con un'elevata precisione le forze di taglio agenti nel taglio obliquo, ovvero la forza di repulsione, la forza di resistenza all'avanzamento e la forza di taglio, durante le operazioni di tornitura obliqua.

La struttura è composta da un utensile del tornio vincolato in un pezzo d'acciaio monolitico, al quale sono applicati degli estensimetri elettrici collegati tramite un ponte di Wheatstone. La forma geometrica del componente fabbricato è formata da una struttura a doppio anello ottagonale posizionati in modo perpendicolare l'uno con l'altro. Grazie a questa particolare disposizione è possibile monitorare separatamente le forze agenti sull'utensile in lavorazione.

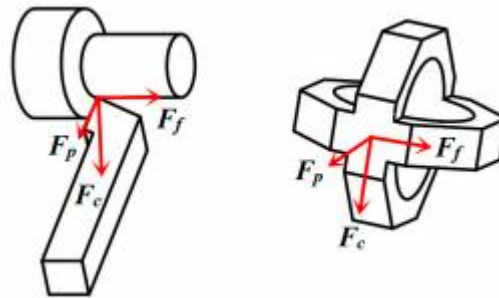


Figura 35 ripartizione delle forze

6.2.2.1 Anello ottagonale

Il principio di questo elemento è il medesimo come riportato nel paragrafo del dispositivo "Sistema ad anelli ortogonali". Gli anelli subiscono delle sollecitazioni le quali creano delle deformazioni rilevabili dagli estensimetri.

Anche in questa situazione, il cerchio viene sostituito con una forma ottagonale poiché garantisce una rigidità maggiore e dispone di superfici piane adatte per l'applicazione dei trasduttori elettrici.

I parametri che influenzano la rigidità e la possibilità di deformazione di questo pezzo sono lo spessore "t" ed il raggio "r", mentre il parametro di larghezza "b" non influisce sulle misure. Per semplificare la visione delle deformazioni, si mostra l'andamento delle sollecitazioni su un cerchio teorico.

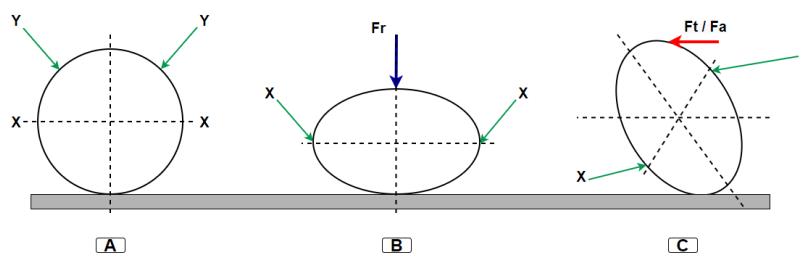


Figura 36 deformazione dell'anello in funzione delle forze agenti

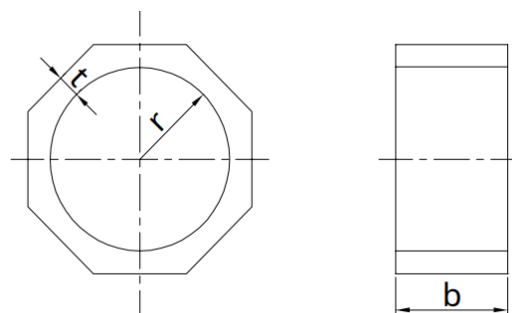
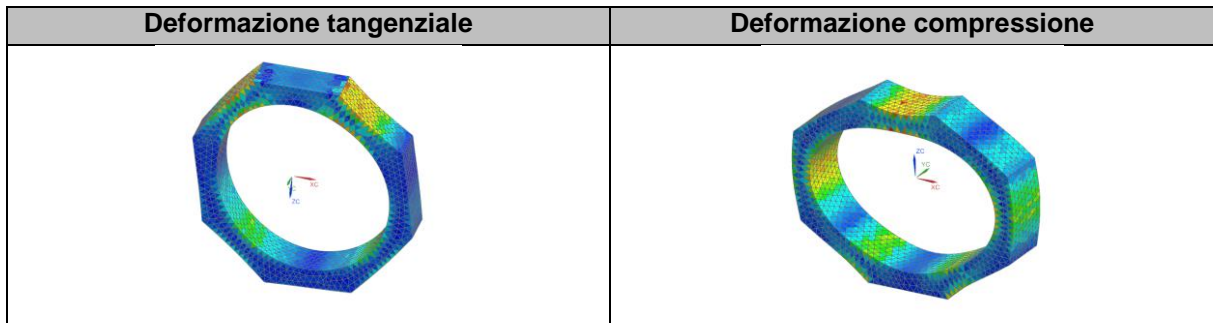


Figura 37 Forma dell'anello

Ottenere i valori delle sollecitazioni risulta essere complicato da rilevare analiticamente perché la geometria da analizzare ha una forma complessa, per questo motivo si utilizza l'analisi numerica rendendo possibile l'acquisizione di dati precisi e di ottenere la distribuzione di tali sollecitazioni.

Il materiale dell'anello è costituito in acciaio X5CrNi1810, in quanto è necessario un materiale rigido pur permettendo delle deformazioni in campo elastico. Realizzando una simulazione FEM con le dimensioni imposte: $r=30$ [mm], $t=6$ [mm] e $b=15$ [mm], è possibile visualizzare la distribuzione delle sollecitazioni durante l'applicazione delle forze.



Dai dati ottenuti è possibile affermare che le sollecitazioni aumentano in modo lineare rispetto all'intensità della forza, questo permette di utilizzare la struttura ad anello come un ottimo elemento per ottenere delle misure.

6.2.2.2 Prototipo dinamometro

L'ingegnere Yulong Zhao progettò il seguente prototipo realizzato in una struttura d'acciaio AISI1045. Il sistema di monitoraggio è composto principalmente da tre parti distinte:

- La parte 1 ha la funzione di fissare l'utensile, per eseguire questa azione sono presenti due fori filettati ai quali vengono inserite delle viti per il fissaggio.
- La parte 2 è la zona in cui è presente la struttura a doppio anello perpendicolare nella quale sono implementati gli estensimetri utilizzati per rilevare i segnali di forza.
- La parte 3 è la zona rigida e più spessa, necessaria per il fissaggio della struttura sulla torretta porta utensile.

Il dinamometro è compatibile con tutti gli utensili del tornio, poiché la geometria del gambo è la medesima.

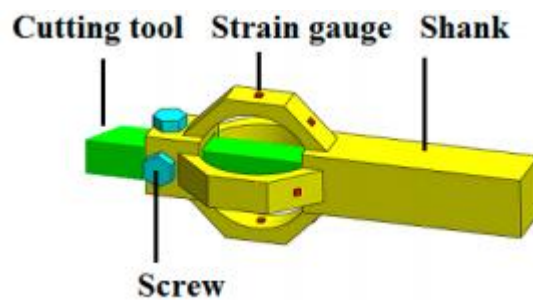


Figura 38 Rappresentazione schematica

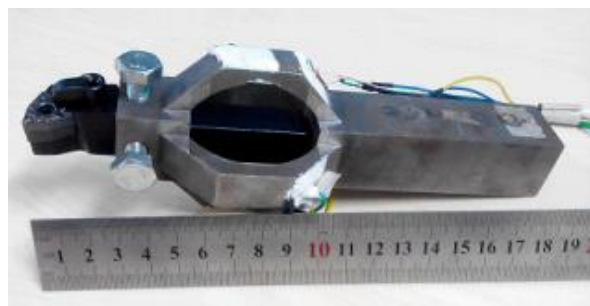


Figura 39 Prototipo

6.2.2.3 Disposizione degli estensimetri

Come detto in precedenza, gli estensimetri sono applicati sulle superfici esterne del doppio anello. Le forze presenti vengono monitorate e misurate tramite la deformazione di quattro estensimetri per direzione, i quali sono collegati tramite un ponte di Wheatstone intero. La disposizione dei trasduttori elettrici è riportata nella seguente immagine.

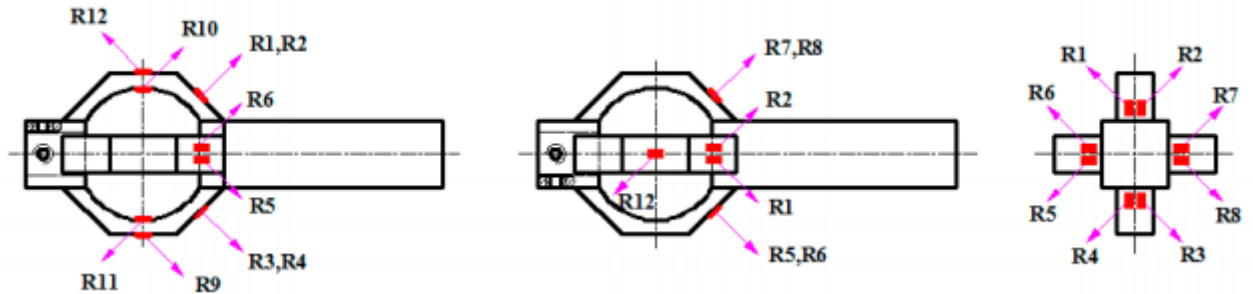


Figura 40 Disposizione degli estensimetri

La forza di taglio è misurata tramite gli estensimetri R1, R2, R3 ed R4 i quali vengono sollecitati per deformazione a flessione. Analogamente, la forza di resistenza all'avanzamento viene monitorata dalle coppie di trasduttori R5, R6, R7 ed R8 i quali anche essi subiscono una sollecitazione per deformazione a flessione.

Infine, la forza rimanente ovvero quella di repulsione (compressione) viene rilevata dagli estensimetri R9, R10, R11 ed R12. La misura di questa forza avviene in modo differente rispetto alle due precedenti, in quanto è applicato un solo estensimetro per superficie. I trasduttori implementati sulle aree esterne (R9 e R12) subiscono una sollecitazione a trazione, mentre i restanti due (R10 e R11) a compressione. [10]

6.2.2.4 Realizzazione del dispositivo

La fabbricazione del componente al quale vengono applicati gli estensimetri risulta complessa, in quanto necessita diverse tecnologie di lavorazione quali: tornitura, fresatura, elettroerosione a filo ed elettroerosione a tuffo. Un ulteriore problema risulta essere la non conformità della superficie nella zona di intersecamento dei due anelli, in quanto si creano degli spigoli interni che compromettono linearità della zona di sollecitazione.

6.3 Sistemi ideati

6.3.1 Sistema piezoelettrico triassiale

Questo particolare sistema di monitoraggio utilizza un unico sensore piezoelettrico triassiale per analizzare le forze agenti sull'utensile. Il sensore utilizzato è un elemento commerciale dell'azienda Kistler, il quale è in grado di separare e monitorare le forze triassiali agenti sull'utensile. Il bloccaggio del dinamometro è eseguito dalla torretta porta utensili del tornio.

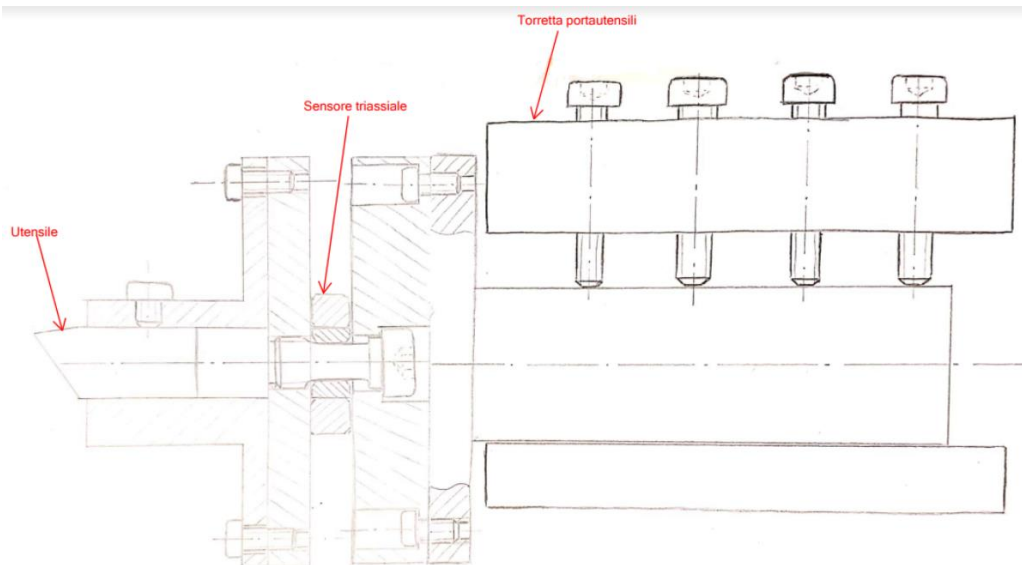


Figura 41 Sistema sensore piezoelettrico triassiale

6.3.1.1 Sensore piezoelettrico triassiale

Questo tipo di sensore è in grado di monitorare contemporaneamente le tre forze principali. Al suo interno è costituito da un assieme di tre dischi di cristallo distinti, i quali misurano le forze in tempo reale. Essendo molto compatti, essi sono particolarmente adatti nelle applicazioni con lo spazio a disposizione ridotto. [11]

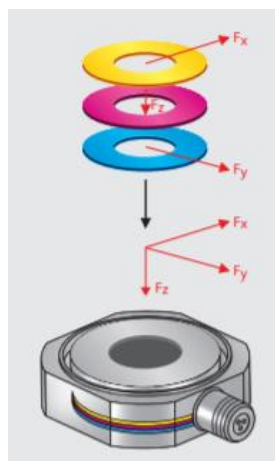


Figura 42 Sensore triassiale

6.3.2 Sistema ibrido

Questo sistema di monitoraggio utilizza contemporaneamente degli estensimetri a deformazione ed un sensore piezoelettrico a compressione. Le forze di taglio e di resistenza all'avanzamento vengono misurate dalla deformazione degli estensimetri, i quali vengono applicati lungo i blocchetti separatori. Per quanto concerne la forza di repulsione, essa viene monitorata dalla presenza del sensore piezoelettrico di compressione, il quale non è influenzato dalle forze parassite radiali. Il bloccaggio del dinamometro è eseguito dalla torretta porta utensili.

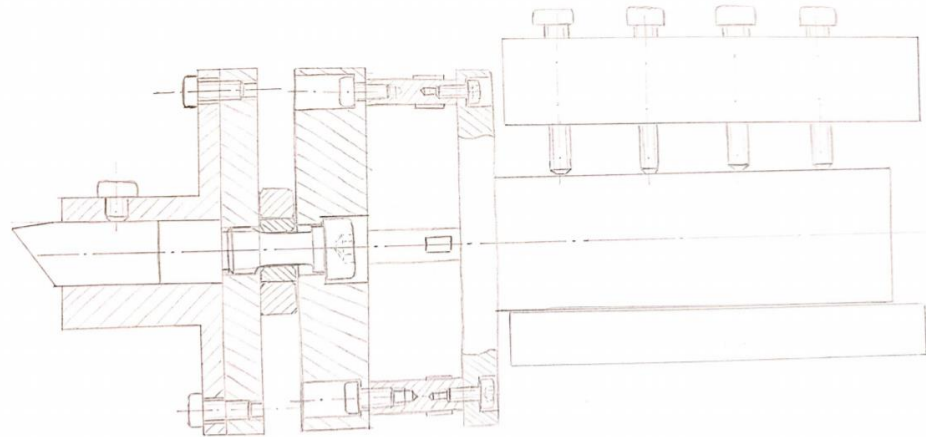


Figura 43 Sistema ibrido

Elementi presenti:

- 1 sensore piezoelettrico
- 8 estensimetri

Utilizzando questa soluzione bisogna prestare particolare attenzione al fatto che i blocchetti sui quali agiscono gli estensimetri devono cedere deformandosi per rilevarne la misura. La struttura restante deve avere meno deformazioni tangenziali possibili.

6.3.2.1 Ingombro cavi

Ogni sensore ha incorporato un cavo per poter trasmettere il segnale elettrico in un centro di monitoraggio, quindi si necessita di spazio per l'inserimento di tutti i cablaggi. Ad ogni passaggio del cavo, è presente una cava che facilita il cablaggio dei fili. Bisogna prestare particolare attenzione al cavo del sensore piezoelettrico poiché ha una sensibilità tale che anche la sola presenza di piccoli movimenti o vibrazioni modificano drasticamente il segnale d'uscita.

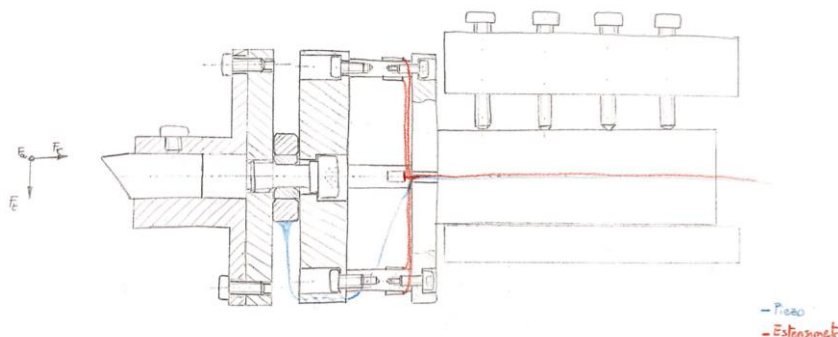


Figura 44 Ingombro cavi

6.3.3 Sistema di monitoraggio di forze biassiali

Questo sistema è in grado di monitorare unicamente la forza di resistenza all'avanzamento e la forza di taglio. Risulta molto utile quando la forza di repulsione dell'utensile è trascurabile. Le forze vengono analizzate mediante la deformazione degli estensimetri, situate sui blocchetti che distanziano l'utensile dalla torretta del tornio. Il sistema di monitoraggio di forze biassiali è più adatto ad altre tipologie di lavorazioni come la rettifica, sfacciatura o troncatura, poiché le forze agenti sono solamente due.

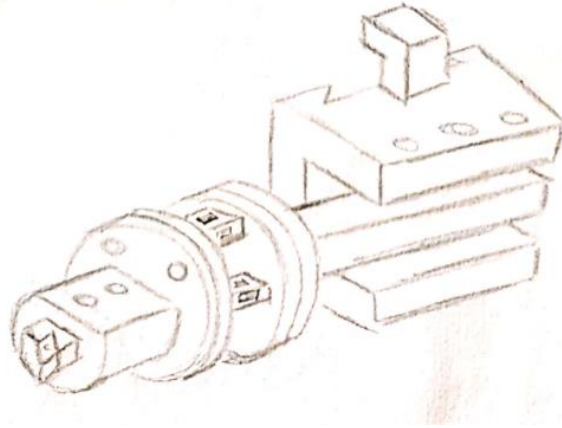


Figura 45 sistema di monitoraggio di forze biassiali

7 Cassa Morfologica

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Sensorica					
Fissaggio					
Struttura					
Bloccaggio utensile					

8 Analisi e valutazione delle varianti

Per la valutazione delle varianti è stata adottata la formula del corso del modulo “Tecniche di progettazione” svolto durante il secondo semestre.

Ogni variante è stata valutata in base a criteri scelti dal gruppo, a cui è stato attribuito un fattore di ponderazione g compreso tra 1 e 5.

Fattore di ponderazione g	Significato
5	Fondamentale importanza
4	Elevata importanza
3	Discreta importanza
2	Mediocre importanza
1	Di poca importanza

Tabella 1 Fattori di ponderazione

Per ogni variante è stata invece assegnata una nota p (compresa tra 1 e 4) che esprime il grado di soddisfazione in base ad ogni criterio.

Nota p	Significato
4	Molto buono
3	buono
2	Sufficiente
1	Insufficiente

Tabella 2 Note assegnate e significato

Il fattore di valutazione è calcolato secondo la seguente formula:

$$\text{Fattore di valutazione} = \frac{\sum(\text{fattore di ponderazione} \cdot \text{nota})}{\sum(\text{fattore di ponderazione}) \cdot \text{nota massima}}$$

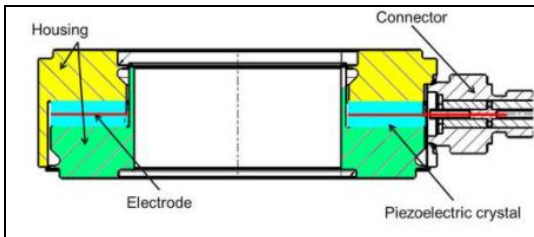
Per tutte le funzioni sono stati elencati vantaggi e svantaggi, criteri di valutazione e commento sulla soluzione scelta.

Per l'analisi di questo dispositivo sono state stabilite le seguenti funzioni:

- Sensorica
- Sistema di fissaggio
- Struttura del sistema
- Bloccaggio utensile

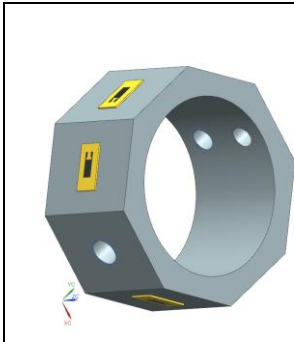
8.1 Funzione: Sensorica

Variante 1: Sensore piezoelettrico



Sensore ad elevatissima precisione che utilizza il principio della piezoelettricità per rilevare misure quali forze e pressioni. La struttura di questo componente è composta da due cristalli piezoelettrici a forma di disco, tra i quali è inserito un elettrodo a foglio.

Variante 2: Trasduttore estensimetrico



Un estensimetro è una resistenza elettrica che varia la sua resistenza in funzione della deformazione relativa. Si presenta come una piccola membrana plastica nella quale è presente un sottilissimo filo metallico di costantana. Essi vengono applicati sulle superficie del materiale per rilevarne le deformazioni. Il trasduttore elettrico è il componente con gli estensimetri implementati.

	Vantaggi	Svantaggi
Variante 1	<ul style="list-style-type: none"> Precisione Possibilità di misurare forze triassiali Elemento molto robusto Resistente ad urti e sbalzi di temperatura La carica è proporzionale all'intensità della forza Possibilità di ottenere l'elemento calibrato Linearità Ingombro 	<ul style="list-style-type: none"> Molto costoso, preventivamente un sensore unidirezionale ha un costo di 2000 Fr, mentre un sensore triassiale 5000 Fr Variazione del segnale in funzione del tempo Necessita di amplificatore di segnale Calibrazione Sensibilità cavo
Variante 2	<ul style="list-style-type: none"> Precisione Economico Applicazione semplice (incollaggio manuale) Non influenzato da temperatura e carichi parassiti se implementato con un ponte intero di Wheatstone La carica è proporzionale all'intensità della forza 	<ul style="list-style-type: none"> Per misurare forze triassiali è necessario applicare 12 estensimetri Necessita il ponte di Wheatstone Quattro estensimetri per direzione Problemi di frequenza di risonanza Necessita di amplificatore di segnale Ingombro Linearità Variazione del segnale

Tabella 3 Vantaggi – svantaggi funzione sensorica

	Variante 1			Variante 2	
		Piezoelettrico		Trasduttore Estensimetrico	
	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti
Criterio di valutazione	g	p	g*p	p	g*p
Precisione	5	3	15	4	20
Resistenza	2	4	8	2	4
Costo	4	1	4	4	16
Sensibilità a parassiti	2	3	6	4	8
Ingombro	3	4	12	2	6
Frequenza di risonanza	2	4	8	2	4
Somma dei punti	18	53		58	
Fattore di valutazione	X	0.74		0.81	

Tabella 4 valutazione funzione sensorica

Criteri di valutazione:

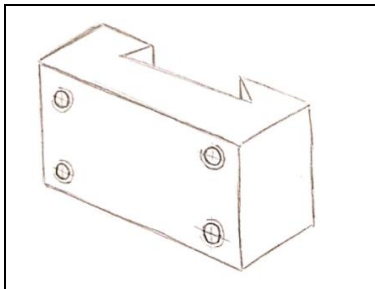
- Precisione: accuratezza dei risultati
- Resistenza: capacità di subire sollecitazioni senza danneggiamenti
- Costo: costo dell'elemento d'acquisto
- Sensibilità a parassiti: influenza di carichi esterni che compromettono il segnale d'uscita
- Ingombro: volume d'ingombro
- Frequenza di risonanza: l'elemento non deve subire il fenomeno di frequenza di risonanza

Soluzione scelta:

Come si può vedere dal confronto dei risultati, entrambe le soluzioni sono un'ottima scelta. Il motivo per cui la variante 2 risulta più adatta è il prezzo, poiché la differenza è molto evidente. Un sensore piezoelettrico di monitoraggio unidirezionale costa circa CHF 2000, mentre il prezzo di un estensimetro è di all'incirca CHF 20.

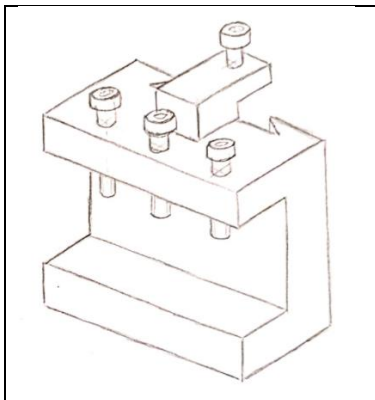
8.2 Funzione: Sistema di fissaggio

Variante 1: Coda di rondine



È composto da un blocco fresato e rettificato. Tra le lavorazioni è compresa una gola a coda di rondine la quale permette di avere un'ottima tenuta al tornio.

Variante 2: Torretta tornio



Si utilizza la torretta del tornio come appoggio principale della struttura da implementare

	Vantaggi	Svantaggi
Variante 1	<ul style="list-style-type: none"> Elevata precisione Applicazione della struttura da implementare più versatile Maggiore rigidità 	<ul style="list-style-type: none"> Costoso Lavorazione complicata, necessità di utensili appositi Trattamenti termici
Variante 2	<ul style="list-style-type: none"> Economico Non necessità di lavorazioni ausiliarie Prodotto molto utilizzato nelle industrie 	<ul style="list-style-type: none"> Versatilità della struttura da implementare minore (spazio disponibile torretta)

Tabella 5 Vantaggi – svantaggi funzione sistema di fissaggio

Criterio di valutazione	Variante 1			Variante 2	
	Peso	Coda di rondine		Torretta tornio	
		Nota	Punti	Nota	Punti
	g	p	g*p	p	g*p
Precisione	3	4	12	4	12
Versatilità	3	4	12	2	6
Rigidezza	4	3	12	3	12
Costo	5	1	5	4	20
Lavorazioni e trattamenti	2	1	2	4	8
Somma dei punti	17	43		58	
Fattore di valutazione	X	0.63		0.85	

Tabella 6 valutazione funzione sistema di fissaggio

Criteri di valutazione:

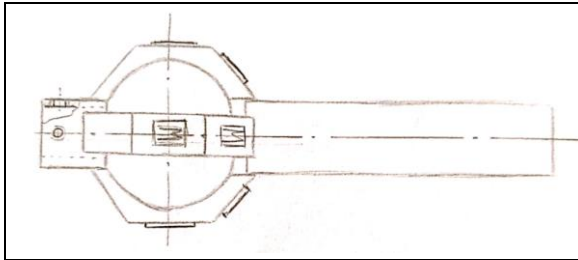
- Precisione: accuratezza dei risultati
- Versatilità: possibilità d'utilizzo di differenti tipi d'utensile
- Rigidezza: capacità di subire sollecitazioni senza deformazioni
- Costo: costo dell'elemento d'acquisto
- Lavorazioni e trattamenti: lavorazioni ausiliarie per il funzionamento dell'elemento

Soluzione scelta:

Come per la scelta precedente, il motivo per cui la variante selezionata è la seconda è dovuta al prezzo. Acquistare una torretta normalizzata costa decisamente meno che realizzare una cava a coda di rondine, questo perché è necessario utilizzare un utensile speciale non comunemente utilizzato nelle officine, inoltre non è necessario eseguire trattamenti superficiali.

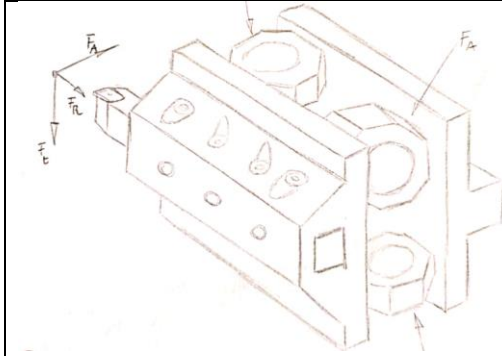
8.3 Funzione: Struttura del sistema

Variante 1: Sistema a doppio anello



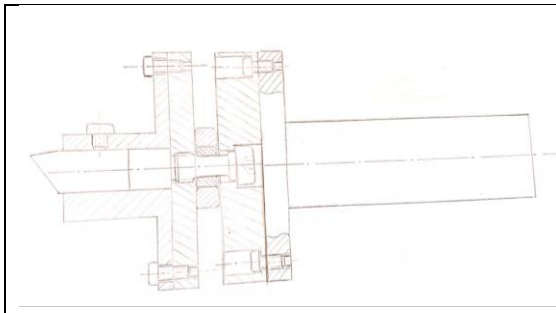
Questo sistema è composto da un pezzo monolitico in acciaio sul quale è fissato l'utensile da taglio. Ha una struttura poco ingombrante ed analizza le forze tridimensionali per merito dell'utilizzo di estensimetri.

Variante 2: Sistema ad anelli ottagonali



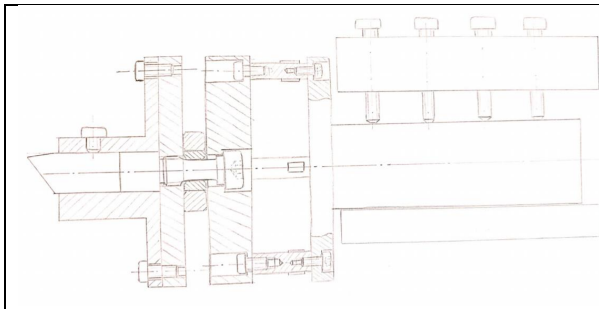
Un sistema robusto composto da due piani distanziati dalla presenza di quattro anelli ottagonali muniti di estensimetri. Questa struttura permette di analizzare e monitorare le forze tridimensionali.

Variante 3: Piezoelettrico triassiale



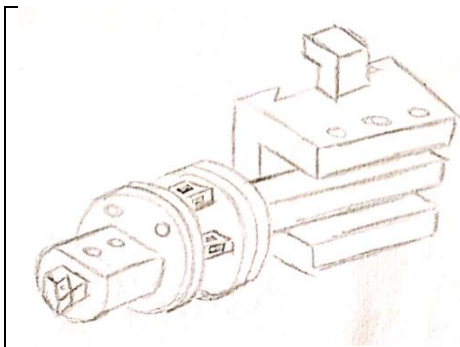
Struttura semplice e compatta che utilizza un sensore piezoelettrico tridimensionale per rilevare le forze che agiscono durante le lavorazioni.

Variante 4: Sistema ibrido



Una struttura compatta che utilizza delle coppie di estensimetri per la rilevazione delle forze di taglio e di resistenza all'avanzamento, mentre adopera un sensore piezoelettrico per monitorare la forza di repulsione.

Variante 5: Sistema di monitoraggio di forze bi-dimensionali



Questa struttura è la medesima della variante 4 "Sistema ibrido", ma con la differenza che non è in grado di analizzare la forza di repulsione dell'utensile.

	Vantaggi	Svantaggi
Variante 1	<ul style="list-style-type: none"> • Pezzo monolitico • Sicurezza nel funzionamento • Ingombro contenuto • Poca manutenzione • Possibilità di utilizzo di utensili differenti • Analisi di forze tridimensionali 	<ul style="list-style-type: none"> • Pezzo molto complesso da realizzare, necessità di lavorazioni quali elettroerosione a filo, a tuffo e rettifica. • Problemi dovuti alla frequenza di risonanza • Impossibilità di sostituire dei componenti in caso di guasto, in quanto è un pezzo unico • Costo
Variante 2	<ul style="list-style-type: none"> • Ottima resistenza alle sollecitazioni • Possibilità di utilizzo di utensili differenti • Economico • Sicurezza nel funzionamento • Analisi di forze tridimensionali • Nessun problema di risonanza 	<ul style="list-style-type: none"> • Ingombro • Molti componenti
Variante 3	<ul style="list-style-type: none"> • Resistenza ai carichi termici • Struttura compatta • Analisi di forze tridimensionali 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemi dovuti alla frequenza di risonanza • Risente di carichi parassiti se elevati • Variazione del segnale d'uscita in caso di forze statiche • Costo elevato, dovuto alla presenza di un sensore piezoelettrico triassiale
Variante 4	<ul style="list-style-type: none"> • Struttura ottima per la didattica, in quanto include estensimetri e sensore piezoelettrico. • Struttura compatta • Analisi di forze tridimensionali 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo elevato, dovuto alla presenza di un sensore piezoelettrico unidirezionale • Non presenta una sicurezza del funzionamento • Variazione del segnale d'uscita in caso di forze statiche • Problemi dovuti alla frequenza di risonanza
Variante 5	<ul style="list-style-type: none"> • Struttura semplice e compatta • Possibilità di utilizzo di utensili differenti • Poca manutenzione • Economico 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilità di misurazione delle forze unicamente in due direzioni. • Struttura adatta per lavorazioni in cui le forze sono in due direzioni come: piallatura, troncatura, rettifica.

Tabella 7 Vantaggi – svantaggi funzione struttura del sistema

Criterio di valutazione	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4		Variante 5		
	Doppio anello		Anelli ottagonali		Piezoelettrico triax		Ibrido		Bi-dimensionale		
	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti	Nota	Punti
	g	p	g*p	p	g*p	p	g*p	p	g*p	p	g*p
Fabbricazione	4	1	4	3	12	4	16	4	16	4	16
Ingombro	2	4	8	3	6	2	4	2	4	2	4
Variazione del segnale	3	3	9	3	9	3	9	2	6	3	9
Sicurezza nel funzionamento	4	3	12	4	16	3	12	2	8	2	8
Costo	4	1	4	4	16	2	8	1	4	3	12
Manutenzione	3	4	12	4	12	2	6	2	6	4	12
Versatilità	2	3	6	3	6	2	4	2	4	2	4
Frequenza di risonanza	3	2	6	3	9	2	6	2	6	2	6
Didattica	4	3	12	3	12	2	8	4	16	2	8
Fragilità	3	2	6	3	9	4	12	3	9	2	6
Precisione	5	4	20	4	20	2	10	2	10	3	15
Sistema diffuso	3	3	9	4	12	4	12	1	3	2	6
Somma dei punti	40	108	139	107	92	106					
Fattore di valutazione	X	0.68	0.87	0.67	0.58	0.66					

Tabella 8 Valutazione funzione struttura del sistema

Criteri di valutazione:

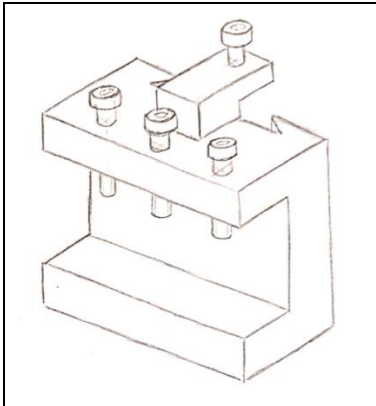
- Fabbricazione: semplicità di realizzazione dei pezzi
- Ingombro: volume d'ingombro
- Variazione del segnale: in caso statico il segnale d'uscita tende a diminuire
- Sicurezza nel funzionamento: il sistema è attualmente in uso ed è funzionante
- Costo: costo dell'elemento d'acquisto
- Manutenzione: semplicità di manutenzione
- Versatilità: possibilità d'utilizzo di differenti tipi d'utensile
- Frequenza di risonanza: l'elemento non deve subire il fenomeno di frequenza di risonanza
- Didattica: il sistema ha scopo didattico ed è utile per imparare argomenti trattati a scuola (estensimetri)
- Fragilità: capacità di subire sollecitazioni senza danneggiamenti
- Precisione: accuratezza dei risultati
- Sistema diffuso: il sistema è utilizzato attualmente nel monitoraggio delle forze

Soluzione scelta:

Dalla tabella delle valutazioni la variante 2 ha ottenuto un risultato nettamente migliore rispetto alle altre opzioni. Analizzando i risultati si può notare che ottiene la sufficienza in tutti i criteri posti. Questo sistema si basa sul sistema di monitoraggio della Kistler, con la differenza che invece di utilizzare i sensori piezoelettrici vengono utilizzati dei trasduttori elettrici ad estensimetri.

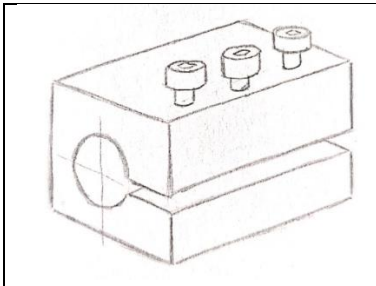
8.4 Funzione: Bloccaggio utensile

Variante 1: Bloccaggio a viti



Bloccaggio semplice e diretto nel quale tre-quattro viti agiscono direttamente sull'utensile. Questo sistema è il medesimo utilizzato dalle torrette del tornio.

Variante 2: Bloccaggio circolare



Bloccaggio su tutta la circonferenza dell'utensile. Questo sistema è molto diffuso nel bloccaggio di elementi cilindrici

	Vantaggi	Svantaggi
Variante 1	<ul style="list-style-type: none"> Economico Sistema presente nelle torrette standard per il tornio Possibilità d'inserimento di steli con grandezze differenti 	<ul style="list-style-type: none"> Area di superficie a contatto limitata
Variante 2	<ul style="list-style-type: none"> Ottima tenuta Precisione 	<ul style="list-style-type: none"> Applicabile solamente su utensili con stelo circolare, però nelle industrie sono più comunemente utilizzati steli a forma rettangolare Diametro dello stelo dell'utensile fisso

Tabella 9 Vantaggi – svantaggi funzione bloccaggio utensile

		Variante 1		Variante 2	
		A viti		Circolare	
	Peso	Nota	Punti	Nota	Punti
Criterio di valutazione	g	p	g*p	p	g*p
Costo	3	4	12	2	6
Precisione	5	2	10	4	20
Versatilità strumenti	4	4	16	1	4
Sistema standard	2	3	6	2	4
Somma dei punti	14	44		34	
Fattore di valutazione	X	0.79		0.61	

Tabella 10 valutazione funzione bloccaggio utensile

Criteri di valutazione:

- Costo: costo dell'elemento d'acquisto
- Precisione: accuratezza dei risultati
- Versatilità: possibilità d'utilizzo di differenti tipi d'utensile
- Sistema standard: elemento facilmente reperibile in commercio

Soluzione scelta:

La variante 1 è più adatta perché il tornio è di grosse dimensioni, quindi la maggioranza degli strumenti ha uno stelo rettangolare. Con questo sistema di bloccaggio è possibile fissare steli di dimensioni differenti.

9 Variante finale

Secondo i criteri della tabella delle valutazioni, la variante ad anelli ottagonali risulta nettamente migliore rispetto alle altre opzioni. In questa sezione del capitolo viene mostrata un'ulteriore variante basandosi sul sistema ad anelli, visibile nell'opzione B.

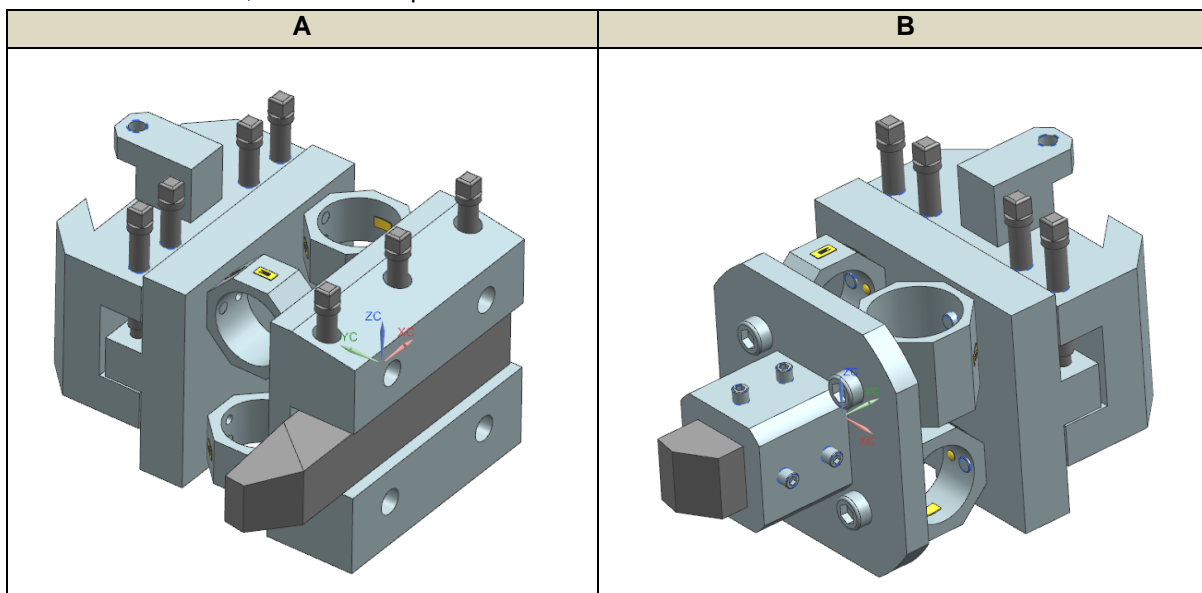


Tabella 11 Confronto tra A e B

Il principio di funzionamento di entrambe le soluzioni è il medesimo in quanto ambedue utilizzano la deformazione degli anelli ottagonali per rilevare l'intensità delle forze, la differenza sussiste nel posizionamento dell'utensile di tornitura.

Stabilire quale sia la variante migliore senza un'analisi numerica risulta difficile poiché entrambe sono soluzioni molto simili e funzionanti.

9.1 Punto d'azione delle forze

La differenza principale fra le due varianti è la posizione dell'utensile da tornio: parallelo alla torretta nella versione A e perpendicolare nella B. La risultante delle forze si concentra sull'area superiore del petto dell'utensile ed essa dipende dalla profondità di passata della sezione di truciolo asportato.

Le forze agenti sono le medesime in entrambe le situazioni in quanto i parametri dell'utensile e del macchinario sono gli stessi. Tuttavia, il momento creato dalla forza di taglio per il braccio, ovvero la distanza tra l'area d'asportazione di materiale con il fulcro di rotazione, è differente in quanto crea una deformazione diversa ai trasduttori ad estensimetri.

Per convalidare la differenza dei momenti agenti è stato creato uno schema per osservare le diversità in modo più nitido.

9.1.1 Variante A

Nella seguente immagine viene riportata in modo schematicizzato la situazione della variante A con l'applicazione della forza di taglio indicata con il colore rosso. L'immagine superiore rappresenta la vista frontale permettendo la visualizzazione del vettore della forza, mentre l'immagine sottostante raffigura la vista in pianta.

La forza di taglio è l'unica componente rappresentata in quanto essa è molto più intensa rispetto alla forza di repulsione e quella di resistenza all'avanzamento. Per questa differenza (fattore all'incirca di 10) è possibile ipotizzare la semplificazione in cui la deformazione del sistema e degli anelli è dovuta unicamente alla forza di taglio.

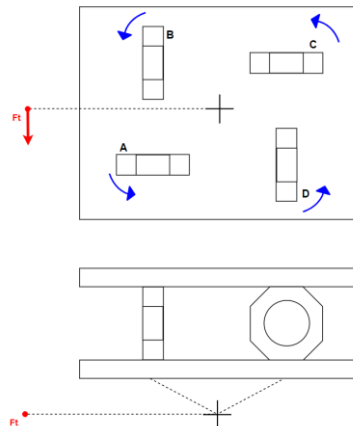


Figura 46 Schematizzazione variante A

Come riportato dall'immagine, la forza di taglio crea un momento torcente con il fulcro insediato nell'interasse dei quattro anelli. In questa situazione gli anelli subiscono una torsione che viene mostrata dalle frecce di colore blu e questa deformazione risulta essere inconveniente per analizzare le deformazioni tramite estensimetri.

9.1.2 Variante B

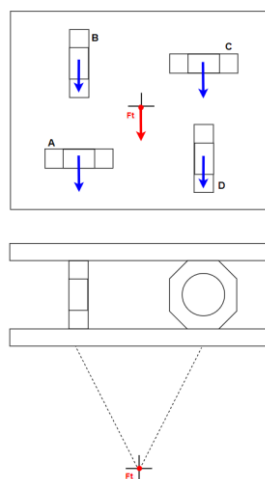


Figura 47 Schematizzazione variante B

In questa variante la forza di taglio non crea momenti torcenti sfavorevoli, ma deformazioni utili per monitorare e ottenere segnali d'uscita validi. Rispetto alla variante A, il braccio di B ha un valore maggiore, portando così una concentrazione di sollecitazioni sui piani d'appoggio degli anelli più intensa. È importante ottenere una distanza dall'applicazione contenuta, così da evitare sollecitazioni dannose o deformazioni troppo elevate.

9.1.3 Variante definitiva

La variante definitiva è la B, la decisione è stata presa in quanto le distorsioni degli anelli ottagonali necessitano una deformazione lungo la direzione del vettore della forza. Nel caso di A la presenza di carichi bidirezionali è inevitabile e per questo motivo si ottengono dei carichi parassiti indesiderati che influenzano il valore reale del segnale d'uscita.

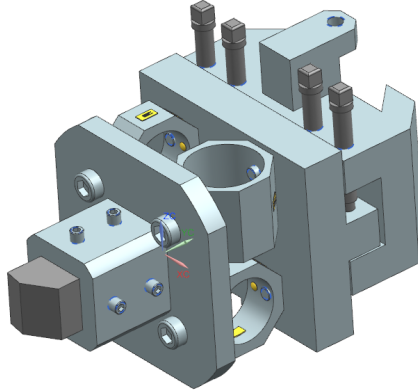


Figura 48 Variante definitiva

9.1.4 Problematiche

Il problema maggiore della variante finale è l'ingombro dei componenti perché dei pezzi troppo grandi portano ad una distanza d'applicazione delle forze troppo elevata, la quale compromette la deformazione del sistema. Per utilizzare questa soluzione è necessario trovare la giusta relazione tra resistenza e deformazioni della struttura. Le problematiche principali sono elencate nel paragrafo sottostante.

9.1.4.1 Anelli ottagonali

Gli anelli sono il fulcro del dinamometro in quanto su essi sono applicati gli estensimetri necessari per rilevare le deformazioni dovute alle forze. La geometria deve essere la più contenuta possibile, rispettando però i seguenti vincoli:

- Le facce laterali degli ottagonali devono avere lo spazio per l'applicazione di un estensimetro (lato di circa 20 mm).
- Lo spessore deve avere un valore tale da garantire la presa di filetto per le viti di tenuta.
- Lo spessore deve avere il giusto valore per permettere di ottenere una deformazione misurabile in micron, ma non subire una deformazione plastica. È fondamentale operare nel campo elastico del materiale.
- La grandezza deve rimanere contenuta, in quanto le dimensioni dell'anello contribuiscono ad un aumento della distanza d'applicazione delle forze, creando così un momento maggiormente dannoso.

9.1.4.2 Flangia utensile

La flangia è il componente che ha lo scopo di sostenere l'utensile del tornio. Anche questo elemento deve rispettare dei vincoli per non compromettere il funzionamento del sistema:

- La lunghezza totale del pezzo è fondamentale in quanto deve garantire una presa adeguata dell'utensile, ma necessita un valore tale da non creare una distanza troppo elevata dall'applicazione delle forze.
- È fondamentale avere lo spazio per l'applicazione di due viti senza testa M6 necessari per garantire la tenuta dell'utensile.
- Il materiale di cui è composta deve avere la possibilità di subire trattamenti termici, in modo specifico l'operazione di cementazione.

9.1.4.3 Base

La base è la componente fissa del dinamometro tenuta tra la morsa della torretta. Lo scopo di questo elemento è di operare come basamento per gli anelli ottagonali. I vincoli da rispettare sono i seguenti:

- La rigidità dell'elemento deve essere tale da non subire deformazioni durante il monitoraggio delle forze
- Le superfici a contatto con la torretta e con gli anelli devono essere indurite tramite cementazione

9.1.5 Semplificazione utensile

I calcoli per il rilevamento delle forze sono basati sulle formule del taglio obliquo elencate nel capitolo "Accenni di teoria".

Gli angoli dell'utensile non rispecchiano perfettamente la realtà perché nelle officine meccaniche sono sempre più utilizzati gli utensili a placchette, molto più performanti ed economici. Con questi tipi d'utensile è possibile utilizzare il medesimo stelo come base e sostituire unicamente le placchette, ottenendo un grande risparmio economico e d'ingombro. Gli angoli delle placchette sono differenti rispetto all'utensile ideale e per questo motivo le forze applicate non avranno la medesima intensità rispetto ai valori teorici.

Per questo studio l'utensile è semplificato come un pezzo monolitico in acciaio lavorato meccanicamente fino ad ottenere la geometria con i parametri angolari richiesti.

10 Spessore anelli

Nel dispositivo di monitoraggio delle forze sono presenti quattro anelli ottagonali, composti da due coppie di elementi uguali: gli anelli spessi e gli anelli sottili. La differenza di queste geometrie è dovuta alla differente intensità delle forze da analizzare in quanto ogni coppia d'anelli monitora unicamente la deformazione in unica direzione. La posizione di questi componenti di monitoraggio è garantita dalla presenza di spine cilindriche calibrate.

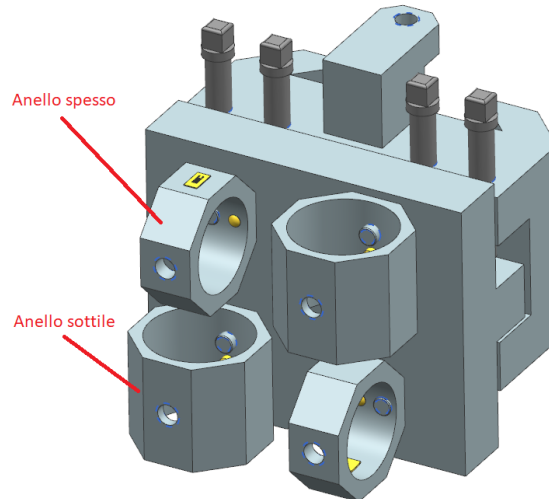


Figura 49 rappresentazione degli anelli

10.1 Anelli spessi

Questi elementi sono anelli robusti in grado di opporsi alla forza di taglio, ovvero la forza più intensa della lavorazione di tornitura permettendo una deformazione di qualche micron verso la direzione del vettore. La larghezza è necessariamente che sia ristretta, in quanto non aumenta la resistenza al taglio ma accresce la resistenza alla forza di avanzamento. Questa è una conseguenza problematica in quanto gli anelli spessi devono influire il meno possibile sulla forza d'avanzamento, dato che essa è monitorata dall'ulteriore coppia di anelli.

Le superfici d'appoggio e le aree inclinate in cui vengono posizionati gli estensimetri necessitano di un'operazione di rettifica, così da garantire una migliore precisione dell'intero sistema.

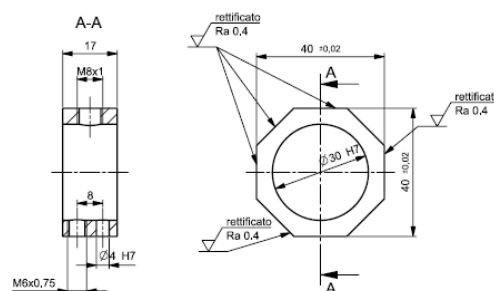


Figura 50 Geometria anello spesso

10.2 Anelli sottili

Il monitoraggio della forza di resistenza all'avanzamento è eseguito dalla coppia di anelli sottili. L'analisi di questo carico risulta più complicato rispetto a quello di taglio, perché la forza è nettamente minore (circa dieci volte inferiore). Per questo motivo gli anelli necessitano uno spessore più sottile, così da essere in grado di subire una deformazione pur con un carico poco intenso. La larghezza è superiore rispetto all'altra coppia di anelli, questo è necessario poiché la deformazione lungo la direzione della forza di taglio non deve interferire con la misura voluta. Le superfici d'appoggio e le aree inclinate in cui vengono posizionati gli estensimetri necessitano di un'operazione di rettifica, così da garantire una migliore precisione dell'intero sistema.

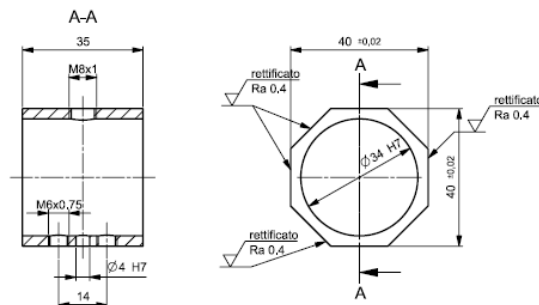


Figura 51 Geometria anello sottile

10.3 Lunghezza utensile

Un fattore molto sensibile di questo dinamometro è la distanza del punto d'applicazione delle forze rispetto alla base fissa. Come è possibile visualizzare nell'immagine sottostante, la distanza "d" dipende dalla lunghezza degli anelli, dalla lunghezza della flangia e dal posizionamento dell'utensile. L'unico parametro modificabile è la lunghezza dell'utensile (X) in quanto l'utensile è disposto in una cava rettangolare passante. Il fissaggio è garantito tramite delle viti senza testa ed è libero di oltrepassare la flangia per uno spazio massimo di 40 [mm]. È importante restare in un campo fra cui "d" abbia valore tra circa 160 e 120 [mm], così da evitare possibili deformazioni plastiche.

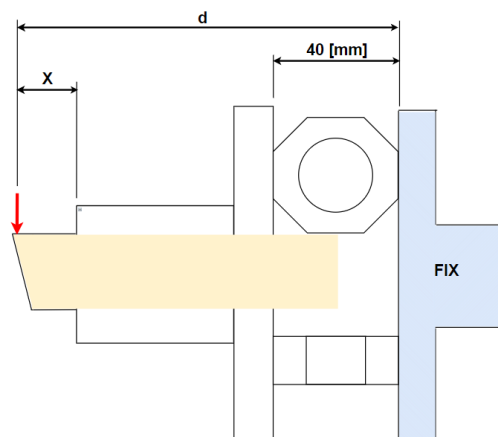


Figura 52 Distanza del punto d'applicazione

11 Scelta estensimetri

Per la scelta dell'estensimetro corretto viene utilizzato il sito disponibile del leader mondiale nella vendita di questo prodotto, ovvero l'azienda HBM. Nella sezione "*Come scegliere l'estensimetro più adatto alle tue applicazioni*" si ottengono le informazioni necessarie per la scelta del prodotto. [12]

Gli estensimetri applicati nel dinamometro progettato hanno lo scopo misurare unicamente delle deformazioni in una sola direzione, per questo motivo gli estensimetri lineari della serie L sono gli ideali.

Agendo in un ambiente di lavoro standard non sono presenti temperature estremamente elevate o rigide, quindi il materiale degli estensimetri è composto dal supporto in poliammide e della lamina della griglia di misura in costantana.

I collegamenti dei cavi sul supporto degli estensimetri è un altro fattore determinante.

Le possibilità di collegamento secondo HBM sono due: la prima è la saldatura diretta sull'estensimetro e la seconda è la connessione usando i terminali di saldatura separati da applicare direttamente sull'estensimetro.

La grandezza dell'estensimetro è un fattore determinante in quanto lo spazio totale disponibile è di 16.5 [mm]. Basandosi sul precedente vincolo gli estensimetri di lunghezza 8.5 [mm] sono un buon compromesso, lasciando un ampio margine sulle estremità semplificando l'operazione d'incollaggio. Il materiale in cui vengono misurate le deformazioni è acciaio ed essendo un materiale omogeneo è possibile applicare lunghezze della griglia ridotte.

La resistenza elettrica è disponibile nelle versioni da 120,250,700 e 1000 [Ohm]. Dato che l'estensimetro necessita di dimensioni ridotte, l'unica resistenza disponibile è la 120 [Ohm].

L'ultima considerazione è la scelta del materiale legante. Le tipologie di adesivo sono due: gli adesivi con solidificazione a freddo e gli adesivi con solidificazione a caldo. I primi possono essere applicati facilmente in tutte le situazioni senza particolari vincoli ed è possibile trovarli in componenti biadesivi o a reazione breve(super colle). Solitamente vengono applicati nei test sperimentali.

Gli adesivi con solidificazione a caldo sono gli ideali per i trasduttori che operano in ambienti in cui le temperature sono elevate e i requisiti di precisioni rigidi.

11.1 Estensimetro definitivo

Secondo la guida fornita da HBM, l'estensimetro che soddisfa ogni requisito imposto è il **1-LY1x-3/120**. [13]

I componenti della nomenclatura sono:

- **1:** Standard
- **L:** Griglia di misura lineare unidirezionale
- **Y:** Serie Y
- **1:** Connessione terminali di saldatura
- **3:** Lunghezza griglia
- **120:** Resistenza elettrica

Ingombri:

- a= 3 [mm]
- b= 1.6 [mm]
- c= 8.5 [mm]
- d= 4.5 [mm]

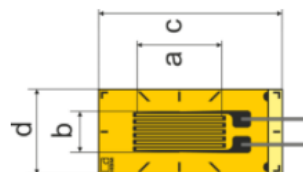


Figura 53 Geometria estensimetro

11.2 Materiale legante

Il materiale legante scelto è il 1-Z70, una supercolla a solidificazione a freddo per test sperimentali. È un adesivo cianoacrilato utilizzato principalmente per la costruzione di sensori. [14]



Figura 54 Supercolla Z70

11.3 Cavi estensimetro

Il dispositivo utilizza gli estensimetri per rilevare le deformazioni del materiale, in tutto sono presenti dodici estensimetri, ovvero quattro per il monitoraggio di ogni forza. Ognuno di questi elementi è munito di due cavi in rame saldati su di esso, necessari per l'alimentazione elettrica e per rilevare il segnale d'uscita. L'ingombro di questi cavi non è un fattore trascurabile e bisogna prevedere il posizionamento e i passaggi necessari per evitare ostacoli ed interferenze. La sensibilità dei fili è un fattore molto importante in quanto modificano il valore d'uscita se subiscono danneggiamenti o carichi termici, occorre quindi evitare che siano in contatto con liquidi o non cablati correttamente.

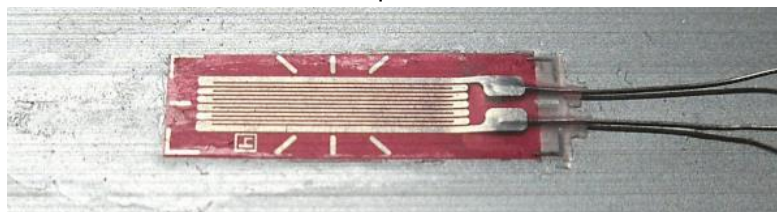


Figura 55 Esempio collegamenti estensimetro [15]

11.4 Cava base

Sul pezzo base nr. C10419-E001 è stata progettata una cava con lo scopo di garantire un passaggio dei cavi in tutta sicurezza evitando il contatto con liquidi esterni o rischi d'urto. Tutti i cavi dei vari estensimetri sono raggruppati e cablati insieme, successivamente vengono posizionati all'interno della cava così da avere un'uscita libera dal dispositivo. È necessario garantire la totale sicurezza dei cavi perché il minimo gradiente di temperatura o la minima oscillazione compromette il valore del segnale d'uscita.

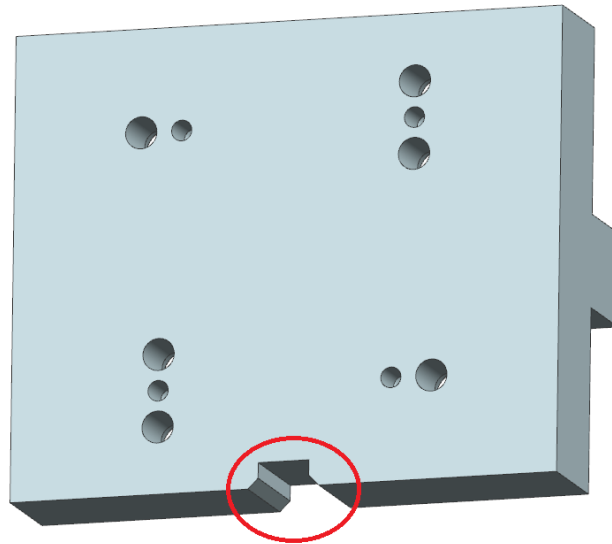


Figura 56 Cava base

12 Calcoli

12.1 Calcoli delle velocità

Il materiale da lavorare è un cilindro d'acciaio in C45E, ovvero un acciaio da bonifica con una percentuale di carbonio tra 0.47 e 0.55%. Il diametro del grezzo è di 50 [mm]. [16]

Durante le lavorazioni le velocità agiscono sempre nel campo rettilineo e non subiscono accelerazioni, per questo motivo nell'analisi delle forze si ottiene una situazione statica in quanto l'intensità delle tre forze ortogonali sarà sempre costante.

12.1.1 Velocità di taglio

La velocità di taglio è il parametro più importante da definire e dipende dai seguenti fattori:

- Tipo di materiale in lavorazione
- Qualità del materiale dell'utensile
- Tipo di lavorazione
- Sezione del truciolo asportata
- Forma e montaggio del pezzo in lavorazione (esempio cilindro pieno e albero a camme)
- Lubrificante
- Stato della macchina
- Qualità superficiale richiesta

La velocità di taglio viene fornita dai fornitori degli utensili, in quanto è un parametro che dipende da svariati fattori difficilmente prevedibili o calcolabili. Il valore dato è una media che dipende principalmente da tipo di materiale da lavorare, tipo d'utensile e tipo di lavorazione.



VELOCITÀ DI TAGLIO E AVANZAMENTO PER LA TORNITURA CON UTENSILI IN ACCIAIO SUPER RAPIDO E CON METALLO DURO - TIPO DI LUBRIFICAZIONE.

Tabella N. 61

MATERIALI DA TORNIRE	R kg mm ²	ACCIAIO SUPER RAPIDO		Designazione - ISO - qualità METALDURO								Tipo di LUBRIFICANTE Consigliabile		
				P 10	P 20 - P 30	P 40	K 20		K 10					
		Sgross.	Finire	Avanzamenti mm per giro				Sgross.	Finire	Sgross.	Finire			
				0,7-0,3-0,1	1,2-0,3-0,15									
VELOCITÀ IN METRI AL MINUTO PRIMO														
Acciaio al carbonio	50 ÷ 70	30	60	100-180-250	50-80-120	30-50	—	—	—	—	—	—	—	Olio da taglio o Emulsione
Acciaio legato bonificato	80 ÷ 110	25	35	50 - 80 - 120	30-40-60	—	—	—	—	—	—	—	—	Olio da taglio
Acciaio inossidabile	50 ÷ 85	25	45	— — —	50-80-100	30-60	—	—	—	—	—	—	—	Olio da taglio o di Trementina
Acciaio fuso	50	25	35	100-115-140	40-60-100	25-40	60	—	—	—	—	—	—	Olio da taglio o Emulsione
Ghisa grigia e dura	20 ÷ 27	20	35	— — —	— — —	—	45	80	100	120	—	—	—	Olio da taglio o aria compressa o Petrolio
Ghisa malleabile	40 ÷ 70	—	—	— — —	— — —	—	250	—	45	65	—	—	—	Olio da taglio o Emulsione
Ottone e bronzo	—	50	70	— — —	— — —	—	400	400	—	—	—	—	—	Senza lubrificante oppure Emulsione
Alluminio e leghe	—	60	130	— — —	— — —	—	80	200	—	—	—	—	—	Olio o Petrolio
Materie plastiche	—	15	20	— — —	— — —	—	80	150	—	—	—	—	—	Asciutto o aria compressa

Note: — La serie ISO «P» riguarda gli acciai. La serie ISO «K» riguarda le ghise.
 — Per utensili con placchette in METALDURO con fissaggio meccanico, le velocità possono essere aumentate del 15%.
 — I lubrificanti indicati, vanno scelti o miscelati in rapporto alla durezza e tenacità del materiale da lavorare.

Tabella 12 Velocità di taglio e d'avanzamento [17]

Essendo una lavorazione di finitura e ipotizzando l'utilizzo di un utensile in metallo duro, il valore della velocità di taglio è di circa $V_t = 80$ [m/min]. [18]

Grazie all'ultimo dato è possibile stabilire il numero di giri necessario tramite la formula:

$$n = \frac{1000 \cdot V_t}{D \cdot \pi}$$

$$n = \frac{1000 \cdot 80}{50 \cdot \pi} = 509 \text{ [giri/min]}$$

12.1.2 Velocità d'avanzamento

La velocità d'avanzamento non ha un valore esatto in quanto dipende da molteplici valori, per questo motivo i fornitori mostrano dei valori limiti entro i quali l'operatore può scegliere, in base all'esperienza ed al macchinario utilizzato.

Come indicato nella tabella precedente o come riportato nella tabella più dettagliata sottostante, l'intervallo del valore di avanzamento si aggira tra 0.05 e 0.25 [mm/giro], analizzando il materiale come acciaio duro durante una lavorazione di finitura. Il valore scelto è $a = 0.2$ [mm/giro].

	tornire esterno		tornire interno		formare	troncare
	sgrossatura	finitura	sgrossatura	finitura		
Acciaio dolce	0,1-0,4	0,05-0,2	0,05-0,3	0,05-0,2	0,02-0,05	0,05-0,1
Acciaio duro	0,1-0,4	0,05-0,25	0,05-0,3	0,05-0,2	0,02-0,05	0,05-0,1
Acciaio extraduro	0,1-0,4	0,05-0,2	0,05-0,3	0,05-0,2	0,02-0,05	0,05
Acciaio trattato	0,1-0,4	0,05-0,2	0,05-0,3	0,05-0,2	0,02-0,05	0,05
Ghisa dolce	0,1-0,8	0,05-0,2	0,05-0,6	0,05-0,2	0,02-0,05	0,05-0,1
Ghisa dura	0,1-0,6	0,05-0,25	0,05-0,5	0,05-0,2	0,02-0,05	0,02-0,05
Rame-Bronzo	0,1-0,6	0,05-0,25	0,05-0,5	0,05-0,025	0,02-0,05	0,05-0,1
Ottone	0,1-0,8	0,05-0,25	0,05-0,6	0,05-0,2	0,02-0,1	0,05-0,2
Alluminio	0,1-0,8	0,05-0,25	0,05-0,4	0,05-0,2	0,05-0,2	0,05-0,3

Tabella 13 avanzamento [18]

La velocità d'avanzamento, ovvero la velocità con cui l'utensile si sposta lungo l'asse del pezzo da lavorare si calcola secondo la formula:

$$V_a = a \cdot n$$

$$V_a = 0.2 \cdot 509 = 101.8 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] = 1.7 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$$

12.2 Rilevamento delle forze

Per svolgere le simulazioni della lavorazione di tornitura è necessario stabilire alcuni parametri:

- Materiale e diametro del grezzo
- Geometria dell'utensile
- Spessore truciolo

È stato deciso di monitorare l'operazione di finitura, in quanto è la lavorazione che stabilisce la qualità finale della superficie. [3]

Utensile

Per semplificazione l'utensile è ipotizzato come un pezzo monolitico con i taglienti lavorati.

Per lo svolgimento dei calcoli, i parametri scelti sono i seguenti:

- $\alpha = 8^\circ$
- $\beta = 65^\circ$
- $\gamma = 14^\circ$
- $\lambda = 10^\circ$
- $\kappa = 40^\circ$

Materiale

Il pezzo lavorato è un grezzo di diametro 50 [mm] in C50E (acciaio). I dati conosciuti sono i seguenti:

- $\tau_s = 380 [MPa]$
- $\mu = 0.75$

Truciolo

La profondità di passata è di 0.8 [mm], però a fine lavorazione l'altezza del truciolo è di 1.15 [mm]. Questo aumento di grandezza e volume è dovuto ad un fattore termico, in quanto il pezzo a contatto con l'utensile crea una generazione di calore che dilata il truciolo deformato. I dati conosciuti sono:

- $h = 0.8 [mm]$
- $h_c = 1.15 [mm]$

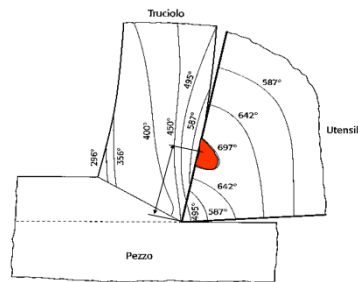


Figura 57 Generazione di calore

L'obiettivo di questa analisi è ricavare le tre forze triassiali agenti sull'utensile, ovvero F_t , F_r e F_a .

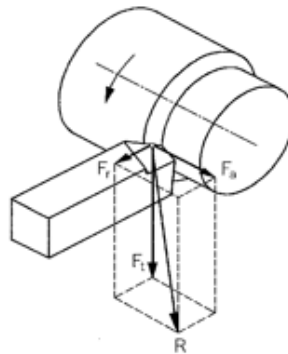


Figura 58 Forze agenti sull'utensile

Inizialmente viene ricavato il fattore di ricalcamento, ovvero il rapporto tra la grandezza del truciolo indeformato con quello deformato.

$$r_c = \frac{h}{h_c} = \frac{0.8}{1.15} = \mathbf{0.6957}$$

Successivamente si determina la sezione del truciolo indeformato, ricavandolo dalla profondità e dall'avanzamento della passata.

$$A = b \cdot h = 2 \cdot 0.8 = \mathbf{1.6 [mm^2]}$$

L'angolo d'attrito dipende dal coefficiente d'attrito del materiale.

$$\rho = \tan^{-1}(\mu) = \tan^{-1}(0.75) = \mathbf{36.87^\circ}$$

Essendo in un caso di taglio obliquo, l'angolo di spoglia reale si ottiene secondo la seguente formula.

$$\gamma_r = \sin^{-1}(\sin^2(\lambda) + \cos^2(\lambda) \cdot \sin(\gamma)) = \mathbf{15.3539^\circ}$$

L'angolo del piano di scorrimento è ricavabile nel seguente modo:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{r_c \cos(\gamma)}{1 - r_c \sin(\gamma)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.6957 \cdot \cos(15.6829^\circ)}{1 - 0.6957 \cdot \sin(15.6829^\circ)}\right) = \mathbf{39.4299^\circ}$$

Con i dati trovati in precedenza è possibile stabilire tutte le forze presenti nel taglio obliquo:

Forza di taglio

$$F_t = A\tau_s \frac{\cos(\varphi - \gamma_r)}{\sin(\varphi)\cos(\rho + \varphi - \gamma_r)} = 1.6 \cdot 380 \cdot \frac{\cos(39.5204 - 15.6892)}{\sin(39.5204) \cdot \cos(36.87 + 39.5204 - 15.6829)}$$

$$F_t = 1833.8[N]$$

Forza normale

$$F_n = F_t \cdot \tan(\rho - \gamma_r) = 1833.8 \cdot \tan(36.87 - 15.3539) = 723.0[N]$$

Forza di resistenza all'avanzamento

$$F_a = F_n \cdot \sin(\kappa - \lambda) = 723 \cdot \sin(40 - 10) = 361.5[N]$$

Forza di repulsione

$$F_r = F_n \cdot \cos(\kappa - \lambda) = 723 \cdot \cos(40 - 10) = 626.1[N]$$

Forza risultante

$$R = \sqrt{F_t^2 + F_r^2 + F_a^2} = \sqrt{1833.8^2 + 626.1^2 + 361.5^2} = 1971.2[N]$$

12.3 Calcolo potenza di tornitura

La potenza è il risultato del prodotto scalare fra forza e velocità.

$$P = \vec{F} \times \vec{V} = F_x \cdot v_x + F_y \cdot v_y + F_z \cdot v_z$$

Nella nostra situazione la v_y rappresenta la direzione della repulsione ed è essa è uguale a zero.

Inoltre un'importante considerazione è che la velocità d'avanzamento è nettamente minore rispetto a quella di taglio, per questo motivo è possibile semplificare affermando.

$$v_a \ll v_t \text{ e } F_x < F_z$$

Per questo motivo la potenza del mandrino dipende unicamente dalla forza e dalla velocità di taglio:

$$P = F_t \cdot v_t$$

$$P = 1833.8 \cdot \frac{80}{60} = 2.438 [kW]$$

La potenza massima del motore è di 11.5 [kW]. [19]

12.4 Calcolo viti

Gli anelli del sistema di monitoraggio sono collegati tramite delle viti, in questo capitolo sono presenti i calcoli necessari per confermare il corretto funzionamento di essi. Per motivi ergonomici gli elementi sono fissati con due viti M6 verso il fissaggio della torretta, mentre dalla parte opposta il fissaggio viene garantito da una vite M8. I calcoli sono svolti in parallelo, poiché le forme sono le medesime con l'unica differenza del valore dei parametri. Tutti le formule e i dati sono presi dal corso di Elementi meccanici 1 e dall'estratto di norme VSM.

Dati Vite

<u>Vite M6x0.75-8.8</u>	<u>Vite M8x1-8.8</u>
$P = 0.75 \text{ [mm]}$	$P = 1 \text{ [mm]}$
$d_2 = 5.513 \text{ [mm]}$	$d_2 = 57.35 \text{ [mm]}$
$d_3 = 5.08 \text{ [mm]}$	$d_3 = 6.733 \text{ [mm]}$
$A_s = 22 \text{ [mm}^2\text{]}$	$A_s = 39.2 \text{ [mm}^2\text{]}$
$\alpha_a = 1.6$	$\alpha_a = 1.6$
$F_{v,max} = 9010 \text{ [N]}$	$F_{v,max} = 11312 \text{ [N]}$
$F_{v,min} = \frac{9010}{1.6} = \mathbf{5631} \text{ [N]}$	$F_{v,min} = \frac{18100}{1.6} = \mathbf{11312} \text{ [N]}$
$R_s = 640 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$R_s = 640 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Con:

- P = passo del filetto
- A_s = sezione resistente
- α_a = coefficiente di serraggio con chiave dinamometrica
- d_2, d_3 = dati VSM
- $F_{v,min}$ = Forza serraggio necessaria
- $F_{v,max}$ = Forza serraggio massima
- R_s = carico unitario nominale di snervamento

12.4.1 Momento di Serraggio

Il momento di serraggio si compone in due parti distinte: la prima rappresentata dal momento M_{Testa} necessario per far strisciare il dado sulla piastra ed il momento fra vite e dado M_{Vite} (attrito sui filetti).

$$M_s = M_{Testa} + M_{Vite}$$

Momento testa

$$M_T = \mu_T \cdot F_V \cdot \frac{D_m}{2}$$

Con:

- D_m = diametro medio del dado (d_w e d_h dati VSM)
- μ_T = attrito testa
- d_w = diametro d'appoggio
- d_h = diametro foro di passaggio

Vite M6x0.75-8.8

$$d_w = 9.38 \text{ [mm]}$$

$$d_h = 6.6 \text{ [mm]}$$

$$D_m = \frac{d_w + d_h}{2} = \frac{9.38 + 6.6}{2} = 7.99 \text{ [mm]}$$

$$d_m = 5.513 \text{ [mm]}$$

$$\mu_T = 0.16$$

$$M_T = 0.16 \cdot 5.631 \cdot \frac{7.99}{2} = \mathbf{3.6 \text{ [Nm]}}$$

Vite M8x1-8.8

$$d_w = 12.33 \text{ [mm]}$$

$$d_h = 9 \text{ [mm]}$$

$$D_m = \frac{d_w + d_h}{2} = \frac{12.33 + 9}{2} = 10.655 \text{ [mm]}$$

$$d_m = 7.35 \text{ [mm]}$$

$$\mu_T = 0.16$$

$$M_T = 0.16 \cdot 11.312 \cdot \frac{10.655}{2} = \mathbf{9.65 \text{ [Nm]}}$$

Momento vite

$$M_V = F_V \cdot \frac{d_m}{2} \cdot \tan(\gamma + \rho_e)$$

Con:

- $\alpha =$ angolo apertura filetto
- $\mu_V =$ attrito vite
- $\gamma =$ angolo del filetto
- $\rho_e =$ angolo d'attrito

Vite M6x0.75-8.8

$$\alpha = 30^\circ$$

$$\mu_V = 0.16$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{P}{\pi \cdot d_m}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.75}{\pi \cdot 5.513}\right) = 2.479^\circ$$

$$\rho_e = \tan^{-1}\left(\frac{\mu_V}{\cos(\alpha)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.16}{\cos(30)}\right)$$

$$= 10.467^\circ$$

$$M_V = 5.631 \cdot \frac{5.513}{2} \cdot \tan(2.479^\circ + 10.467^\circ)$$

$$= \mathbf{3.57 \text{ [Nm]}}$$

Vite M8x1-8.8

$$\alpha = 30^\circ$$

$$\mu_V = 0.16$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{P}{\pi \cdot d_m}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\pi \cdot 7.35}\right) = 2.479^\circ$$

$$\rho_e = \tan^{-1}\left(\frac{\mu_V}{\cos(\alpha)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.16}{\cos(30)}\right)$$

$$= 10.467^\circ$$

$$M_V = 11.312 \cdot \frac{7.35}{2} \cdot \tan(2.479^\circ + 10.467^\circ)$$

$$= \mathbf{9.55 \text{ [Nm]}}$$

Momento di serraggio

$$M_s = M_{T\text{resta}} + M_{V\text{ite}}$$

Vite M6x0.75-8.8

$$M_s = 3.6 + 3.57 = \mathbf{7.17 \text{ [Nm]}}$$

Vite M8x1-8.8

$$M_s = 9.65 + 9.55 = \mathbf{19.2 \text{ [Nm]}}$$

12.4.2 Tensione

La sollecitazione normale si calcola tenendo in conto unicamente la sezione resistente della vite.

$$\sigma = \frac{F_v}{A_s}$$

Vite M6x0.75-8.8

$$\sigma = \frac{5631}{22} = 255.6 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$255.6 < 640$$

$$\sigma < R_s$$

Vite M8x1-8.8

$$\sigma = \frac{11312}{39.2} = 288.6 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$288.6 < 640$$

$$\sigma < R_s$$

12.4.3 Pressione sui filetti

La ripartizione della pressione sui filetti triangolari si calcola secondo la formula:

$$\bar{p} = \frac{F_v \cdot 34\%}{d_m \cdot \pi \cdot a_p \cdot z_u}$$

Con:

- 34% = *pressione specifica sul primo filetto (dato corso)*
- a_p = *area proiettata*
- z_u = *numero di filetti*

Caso anello sottile (monitoraggio forza di resistenza all'avanzamento)

Vite M6x0.75-8.8

$$b = 3$$

$$a_p = \frac{1}{2}(d - D_1) = \frac{1}{2}(6 - 5.188) = 0.406 \text{ [mm]}$$

$$z_u = \frac{b}{p} - 1 = \frac{3}{0.75} - 1 = 3 \text{ [filetti]}$$

Vite M8x1-8.8

$$b = 3$$

$$a_p = \frac{1}{2}(d - D_1) = \frac{1}{2}(8 - 6.917) = 0.54 \text{ [mm]}$$

$$z_u = \frac{b}{p} - 1 = \frac{3}{1} - 1 = 2 \text{ [filetti]}$$

Caso anello spesso (monitoraggio forza di taglio)

Vite M6x0.75-8.8

$$b = 5$$

$$a_p = \frac{1}{2}(d - D_1) = \frac{1}{2}(6 - 5.188) = 0.406 \text{ [mm]}$$

$$z_u = \frac{b}{p} - 1 = \frac{5}{0.75} - 1 = 5.66 \text{ [filetti]}$$

Vite M8x1-8.8

$$b = 5$$

$$a_p = \frac{1}{2}(d - D_1) = \frac{1}{2}(8 - 6.917) = 0.54 \text{ [mm]}$$

$$z_u = \frac{b}{p} - 1 = \frac{5}{1} - 1 = 4 \text{ [filetti]}$$

Pressioni filetti su anello sottile

Vite M6x0.75-8.8

$$z_u = 3$$

$$\bar{p} = \frac{5631 \cdot 34\%}{5.513 \cdot \pi \cdot 0.406 \cdot 3} = 90.75 \text{ [MPa]}$$

Vite M8x1-8.8

$$z_u = 2$$

$$\bar{p} = \frac{11312 \cdot 34\%}{7.35 \cdot \pi \cdot 0.406 \cdot 2} = 205.13 \text{ [MPa]}$$

Pressioni filetti su anello spesso

Vite M6x0.75-8.8

$$z_u = 5.66$$

$$\bar{p} = \frac{5631 \cdot 34\%}{5.513 \cdot \pi \cdot 0.406 \cdot 5.66} = 90.75 \text{ [MPa]}$$

Vite M8x1-8.8

$$z_u = 4$$

$$\bar{p} = \frac{11312 \cdot 34\%}{7.35 \cdot \pi \cdot 0.406 \cdot 4} = 102.5 \text{ [MPa]}$$

In tutte le situazioni viene rispettata la tensione ammissibile $\bar{p} < R_s$.

13 Analisi numerica FEM

La variante scelta grazie alla tabella delle valutazioni è il sistema ad anelli ottagonali. L'analisi FEM è necessaria per stabilire il corretto funzionamento e per rilevare i valori esatti di deformazione per la misura degli estensimetri. Inoltre, l'analisi è essenziale per confermare il fatto che la variante B è più idonea di A.

13.1 Variante A

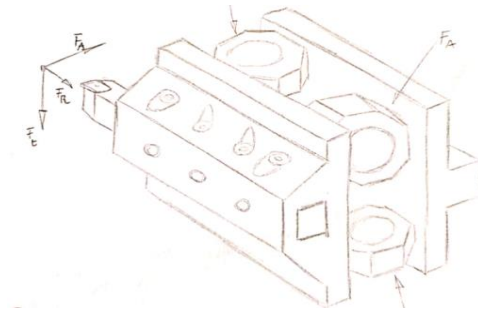


Figura 59 Variante A

Per le analisi numeriche è necessario idealizzare l'assieme del file CAD simulando solamente i componenti sottoposti a sollecitazioni e deformazioni, in questo modo si alleggerisce il file e si migliora notevolmente il tempo computazionale.

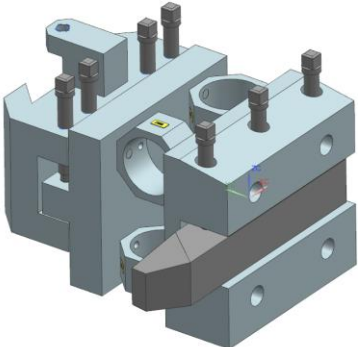
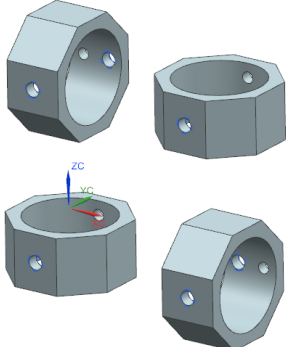
CAD	CAD idealizzato
	

Tabella 14 Confronto CAD

Inizialmente l'utensile e il pezzo di fissaggio sono stati semplificati con degli elementi RBE2, ovvero delle linee indeformabili ed infinitamente rigide, mentre il piano d'appoggio degli anelli ottagonali è stato semplicemente idealizzato con un vincolo di fissaggio inamovibile.

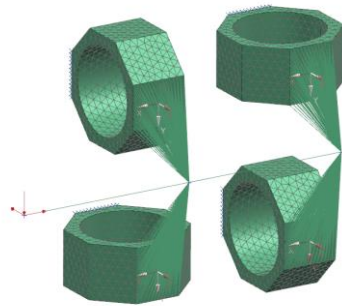


Figura 60 Sistema semplificato

Dato che gli anelli ottagonali hanno dimensioni geometriche ridotte il numero di celle è molto contenuto, è stato deciso di ottenere una simulazione più conforme alla realtà. Per questo motivo è stata creata una mesh dell'intero dispositivo comprendendo la flangia e l'utensile.

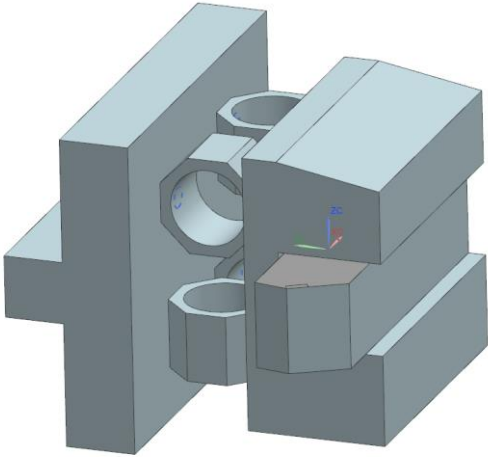
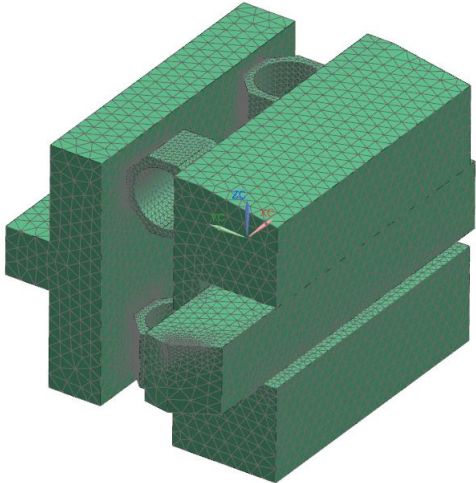
Geometria simulata	Mesh geometria
	

Tabella 15 Confronto CAD e MESH

13.1.1 Infittimenti

Le zone maggiormente interessate dalle sollecitazioni sono state infittite tramite una sovrapposizione di mesh 2D. Questa operazione viene eseguita quando è necessario ottenere dei risultati accurati nelle specifiche zone, utilizzando questo metodo si ottiene un infittimento automatico intorno alla zona d'interesse

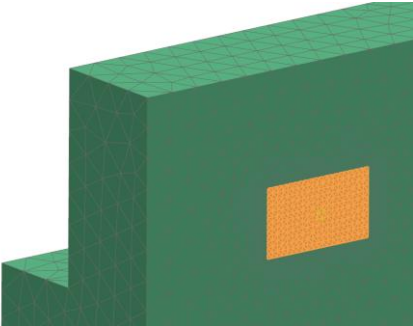
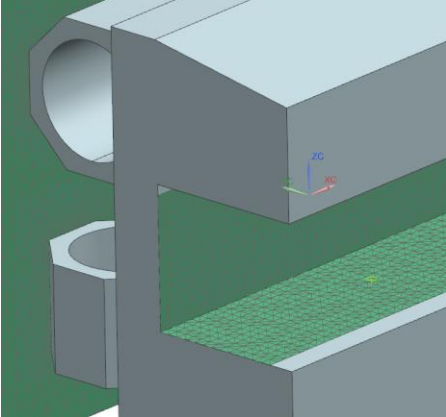
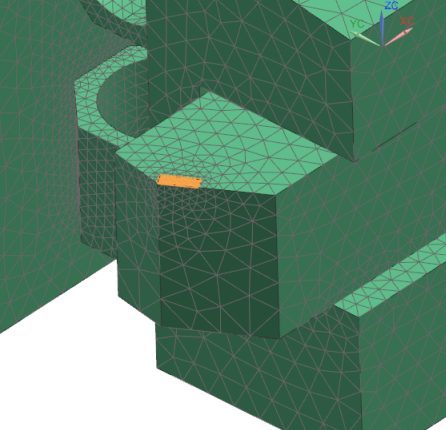
Area del dettaglio	Descrizione	Dimensione dell'elemento
	<p>Le aree di contatto tra gli anelli ottagonali e le piastre necessitano un infittimento in quanto si manifestano le sollecitazioni maggiori. I valori non devono superare il valore di snervamento del materiale.</p>	<p>1 [mm]</p>
	<p>Il contatto tra utensile e il pezzo di sostegno ha subito un infittimento, in quanto è una zona interessata a sollecitazioni intense.</p>	<p>1[mm]</p>
	<p>L'area d'applicazione delle forze nel taglio obliquo non è un dato ricavabile analiticamente, per questo motivo è necessario schematizzarla. La zona d'interesse dipende dalla profondità di passata e dalla geometria dell'utensile.</p>	<p>1[mm]</p>

Tabella 16 Infittimenti Variante A

13.1.2 Applicazione delle forze

La forza risultante nelle lavorazioni di taglio obliquo è scomponibile in tre forze distinte: la forza di taglio, la forza di repulsione e la forza di resistenza all'avanzamento.

Come detto precedentemente, l'area d'applicazione non è ricavabile analiticamente e la direzione delle forze subisce delle variazioni durante la lavorazione. Questo fenomeno avviene perché esse sono causate dalla creazione e dallo staccamento del truciolo.

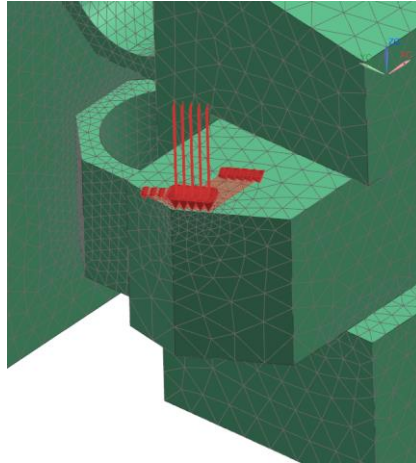


Figura 61 Applicazione delle forze

13.1.3 Risultati simulazione

I risultati ottenuti confermano quanto riportato nelle considerazioni a *capitolo 9*, ovvero che gli anelli subiscono una distorsione rotazionale. Questa torsione è un fenomeno indesiderato perché compromette la direzione delle deformazioni e crea dei segnali parassiti che compromettono il segnale d'uscita.

Eseguendo le simulazioni lineari (SOL101) e non lineari (SOL401) è stato riscontrato che i risultati sono molto simili, grazie a questo fenomeno è possibile confermare che il sistema agisce in modo lineare in quanto sono presenti unicamente piccole deformazioni e piccoli spostamenti.

Utilizzando il solutore lineare il tempo computazionale viene ridotto notevolmente consentendo una mesh più accurata nelle zone di sollecitazione maggiori e con geometrie più complesse.

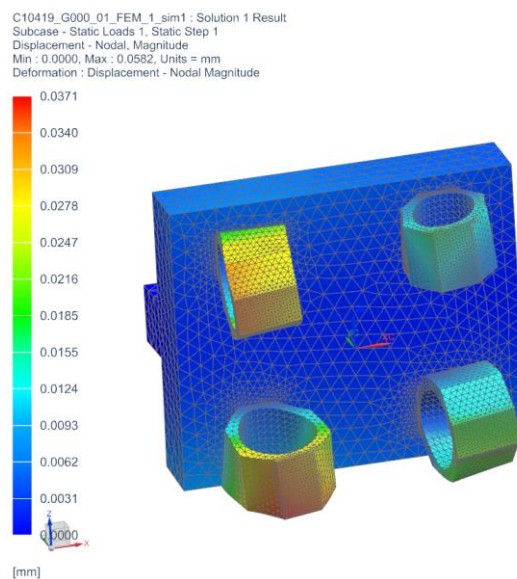


Figura 62 Distorsione anelli

13.2 Variante B

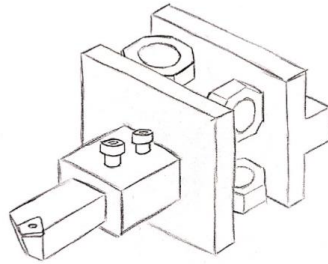


Figura 63 Variante B

Per la realizzazione della simulazione variante B, è stato preso in atto quanto ottenuto dai risultati della variante A. Per questo motivo è stata fatta la mesh dell'intero dispositivo con la stessa tipologia di infittimenti.

Durante l'idealizzazione del modello, i fori, le viti e le spine vengono semplificati in quanto ci si concentra in particolar modo sulla deformazione degli anelli. L'utensile e la flangia vengono considerati come un pezzo unico monolitico, in quanto non subiscono deformazioni importanti.

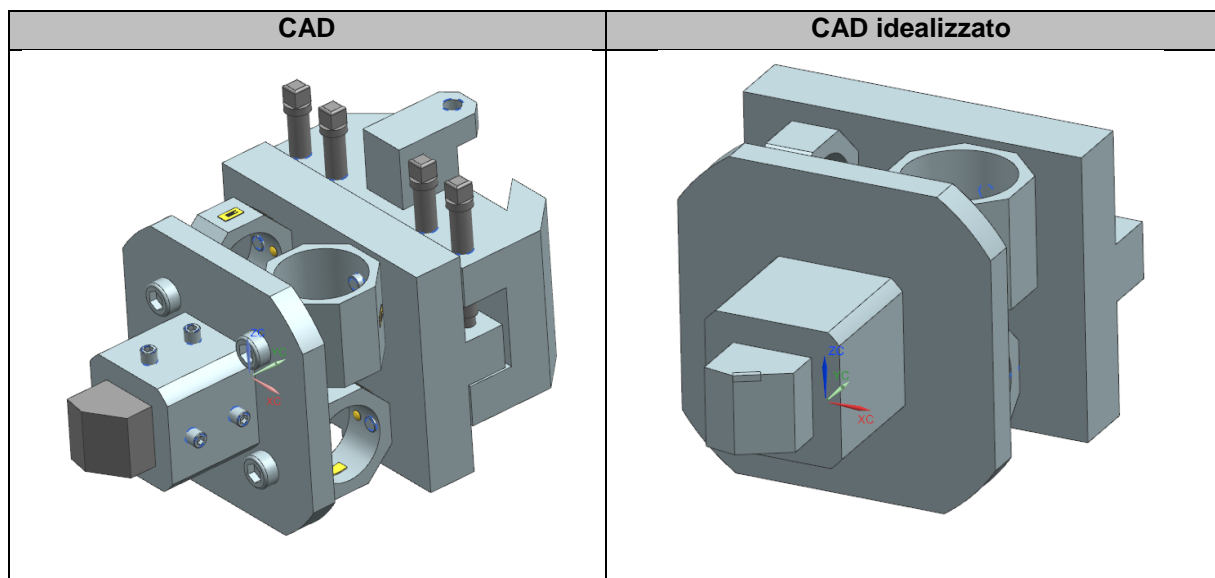


Tabella 17 Confronto CAD e idealizzato

13.2.1 FEM

Per la realizzazione della mesh sono stati utilizzati gli elementi piramidali CTETRA 10. Le dimensioni degli elementi per i vari componenti sono le seguenti:

- Flangia utensile: 3[mm]
- Base: 3[mm]
- Anelli sottili: 1[mm]
- Anelli spessi: 1[mm]

La flangia utensile e la base hanno una dimensione grossolana così da non appesantire il tempo computazionale necessario per la simulazione.

13.2.2 Infittimenti

Le zone maggiormente interessate dalle sollecitazioni sono state infittite tramite una sovrapposizione di mesh 2D. Questa operazione viene eseguita quando è necessario ottenere dei risultati accurati nelle specifiche zone, in quanto utilizzando questo metodo si ottiene un infittimento automatico intorno alla zona d'interesse.

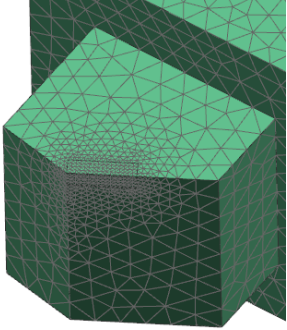
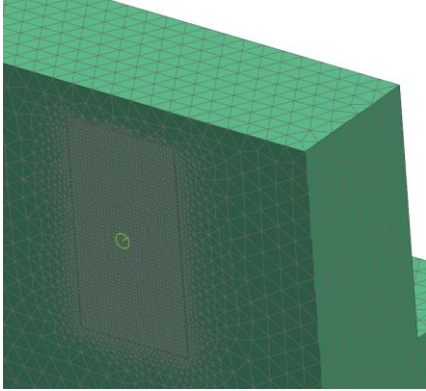
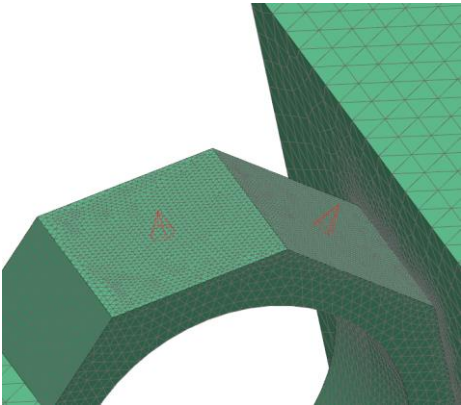
Area del dettaglio	Descrizione	Dimensione dell'elemento
	<p>L'area d'applicazione delle forze nel taglio obliquo non è un dato ricavabile analiticamente, per questo motivo è necessario schematizzarla. La zona d'interesse dipende dalla profondità di passata e dalla geometria dell'utensile.</p>	<p>0.5 [mm]</p>
	<p>Le aree di contatto tra gli anelli ottagonali e le piastre necessitano un infittimento in quanto si manifestano le sollecitazioni maggiori. I valori non devono superare il valore di snervamento del materiale.</p>	<p>0.5 [mm]</p>
	<p>Le superfici d'applicazione degli estensimetri necessitano un infittimento in quanto è l'area in cui vengono presi i dati delle misure. È importante ottenere le deformazioni più precise possibili.</p>	<p>0.5 [mm]</p>

Tabella 18 Infittimenti Variante B

13.2.3 Fissaggio

Nella parte di simulazione è necessario prestabilire le zone fisse del dispositivo. Con il comando FIX si bloccano i sei gradi di libertà della superficie o del lato interessato. In questa situazione il fissaggio è garantito sulla presa della base.

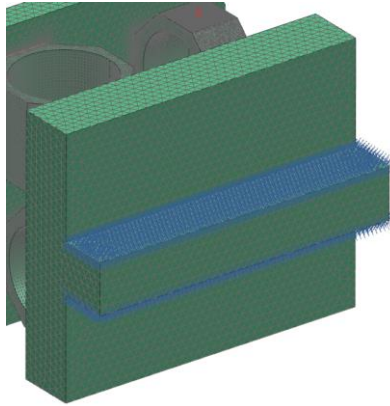


Figura 64 Fissaggio del dispositivo

13.2.4 Carichi

I carichi presenti provengono dai dati ottenuti nel capitolo “*Calcoli-rilevamento delle forze*” e sono le componenti della forza risultante del taglio obliquo. Le forze sono applicate nella mesh d’infittimento 2D dell’utensile ed hanno i seguenti valori:

Forza di taglio:	1833.8 [N]
Forza di repulsione:	626.1 [N]
Forza di resistenza all’avanzamento:	361.5[N]

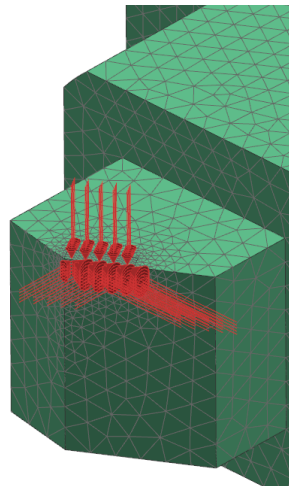


Figura 65 Carichi lavorazione

13.2.5 Analisi dei risultati

Per garantire una buona qualità della lavorazione, la punta dell'utensile può avere un valore massimo di spostamento verso il basso di 0.1[mm]. Dall'analisi si ottiene un risultato di 0.07 [mm], questo conferma che gli anelli non hanno una flessione troppo marcata.

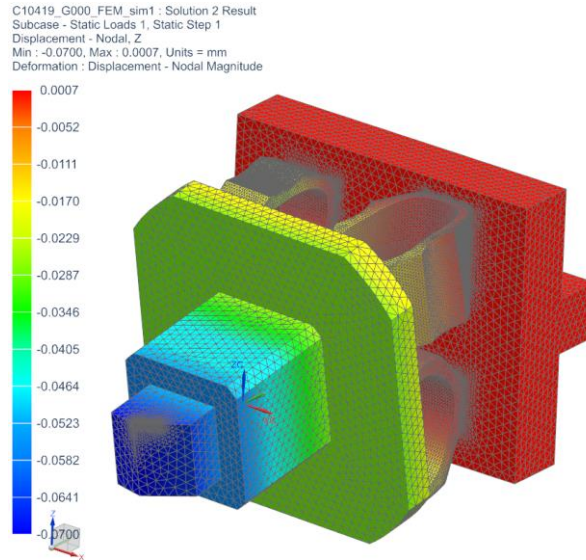


Figura 66 Spostamenti

13.2.6 Analisi tensioni

Come riportato nell'immagine, la spartizione delle sollecitazioni su tutti e quattro gli anelli è tra gli 70 e i 90 [MPa]. Questo valore conferma che la deformazione è tale da restare nel campo elastico del materiale, in quanto il valore non supera la resistenza allo snervamento di 190[MPa].

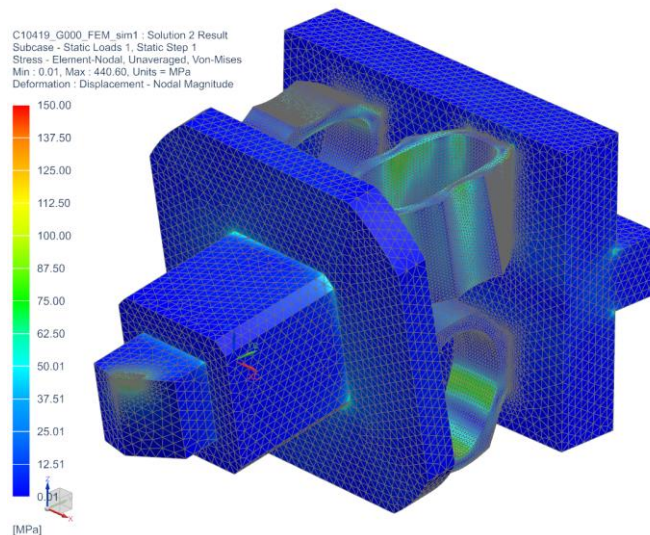


Figura 67 Distribuzione delle sollecitazioni

14 Rilevamento delle deformazioni

Il rilevamento delle deformazioni viene eseguito tramite gli estensimetri. Per il monitoraggio di tale funzione si utilizzano quattro estensimetri collegati con la configurazione a ponte di Wheatstone intero.

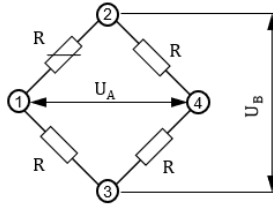


Figura 68 Schema ponte di Wheatstone

Come indicato nel capitolo 10 “Spessore degli anelli” l'intensità delle forze viene monitorata da una sola coppia di anelli ottagonali. Il valore utile di misura degli estensimetri è la deformazione e nel software per l'analisi numerica il risultato viene espresso in $[\text{mm}/\text{mm}]$. Per praticità ed avere una lettura semplificata, i risultati riportati vengono espressi in $[\frac{\mu\text{m}}{\text{mm}}]$. L'obiettivo è ottenere misure dal valore maggiore di 1 $[\frac{\mu\text{m}}{\text{mm}}]$ in tutte le direzioni, così da avere un segnale per stabilire l'intensità della forza. I risultati ottenuti provengono dalla simulazione della variante B, capitolo 13 “Variante B”.

14.1 Forza di taglio

Il monitoraggio della forza di taglio è eseguito dalla coppia di anelli spessi, i quali sono applicati nelle superfici inclinate dalla parte del fissaggio. I valori ricavati dall'analisi numerica sono i seguenti:

Forza di taglio	
	Estensimetro 1: $\varepsilon = 112.7 [\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}]$
	Estensimetro 2: $\varepsilon = -42.6 [\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}]$
	Estensimetro 3: $\varepsilon = -30 [\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}]$
	Estensimetro 4: $\varepsilon = -123 [\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}]$

Tabella 19 Valori deformazione forza di taglio

14.2 Forza di resistenza all'avanzamento

Il monitoraggio della forza di resistenza all'avanzamento è eseguito dalla coppia di anelli sottili, i quali sono applicati nelle superfici inclinate dalla parte del fissaggio. I valori ricavati dall'analisi numerica sono i seguenti:

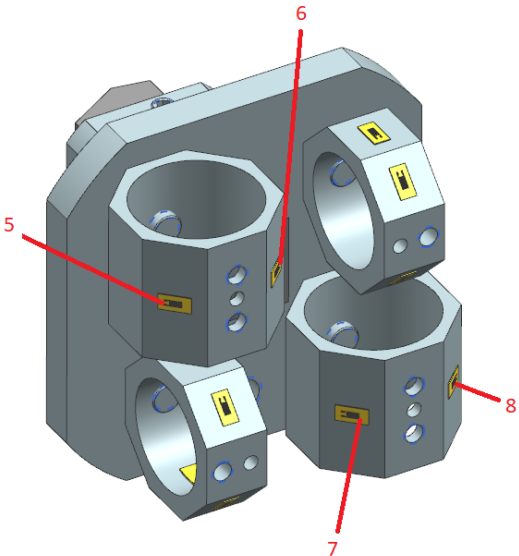
Forza di resistenza all'avanzamento	
	Estensimetro 5: $\epsilon = 155 \left[\frac{\mu m}{m} \right]$
	Estensimetro 6: $\epsilon = 132 \left[\frac{\mu m}{m} \right]$
	Estensimetro 7: $\epsilon = -180 \left[\frac{\mu m}{m} \right]$
	Estensimetro 8: $\epsilon = -126 \left[\frac{\mu m}{m} \right]$

Tabella 20 Valori deformazione forza di resistenza all'avanzamento

14.3 Forza di repulsione

Il monitoraggio della forza di repulsione è eseguito unicamente dalla coppia di anelli spessi. Il motivo per cui si utilizzano questi componenti per l'analisi è che durante la lavorazione hanno una deformazione molto più lineare rispetto alla coppia di anelli sottili. Essi non subiscono una torsione parassita per via della sezione più resistente. Le aree di applicazione sono le superfici piane più esterne e la circonferenza centrale. I valori ricavati dall'analisi numerica sono i seguenti:

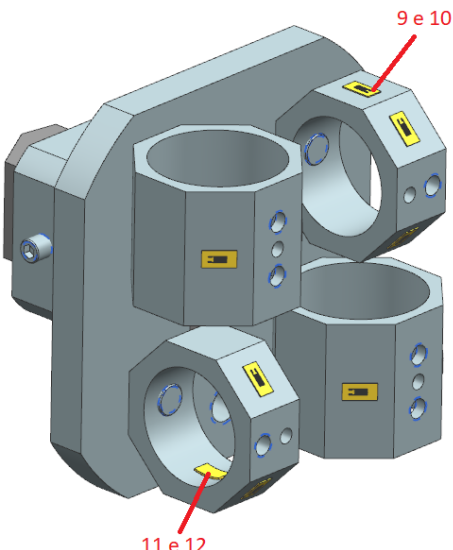
Forza di repulsione	
	Estensimetro 9: $\epsilon = -121 \left[\frac{\mu m}{m} \right]$
	Estensimetro 10: $\epsilon = 373 \left[\frac{\mu m}{m} \right]$
	Estensimetro 11: $\epsilon = 272 \left[\frac{\mu m}{m} \right]$
	Estensimetro 12: $\epsilon = -462 \left[\frac{\mu m}{m} \right]$

Tabella 21 Valori deformazione forza di repulsione

15 Tornio KD 400

Il tornio presente in officina è il KD 400, prodotto dall'azienda DMT Drehmaschinen. È un macchinario CNC industriale che dispone degli assi d'avanzamento della torretta motorizzati. Il tornio è munito di un monitor con interfaccia grafica in grado di monitorare l'esecuzione delle lavorazioni ed avere varie informazioni quali geometrie del pezzo e utensile oppure il tempo di lavorazione. In allegato è presente la scheda tecnica del macchinario. [20]

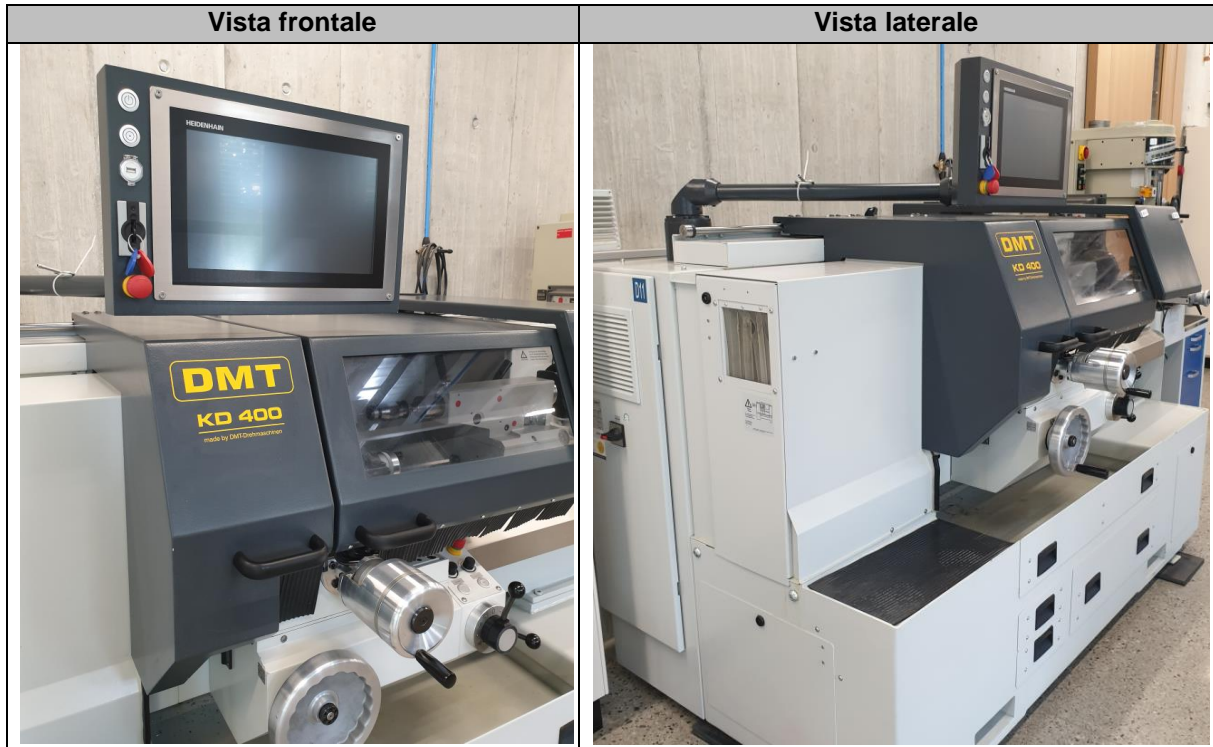


Tabella 22 Viste tornio

Working range	
Perimeter diameter above bed	420 mm
Perimeter diameter above cross slide	210 mm
Centre distance	1000
Headstock	
Spindle nose DIN 55027	Size 6
Spindle borehole	64 mm
stepless speed range	1 - 4000 rpm
alternatively	
Spindle nose DIN 55026	Size A6
Spindle borehole	82 mm
stepless speed range	1 - 3000 rpm
Main drive	
Digital AC-Motor (S6=40%ED)	11.5 kW
Direct transmission from engine to spindle	
Tailstock	
Quill diameter	60 mm
Quill travel	140 mm
Quill internal taper	MK 4
Screen	Touchscreen 12"
Weight	approx. 2100 kg
The technical data are provisional and subject to change.	

Figura 69 Dati tornio [20]

16 Materiale

Gli elementi cardine del dinamometro sono gli anelli ottagonali perché la deformazione di essi garantisce il corretto funzionamento del dispositivo. È necessario realizzare questi pezzi in un tipo di materiale che rispecchi le seguenti caratteristiche:

- Gli anelli ottagonali devono avere una buona duttilità così da poter ottenere una flessione del materiale senza entrare nel campo plastico (non è ammissibile utilizzare materiali fragili);
- Essendo degli elementi utilizzati in campo di misura, è importante che non si logorino nel tempo ossidandosi.
- Pur dovendo subire una flessione, gli anelli devono essere costruiti in un materiale resistente in quanto le forze di taglio durante le lavorazioni di tornitura hanno un'intensità elevata.
- Il materiale deve avere una frequenza propria elevata perché non si devono verificare casi in cui il dispositivo entri in una zona di frequenza di risonanza.
- Le superfici devono avere la possibilità di subire trattamenti termici e lavorazioni di rettifica in quanto si esige un'eccellente qualità sulle aree di applicazioni degli estensimetri.

Un materiale in grado di soddisfare i requisiti sopracitati è un acciaio inossidabile perché permette di subire delle flessioni pur avendo una resistenza allo snervamento elevata. Per quanto riguarda la resistenza alla corrosione e al logoramento è il materiale ideale in quanto è in grado di operare a contatto con fluidi di taglio senza subire danneggiamenti. La frequenza propria degli acciai è molto elevata ed è una caratteristica ideale per questo tipo di applicazione. Le superfici di contatto degli estensimetri è possibile rettificarle garantendo un'eccellente applicazione di essi.

L'acciaio inossidabile selezionato è il X5CrNi1810 (AISI 304) in quanto è comunemente utilizzato nelle costruzioni meccaniche ed è facilmente reperibile in commercio, oltre ad avere un prezzo contenuto.

16.1 X5CrNi18-10

Denominato con la nomenclatura americana AISI 304 è un acciaio inossidabile austenitico. La sua composizione chimica è composta da 18% di cromo e l'8% di nichel, mentre la sua densità è di 7,9 kg/dm³

La percentuale di carbonio si aggira intorno allo 0.070%.

Questo materiale rientra nel gruppo d'acciai A2, ovvero gli acciai inossidabili per bulloneria composti da leghe di cromo e nichel.

Ha una buona lavorabilità alle macchine utensili permettendo di ottenere superfici lucide perfette per l'applicazione di estensimetri ed è utilizzabile in un ampio range di misure compreso tra i -50°C e i 600°C. [21]

L'AISI 304 è l'acciaio inossidabile più utilizzato in commercio, ed essendo non magnetico è possibile utilizzarlo in ambienti dove sono presenti campi elettromagnetici

17 Trattamenti termici

Per la realizzazione del dinamometro è essenziale applicare dei trattamenti superficiali sulle superfici a contatto tra i componenti. Il dispositivo essendo composto unicamente da pezzi in acciaio X5CrNi1810 (AISI 304), per questo motivo il trattamento ideale risulta la cementazione superficiale.

17.1 Tempra totale o cementazione a zone

I componenti che necessitano un trattamento termico sono la flangia utensile e la base. La flangia perché è a diretto contatto con gli anelli mentre la base per il medesimo motivo inoltre, deve garantire una tenuta maggiore sulla torretta. Le opzioni di trattamento sono principalmente due: la tempra totale e la cementazione.

Tempra

La tempra è un trattamento termico che consiste nel raffreddamento istantaneo di un acciaio dopo averlo riscaldato fino alla temperatura di austenizzazione. Dopo il brusco calo di temperatura causato dall'inserimento del pezzo in un liquido di raffreddamento (solitamente olio) l'acciaio si trasforma in una struttura martensitica. La tempra penetra all'interno del materiale indurendo di molto il pezzo ma diminuendo drasticamente la resilienza rendendolo vulnerabile a rotture dovute da urti. Questo trattamento è applicabile unicamente sugli acciai con tenore di carbonio superiore allo 0.2% e in seguito alla lavorazione è preferibile eseguire un trattamento termico di rinvenimento, necessario per scaricare le tensioni interne del materiale. [22]

Cementazione

Il trattamento di cementazione permette di ottenere una durezza superficiale maggiore senza compromettere la tenacità del materiale in quanto l'interno rimane inalterato. Il processo consiste nel introdurre carbonio durante il riscaldamento del materiale per un tempo determinato. Il vantaggio di questo trattamento è la possibilità di indurire le superfici interessate e non la totalità del pezzo. Le aree trattate risultano dure e resistenti all'usura mantenendo un nucleo tenace. La profondità del trattamento è molto variabile, permettendo una superficie di pochi micron oppure di diversi millimetri. [23]

17.2 Rischio rottura

I trattamenti termici aumentano la durezza superficiale esterna ma riducono la resilienza del componente, aumentando il rischio di rottura nelle zone più sollecitate come riportato nell'immagine sottostante.

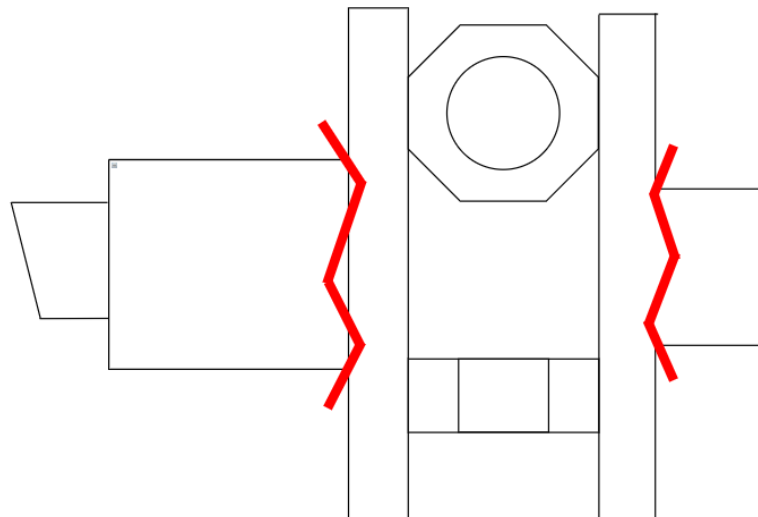


Figura 70 Zona a rischio rottura

Il rischio delle rotture si stabilisce in zone in cui la durezza superficiale non è richiesta, per questo motivo il trattamento preferibile è quello di cementazione. Con la cementazione si induriscono solo le aree necessarie per il corretto funzionamento del dispositivo non trattando il resto delle superfici, in questo modo si garantisce la tenacità. Nella figura sottostante sono indicate le zone trattate termicamente.

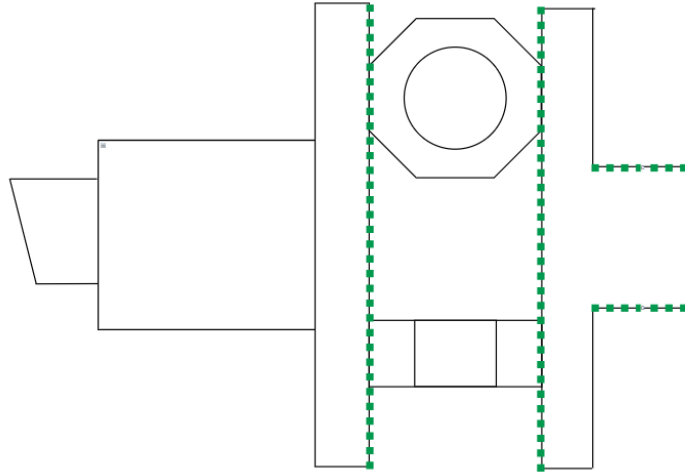


Figura 71 Aree cementate

17.3 Problematica flangia

La flangia è uno dei componenti che necessita un trattamento termico superficiale. Questo pezzo richiede una lavorazione tramite elettroerosione a tuffo, indispensabile per la realizzazione di una cava rettangolare precisa utilizzata per l'inserimento dell'utensile di tornitura. Come mostrato nel disegno tecnico sottostante, è necessario garantire una tolleranza geometrica di perpendicolarità tra il piano d'appoggio dell'utensile e il lato a contatto con gli anelli. Il problema risulta essere che garantire questo vincolo geometrico è possibile unicamente se il trattamento termico viene eseguito prima della lavorazione a elettroerosione. Il motivo è che la cementazione distorce la superficie del piano rendendo necessaria una lavorazione di rettifica per riportare la planarità dell'area.

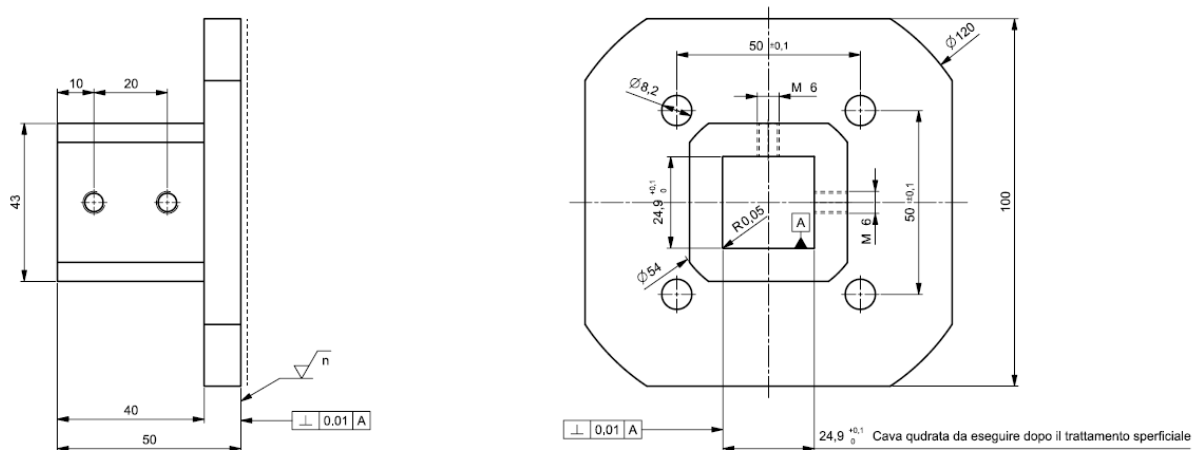


Figura 72 Disegno tecnico flangia

18 Ingombro

Il dispositivo è progettato per essere implementato sul tornio KD 400. Gli ingombri devono essere il più contenuti possibile così da occupare meno spazio possibile sull'area di lavoro. Tenendo in considerazione pure l'utensile l'ingombro totale stimato è di 90x108x180. La lunghezza totale del sistema di monitoraggio (180) può essere aumentata se ci fosse l'esigenza di farlo, per esempio in problematiche in cui la spalla della flangia dovesse collidere con il pezzo da tornire.

Lo spazio di lavoro occupato è relativamente contenuto, in quanto escludendo la dimensione della torretta del tornio (elemento standard) ha un valore di 110 [mm].

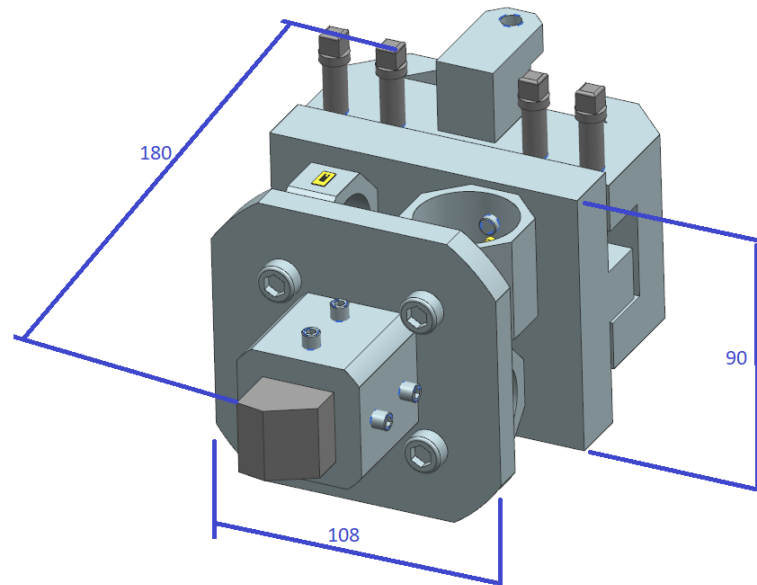


Figura 73 Ingombro dinamometro

19 Lista pezzi

19.1 Pezzi di fabbricazione

Posizione	Nome file	Denominazione	Quantità	Materiale
1	C10419-E001	Base	1	X5CrNi1810 (AISI 304)
2	C10419-E002	Flangia utensile	1	X5CrNi1810 (AISI 304)
3	C10419-E003	Anello sottile	2	X5CrNi1810 (AISI 304)
4	C10419-E004	Anello spesso	2	X5CrNi1810 (AISI 304)

Tabella 23 Tabella pezzi di fabbricazione

19.2 Pezzi di commercio

Posizione	Denominazione	Quantità	Azienda
5	Vite testa cilindrica M8x16	4	Bossard
6	Vite testa cilindrica M6x18	6	Bossard
7	Spina cilindrica D4 h6	4	Bossard
8	Vite senza testa M6x14	4	Bossard
9	Utensile tornio (tutti applicabili se stelo 25x25)	1	-
10	Torretta utensile Nr. 109 966 109 Type WD 2/25	1	SCH
11	Estensimetro 1-LY1x-3/120	12	HBM

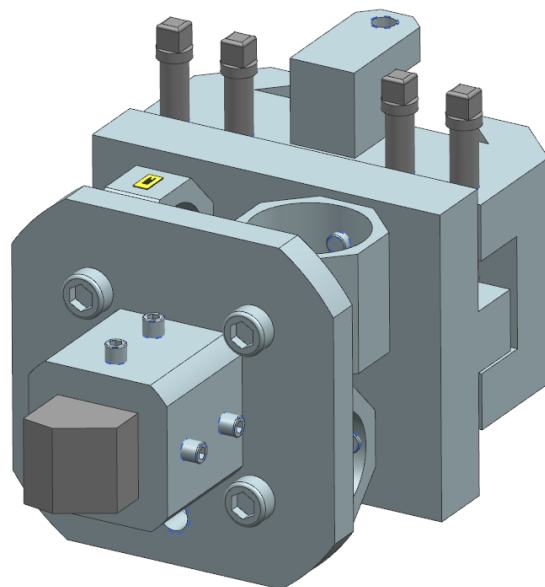
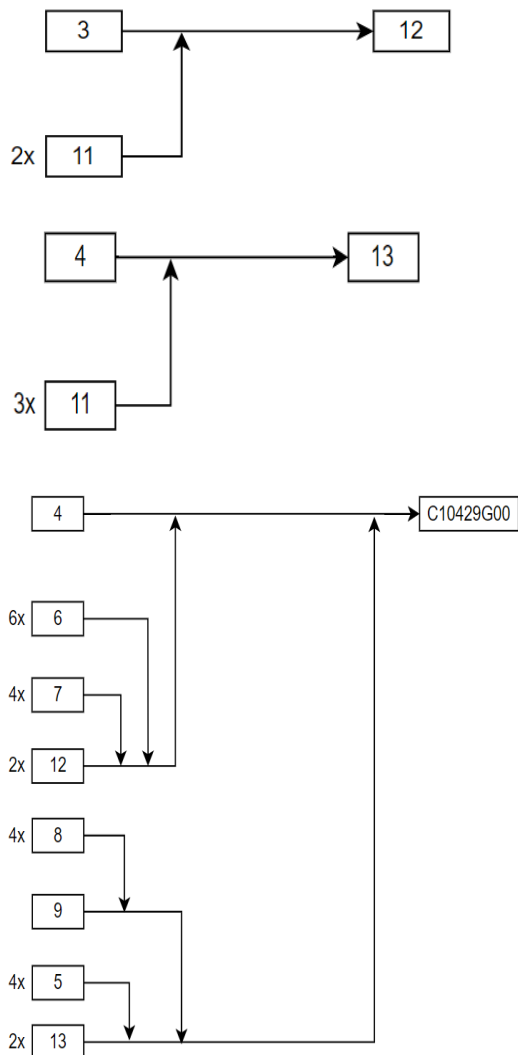
Tabella 24 Tabella pezzi di commercio

19.1 Assiemi

Posizione	Nome file	Denominazione
13	C10419-G001	Assieme anelli sottili
14	C10419-G002	Assieme anelli spessi

Tabella 25 Tabella sottoassiemi

19.2 Schema di montaggio



19.3 Analisi dei costi

Il prezzo della viteria non è inserito in quanto sono elementi presenti nelle officine meccaniche

Denominazione	Prezzo	Quantità confezione	Quantità necessaria	Prezzo finale
Estensimetro 1-LY1x-3/120	126 CHF	5 pezzi	12 pezzi	378 CHF
Torretta utensile Nr. 109 966 109 Type WD 2/25	183 CHF	1 pezzo	1 pezzo	183 CHF
Colla rapida HBM 270	86 CHF	1 pezzo	1 pezzo	86 CHF

Tabella 26 Analisi dei costi

Il costo degli elementi in commercio ha un totale di 647 CHF. Bisogna considerare il fatto che la torretta utensile può essere già presente in officina e l'utilizzo della colla è minimo.

20 Miglioramenti

Concludendo la progettazione del dinamometro è possibile elencare alcune possibili migliorie da eseguire successivamente. Innanzitutto, la realizzazione di un prototipo risulta molto utile perché è possibile confrontare le deformazioni ottenute realmente con i valori raggiunti tramite l'analisi numerica. Inoltre, avere a disposizione un prototipo consente un'analisi modale sperimentale, molto utile per misurare il valore di frequenza propria dell'intero sistema. Per le misure delle vibrazioni, è stato liberato lo spazio per l'inserimento di un accelerometro con presa a filetto metrico come riportato nell'immagine sottostante. Il foro non è indicato nei disegni di dettaglio perché non si è voluto mettere un vincolo sulla grandezza del filetto.

Una modifica che può risultare utile è progettare una copertura per isolare dall'ambiente esterno i trasduttori estensimetrici, prestando particolare attenzione a non creare resistenza con la deformazione del sistema.

Se dovessero essere presenti delle necessità per cui non è possibile utilizzare la colla frena filetti, il bloccaggio può essere sostituito con dei tasselli circolari.

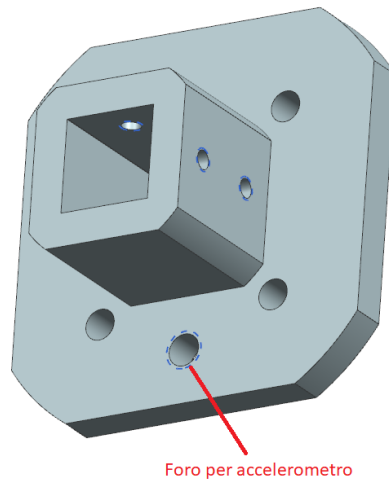


Figura 74 Foro per accelerometro

21 Conclusioni

Il macchinario sviluppato è in grado di monitorare separatamente le tre forze ortogonali del taglio obliquo in una lavorazione di tornitura, riuscendo così a soddisfare le specifiche della richiesta. Il dinamometro permette di rilevare i valori delle forze sia in caso di lavorazioni di taglio ortogonale, sia in lavorazioni di taglio obliquo.

Per quanto riguarda la tipologia di sensori utilizzati per questa applicazione è stato svolto un confronto tramite la cassa morfologica fra i sensori piezoelettrici ed i trasduttori elettrici ad estensimetri. Si è così stabilito che l'utilizzo di un trasduttore ad estensimetri offre un'ottima soluzione in quanto garantisce elevate precisioni ad un prezzo contenuto.

Il fissaggio dell'utensile è garantito tramite il serraggio di quattro viti senza testa M6, mentre la funzione che svolge da basamento dell'intera struttura è garantita dal sistema di chiusura della torretta del tornio.

La soluzione proposta prevede di scomporre la forza risultante in tre forze ortogonali monitorabili: la componente di taglio, ovvero la forza più importante e maggiormente intensa; la componente di repulsione, ossia la più influente verso l'usura dell'utensile; ed infine la componente di resistenza all'avanzamento, ovvero la meno intensa che stabilisce la qualità superficiale del pezzo.

La teoria della deformazione del cerchio è la base del principio di funzionamento del dispositivo. L'applicazione dei carichi nel vertice superiore del cerchio crea una ovalizzazione a dipendenza della direzione del carico. Durante la lavorazione di tornitura la forza di taglio e di resistenza all'avanzamento agiscono come forze tangenziali nel cerchio, mentre la forza di repulsione opera come forza di compressione. Basandosi su questa teoria è stata modificata la geometria degli anelli rendendoli di forma ottagonale, in quanto lo sviluppo delle deformazioni è il medesimo di un cerchio, oltre che ad avere dei piani d'appoggio a 45°, i quali sono ideali per l'applicazione degli estensimetri.

Il sistema di monitoraggio è composto da quattro anelli suddivisi in coppie di due elementi, ovvero gli anelli spessi e gli anelli sottili. I componenti sono allineati in base alla direzione delle forze da monitorare e devono garantire le deformazioni entro il limite elastico del materiale. La coppia di anelli spessi svolge l'operazione di misura della forza di taglio, ovvero il carico più intenso, il quale crea la deformazione principale dell'intero sistema. Il monitoraggio della forza di resistenza all'avanzamento è eseguito dalla coppia di anelli sottili, questa lavorazione risulta più complessa in quanto l'intensità della forza è minore. Infine, quella di repulsione viene misurata dalla coppia di anelli spessi in quanto la deformazione sulle estremità laterali subisce una deformazione ottimale.

Tutti i carichi presenti vengono monitorati tramite quattro estensimetri collegati ad un ponte intero di Wheatstone. La posizione di essi per le componenti di taglio e di resistenza all'avanzamento sono situati sulle superfici inclinate inferiori dell'anello ottagonale, mentre per la forza di repulsione sono collocati nelle aree laterali.

Gli estensimetri utilizzati sono i 1-LY1x-3/120, elementi ottimali per misurare le deformazioni in un'unica direzione. Dall'analisi economica emerge che il costo degli elementi di commercio ammonta ad un totale di CHF 647.00.

I componenti dell'assieme sono costituiti in X5CrNi1810, l'acciaio inox più comunemente utilizzato in ambito meccanico. Tutti gli elementi, ad eccezione della flangia porta utensile, sono realizzabili mediante lavorazioni convenzionali quali: tornitura, fresatura e rettifica. La flangia porta utensile e la base necessitano di un trattamento termico di cementazione.

22 Sitografia

- [1] A. B. Beljan Ivan, *Estensimetria*, 20.08.2021.
- [2] T. meccanica, *Taglio ortogonale*,
<https://sites.google.com/view/tecnologiameccanica/tornitura/taglio-ortogonale>, 20.08.2021.
- [3] I. Galli, *Lavorazioni per asportazione con utensili da taglio*, 20.08.2021.
- [4] W. Amaro, *Tecnica di asportazione di truciolo*, 20.08.2021.
- [5] I. G. Villani, *Il taglio ortogonale nei materiali compositi ad alta velocità*, 20.08.2021.
- [6] I. N. Scuor, *Lavorazioni per asportazione di truciolo*, 20.08.2021.
- [7] Kistler, *Dinamometro*, <https://www.kistler.com/files/document/000-151e.pdf?callee=frontend>, 18.08.2021.
- [8] Wikipedia, *Estensimetri*, <https://it.wikipedia.org/wiki/Estensimetri>, 17.08.2021.
- [9] S. Scholar, *Sistema ad anelli*, <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-and-construction-of-a-strain-gauge-based-for-Rizal-Ghani/df97a3e3091ac1448bf6490e780afca656103b3c>, 18.08.2021.
- [10] Y. Zhao, *A High Performance Sensor for Triaxial Cutting Force Measurement in Turning*, 31.08.2021.
- [11] Kistler, *Sensore triassiale*, <https://www.kistler.com/files/download/960-262e.pdf?callee=frontend>, 18.08.2021.
- [12] HBM, *Scelta estensimetri*, <https://www.hbm.com/it/7164/how-to-select-the-right-strain-gauge/>, 28.08.2021.
- [13] HBM, *Estensimetro lineare*, <https://www.hbm.com/it/4561/ly-estensimetri-lineari-con-1-griglia-di-misura/>, 28.08.2021.
- [14] HBM, *Collante*, <https://www.hbm.com/it/2962/estensimetri-collanti-z70/>, 28.08.2021.
- [15] O. Belluzzi, *cavi estensimetro*,
https://ampio.belluzzifioravanti.it/file.php/351/progetto_scelte_5b1/Estensimetri-relazioni.pdf, 02.09.2021.
- [16] Rodacciai, *C45E*, https://www.rodacciai.it/UPLOAD/datasheets/KV50-R50PB_C50E-Nr.1.1206-ITA.pdf, 01.09.20121.
- [17] Sicutool, *Parametri*,
https://www.sicutool.it/DesktopModules/Catalogo/allegati/tabella_tecnica_61.pdf, 01.09.2021.
- [18] Formule, *Formule vel. taglio*,
http://roby1968.altervista.org/doc_vari/velocita_di_taglio/medie_di_taglio_al_tornio.htm, 01.09.2021.
- [19] MeccanicaTecnica, *Potenza*, <https://meccanicatecnica.altervista.org/potenze-e-forze-in-tornitura/>, 01.09.2021.
- [20] KDM, *Tornio*, <https://www.dmt-kern.de/en/machine/kd-400>, 18.08.2021.
- [21] HSM, *Acciaio INOX*, https://www.hsm-stahl.de/fileadmin/user_upload/datenblatt/HSM_Datenblatt_1.4301.pdf, 17.08.2021.
- [22] S. service, *Tempra*, <http://www.steelservice.it/tempra/>, 28.08.2021.
- [23] SAPIO, *Cementazione*, <https://www.sapio.it/settori-industriali/metallurgia/lavorazione-metalli/trattamenti-termici/cementazione-e-carbonituratione>, 28.08.2021.
- [24] S. Yaldiz, *Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting measurment*, 20.08.2021.
- [25] S. service, *Tempra*, <http://www.steelservice.it/tempra/>, 28.08.2021.

Indice delle figure

Figura 1 Rappresentazione dell'operazione di tornitura.....	15
Figura 2 Caratteristiche geometriche di un utensile da tornio.....	15
Figura 3 Schematizzazione della lavorazione.....	16
Figura 4 Schematizzazione della lavorazione.....	16
Figura 5 Rappresentazione degli angoli.....	17
Figura 6 Rappresentazione dei piani cristallini.....	17
Figura 7 determinazione dell'angolo di scorrimento ϕ	18
Figura 8 Schematizzazione delle velocità	18
Figura 9 Schema delle velocità	19
Figura 10 Schema delle forze agenti	19
Figura 11 Forze di reazione	20
Figura 12 Circonferenza di Marchant.....	20
Figura 13 Piano del taglio obliquo	23
Figura 14 angolo di spoglia frontale reale	23
Figura 15 Ft e Fn nel taglio obliquo.....	24
Figura 16 Forze agenti su taglio obliquo	25
Figura 17 andamento della forza.....	26
Figura 18 andamento della forza di taglio in funzione dell'angolo	26
Figura 19 Accelerometro, Sensore ad un disco	27
Figura 20 Cella di carico, Sensore a due dischi.....	27
Figura 21 Variazione del segnale [7].....	28
Figura 22 Rappresentazione estensimetro	30
Figura 23 Schema ponte di Wheatstone.....	30
Figura 24 Configurazione a 1/4 di ponte	31
Figura 25 Configurazione a 1/2 di ponte	31
Figura 26 Configurazione a 1/2 di ponte, influenza dei momenti.....	32
Figura 27 Configurazione a ponte intero.....	32
Figura 28 Estensimetri attivi	32
Figura 29 Schema dinamometro	33
Figura 30 Dinamometro Kistler.....	33
Figura 31 forze agenti sul taglio obliquo	34
Figura 32 Deformazione dell'anello in funzione delle forze agenti.....	34
Figura 33 forma definitiva dell'anello ottagonale.....	35
Figura 34 disposizione di anelli ed estensimetri.....	35
Figura 35 ripartizione delle forze	36
Figura 36 deformazione dell'anello in funzione delle forze agenti	36
Figura 37 Forma dell'anello	36
Figura 38 Rappresentazione schematica.....	37
Figura 39 Prototipo.....	37
Figura 40 Disposizione degli estensimetri.....	38
Figura 41 Sistema sensore piezoelettrico triassiale.....	39
Figura 42 Sensore triassiale.....	39
Figura 43 Sistema ibrido	40
Figura 44 Ingombro cavi.....	40
Figura 45 sistema di monitoraggio di forze biassiali	41
Figura 46 Schematizzazione variante A.....	58
Figura 47 Schematizzazione variante B.....	58
Figura 48 Variante definitiva.....	59
Figura 49 rappresentazione degli anelli	61

Figura 50 Geometria anello spesso	61
Figura 51 Geometria anello sottile	62
Figura 52 Distanza del punto d'applicazione.....	62
Figura 53 Geometria estensimetro.....	64
Figura 54 Supercolla Z70	64
Figura 55 Esempio collegamenti estensimetro [15]	64
Figura 56 Cava base	65
Figura 57 Generazione di calore	69
Figura 58 Forze agenti sull'utensile.....	69
Figura 59 Variante A	75
Figura 60 Sistema semplificato	76
Figura 61 Applicazione delle forze	78
Figura 62 Distorsione anelli.....	78
Figura 63 Variante B	79
Figura 64 Fissaggio del dispositivo	81
Figura 65 Carichi lavorazione.....	81
Figura 66 Spostamenti	82
Figura 67 Distribuzione delle sollecitazioni	82
Figura 68 Schema ponte di Wheatstone.....	83
Figura 69 Dati tornio [20].....	85
Figura 70 Zona a rischio rottura	89
Figura 71 Aree cementate.....	90
Figura 72 Disegno tecnico flangia	90
Figura 73 Ingombro dinamometro	91
Figura 74 Foro per accelerometro.....	95

Indice delle tabelle

Tabella 1 Fattori di ponderazione.....	45
Tabella 2 Note assegnate e significato	45
Tabella 3 Vantaggi – svantaggi funzione sensorica.....	46
Tabella 4 valutazione funzione sensorica	47
Tabella 5 Vantaggi – svantaggi funzione sistema di fissaggio.....	48
Tabella 6 valutazione funzione sistema di fissaggio	49
Tabella 7 Vantaggi – svantaggi funzione struttura del sistema.....	51
Tabella 8 Valutazione funzione struttura del sistema	52
Tabella 9 Vantaggi – svantaggi funzione bloccaggio utensile	53
Tabella 10 valutazione funzione bloccaggio utensile	54
Tabella 11 Confronto tra A e B.....	57
Tabella 12 Velocità di taglio e d'avanzamento [17].....	67
Tabella 13 avanzamento [18].....	68
Tabella 14 Confronto CAD	75
Tabella 15 Confronto CAD e MESH.....	76
Tabella 16 Infittimenti Variante A	77
Tabella 17 Confronto CAD e idealizzato	79
Tabella 18 Infittimenti Variante B	80
Tabella 19 Valori deformazione forza di taglio	83
Tabella 20 Valori deformazione forza di resistenza all'avanzamento	84
Tabella 21 Valori deformazione forza di repulsione	84
Tabella 22 Viste tornio.....	85
Tabella 23 Tabella pezzi di fabbricazione	93
Tabella 24 Tabella pezzi di commercio	93
Tabella 25 Tabella sottoassiemi.....	93
Tabella 26 Analisi dei costi.....	94

23 Allegati

Gli allegati sono disponibile nella cartella del progetto.

1. Pianificazione
2. Disegni 2D
3. Scheda tecnica X5CrNi1810
4. Scheda tecnica C45E
5. Documento doppio anello parallelo
6. Documento doppio anello perpendicolare
7. Documento pezzo monolitico
8. Calcoli Excel
9. Preventivo Kistler
10. Rapporto incontri
11. Scheda tecnica tornio