



Università degli Studi di Udine

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Gestionale e Meccanica

Progetto

SISTEMI INTELLIGENTI E TECNOLOGIE INNOVATIVE PER LA PRODUZIONE NON PRESIDIATA DI PEZZI MECCANICI DI PRECISIONE

MICRA SRL, BANDO REGIONALE POR-FESR 2007-2013

Dr. Ing. Sortino Marco

Dr. Ing. Totis Giovanni

Dott. Ing. Belfio Sandro

CONTENUTI

1. ANALISI COMPARATIVA SULLE TECNOLOGIE DI SCANSIONE TRIDIMENSIONALE DI PEZZI MECCANICI	5
1.1 INTRODUZIONE	5
1.2 SISTEMI OTTICI	7
1.3 SISTEMA OTTICO PER LA SCANSIONE DEI PEZZI	10
1.4 METODOLOGIA PER IL CONFRONTO TRA SCANSIONE OTTICA E METODOLOGIA TRADIZIONALE	11
1.5 METODOLOGIA PER LA VERIFICA DIMENSIONALE MEDIANTE NUVOLA DI PUNTI.....	14
1.5.1 COMPARAZIONE DIRETTA TRA LA NUVOLA DI PUNTI ED IL MODELLO CAD 3D DEL PEZZO	14
1.5.2 RICONOSCIMENTO DI FEATURE ELEMENTARI SUPERFICIALI DELLA NUVOLA DI PUNTI 16	
1.6 CONCLUSIONI.....	21
2. METODOLOGIA PER LA CORREZIONE ADATTATIVA DEL MODELLO DI RIFERIMENTO	23
2.1 INTRODUZIONE	23
2.2.1 MODELLI CAD	24
2.2.2 CAM - POST PROCESSOR	25
2.2.3 MESSA IN MACCHINA.....	27
2.2.4 CORREZIONE DEGLI ERRORI DIMENSIONALI.....	28
2.3 METODOLOGIA PROPOSTA.....	29
2.3.1 GENERAZIONE DEL MODELLO	30
2.3.2 ELABORAZIONE DELLA NUVOLA DI PUNTI	31
2.3.3 RIDEFINIZIONE DEL MODELLO	37
2.4 ESEMPIO APPLICATIVO	41
2.4.1 SOFTWARE CAD/CAM UTILIZZATI	43
2.4.2 IMPORTAZIONE DELLA GEOMETRIA	43
2.4.3 DEFINIZIONE DEI PROFILI DI CONTROLLO DELLE LAVORAZIONI	43
2.4.4 DEFINIZIONE DELLA LISTA LAVORAZIONI	44
2.4.5 DEFINIZIONE DELLE LAVORAZIONI	48
2.4.6 ESECUZIONE DELLA LAVORAZIONE	51
2.4.7 RIDEFINIZIONE DEL MODELLO	53
2.4.8 RICALCOLO DEL PART PROGRAM	55
2.5 CONCLUSIONI.....	58
3. METODOLOGIE PER LA PROGETTAZIONE DI ATTREZZATURE SENSORIZZATE	59
3.1 INTRODUZIONE	59
3.2 OBIETTIVI DEL MONITORAGGIO	60

3.3 SENSORI E SISTEMI SENSORIALI PER MONITORAGGIO DEI PROCESSI DI TAGLIO.....	61
3.4 SELEZIONE TIPOLOGIE DI SENSORI IDONEI PER APPLICAZIONI IN AMBITO INDUSTRIALE...	65
3.4.1 MISURE DI CORRENTE (COPPIA) E POTENZA ASSI E MANDRINI.....	65
3.4.2 MISURE DI TEMPERATURA	66
3.4.3 MISURE DI EMISSIONI SONORE.....	66
3.4.4 MISURE DI EMISSIONE ACUSTICA ULTRASONICA (AE)	66
3.4.5 MISURE DI VIBRAZIONI.....	69
3.4.6 MISURE DI DEFORMAZIONI, FORZE E COPPIE DI TAGLIO.....	72
3.5 METODOLOGIE PER LA PROGETTAZIONE E PER LA VERIFICA DI ATTREZZATURE STRUMENTATE	76
3.5.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI.....	76
3.5.3 CASO STUDIO TEORICO.....	80
3.5.4 DIMENSIONAMENTO DI MASSIMA DEI COMPONENTI.....	81
3.5.5 STIMA DELLE FORZE DI TAGLIO	82
3.5.6 ANALISI FEM STATICA	86
3.5.7 ANALISI FEM DINAMICA	89
3.5.8 ATTREZZATURE SENSORIZZATE AVANZATE CON CELLE DI CARICO.....	92
3.9 INTERFACCIAMENTO CON IL SISTEMA DI CONTROLLO NUMERICO DELLA MACCHINA UTENSILE	94
3.10 BIBLIOGRAFIA.....	97
APPENDICE A.....	101
APPENDICE B.....	107

1. ANALISI COMPARATIVA SULLE TECNOLOGIE DI SCANSIONE TRIDIMENSIONALE DI PEZZI MECCANICI

1.1 INTRODUZIONE

Il termine Reverse Engineering (RE) o Ingegneria Inversa, nell'ambito relativo alla progettazione meccanica e all'ingegneria industriale, è inteso come un procedimento che permette di realizzare, a partire da oggetti reali, dei modelli matematici digitali, ad esempio modelli CAD 3D. Questi modelli consentono di ottenere una ricostruzione virtuale-tridimensionale quanto più fedele possibile dell'oggetto reale di cui si vogliono acquisire tutte le caratteristiche geometriche. Quindi per RE in quest'ambito si intende un insieme di tecnologie che permettono di rilevare, secondo diversi principi fisici e/o matematici, la posizione dei punti posti sulla superficie di un qualsiasi oggetto e di memorizzarli, in formato digitale, in modo da poterne usufruire all'interno di applicativi software di tipo Computer Aided Design (CAD) o per altri scopi quali, per esempio, applicazioni di realtà virtuale, di computer graphics o altro.

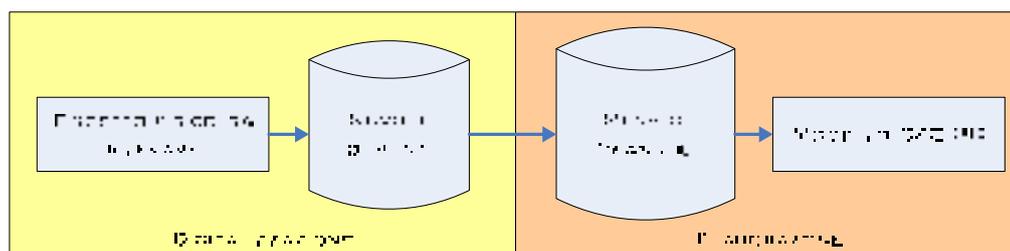


Figura 1.1. Il processo di Reverse Engineering

Come si può facilmente intuire le potenzialità del RE sono notevoli e le ricadute di alcune applicazioni, specie nel campo dell'industria manifatturiera, possono costituire una marcia in più per la competitività ed il successo aziendale, contribuendo a ridurre in maniera considerevole il tempo di sviluppo prodotto (time to market). Al momento della sua introduzione, la diffusione delle metodologie di RE ha incontrato i suoi maggiori ostacoli nell'alto costo dei sistemi e nei lunghi tempi necessari per il rilievo con tecniche tradizionali, per esempio la misura a contatto con macchine per il rilievo delle coordinate. Attualmente, grazie ai notevoli passi avanti del mondo dell'elettronica e della tecnologia in generale, vista la reperibilità di strumenti di calcolo (necessari per l'elaborazione dell'elevato numero dei dati acquisiti) sempre più potenti ed a basso costo, e grazie allo sviluppo di nuove tecniche di rilievo, si sta cominciando a introdurre il RE in nuovi ambiti.

Ad esempio, in molte aree della produzione sono richiesti, sempre più frequentemente, ispezioni e controlli dimensionali dei prodotti durante la lavorazione. L'avvento di sistemi di digitalizzazione molto veloci e di software capaci di processare grandi quantità di dati ha permesso di effettuare questa operazione quasi in tempo reale mentre le metodologie di ispezione comunemente applicate, che hanno per obiettivo la certificazione del rispetto delle

dimensioni di progetto, sono tipicamente molto lente, in special modo se applicate a produzione di serie di pochi pezzi.

Come illustrato nella Tabella 1.1, esistono differenti metodi per effettuare l'acquisizione e la digitalizzazione della forma di oggetti fisici pre-esistenti.

Tabella 1.1. Classificazione dei sistemi per l'acquisizione della forma.

Sistemi per l'acquisizione della forma	A contatto	Distruttivi	Slicing
		Non distruttivi	CMM
	Non a contatto		Riflessivi
		Ottici	
		Trasmissivi	Non ottici
			Tomografia

I sistemi a contatto, ovvero i sistemi tradizionali, sono basati sul rilevamento di punti sulla superficie dell'oggetto fisico mediante un tastatore. Il sistema di coordinate collegato con il tastatore determina quindi la posizione triassiale del punto di contatto all'interno del sistema di riferimento della macchina.

In questa trattazione, risultano di maggiore interesse i sistemi non a contatto. Si tratta di tecniche indirette per il rilievo della forma, basate sull'utilizzo di una sorgente di energia, che è naturalmente presente in un certo ambiente o che è artificialmente proiettata sulla superficie dell'oggetto. L'energia così riflessa (metodi riflessivi) oppure trasmessa (metodi trasmissivi) viene registrata e quindi analizzata per risalire alla determinazione della forma dell'oggetto da misurare.

Questo tipo di sistemi ha ormai raggiunto livelli di accuratezza e velocità di acquisizione tali da giustificare la crescente diffusione nel campo della misura e del controllo geometrico - dimensionale di prodotti industriali. L'utilizzo di questo tipo di sistemi può infatti, determinare l'aumento dell'efficienza del processo, poiché la digitalizzazione viene effettuata in tempi significativamente ridotti rispetto alla metodologia a contatto e con un minor intervento dell'operatore. Inoltre la non invasività della misura rende possibile la digitalizzazione di superfici di materiali di qualsiasi natura, (da quelli soffici come i tessuti, a quelli di strutture biologiche come la pelle o le foglie) e di oggetti di diverso tipo (da pezzi meccanici a parti di carrozzeria fino a opere d'arte e reperti archeologici) ed inoltre, elimina la procedura di compensazione dell'ingombro del tastatore.

Di maggiore rilievo, per l'applicazione in oggetto alla presente relazione, sono i sistemi ottici, che possono essere classificati come segue:

Tabella 1.2. Classificazione dei sistemi per l'acquisizione della forma.

Sistemi ottici	Attivi	Luce laser (coerente)
		Luce bianca strutturata (incoerente)
	Passivi	Fotogrammetria
		Shape from silhouette
		Shape from shading
	

La differenza sostanziale tra tecniche passive ed attive, è che le prime simulano il funzionamento del sistema visivo umano, mentre le seconde necessitano di una fonte di luce, che proiettata sull'oggetto viene successivamente acquisita da un sensore, permettendo di determinare le coordinate dei punti rilevati rispetto ad un sistema di riferimento noto.

1.2 SISTEMI OTTICI

I metodi attivi sono sicuramente quelli più promettenti e più utilizzati. Si basano sull'utilizzo di una sorgente luminosa e, facendo riferimento al tipo di sorgente utilizzata, essi si differenziano in sistemi a luce laser e sistemi a luce bianca:

I sistemi a Luce laser utilizzano come sorgente luminosa attiva una sorgente di luce laser coerente e monocromatica (per sorgente di luce coerente si intende una sorgente di luce che stimolata opportunamente è caratterizzata dall'emissione di fotoni con le stesse caratteristiche di fase, polarizzazione e direzione, mentre nel caso di luce incoerente i fotoni emessi non presentano nessuna relazione di fase o di polarizzazione tra di loro). Solitamente la sorgente di luce laser non viene proiettata in maniera diretta sull'oggetto o sulla scena ma l'emettitore è dotato di particolari lenti o prismi, che, abbinati a specchi direzionali, sono in grado di convogliare il fascio luminoso e di conferirgli una caratteristica forma a raggio (puntiforme e di sezione circolare) o a linea (lama di luce).

Attualmente, gli scanner laser più utilizzati sono di due tipologie distinte: Scanner manuali e Scanner laser fissi. Gli scanner laser manuali sono generalmente da una struttura in plastica che ricorda una sorta di "pistola". Attraverso un movimento manuale è possibile acquisire i dati "spazzolando" la parte su e giù oppure svolgendo un movimento da destra verso sinistra. Gli scanner fissi montati su un cavalletto sono in linea di massima più precisi degli scanner laser manuali e offrono una migliore accuratezza. Entrambi i sistemi possono far uso di markers in modo da allineare progressivamente le varie misure.

Tecnologia: gli scanner che utilizzano il laser campionano la parte da misurare utilizzando generalmente una sola "lama di luce" 3D mentre gli scanner a luce strutturata campionano l'oggetto proiettando progressivamente una serie di frange con larghezze diverse. A causa della ripetibilità delle letture (o campionamenti) è dimostrato che uno scanner a luce strutturata offre una qualità migliore rispetto a un laser.

- Velocità: rispetto agli scanner a luce strutturata gli scanner laser hanno avuto per diverso tempo un potenziale vantaggio in termini di velocità in quanto era possibile ottenere con un unico movimento una lettura più veloce. Grazie però all'introduzione di una nuova serie di telecamere, un'elettronica rinnovata e a processori sempre più potenti la luce strutturata è in grado di offrire tempi di misura nell'ordine del secondo producendo nuvole di punti con oltre un milione di punti. Gli scanner a luce strutturata diventano un ottimo strumento per acquisire volti umani e per effettuare attività di "body scanning" recuperando, tra l'altro, anche le informazioni relative al colore.
- Area di scansione: gli scanner laser effettuano generalmente la misurazione dividendo la lama di luce in una serie di punti disposti nello spazio. L'acquisizione dei punti è bidimensionale e si ottiene per effetto dello "stiramento" della lama proiettata sulla parte da digitalizzare. Gli scanner a luce strutturata sono invece in grado di acquisire i punti ordinati direttamente in 3D producendo quindi nuvole di punti intrinsecamente migliori dei sistemi basati sul laser.
- Condizioni di illuminazione: gli scanner laser hanno la capacità di alzare il guadagno (gain) per ottenere le informazioni anche in quegli ambienti le cui condizioni di illuminazione sono

precarie (illuminazione diffusa per esempio). I dati sono in genere rumorosi e spesso imprecisi. Gli scanner a luce strutturata richiedono che le condizioni di illuminazione ambientale siano controllate in quanto la lettura dei dati è determinata dalle prestazioni del proiettore. Scansioni in ambienti all'aperto e con luce diurna producono di norma scarsi risultati e il laser è sicuramente la scelta migliore. Se le acquisizioni vengono invece effettuate in uffici e/o locali chiusi in cui è possibile controllare le sorgenti luminose la qualità delle misurazioni ottenute con la luce strutturata sono certamente migliori: migliore qualità superficiale e migliore accuratezza rispetto alla tecnologia al laser.

- Sicurezza: I Laser, grazie alla loro capacità di concentrare l'intensità della luce ed energia in uno spazio molto piccolo, presentano diversi problemi legati alla sicurezza in particolare in tutte quelle circostanze in cui il raggio laser entra in contatto con l'occhio. I sistemi di scansione al laser devono essere certificati secondo rigide normative e comunque rimanere al di sotto della Classe 2D per essere destinati all'acquisizione di corpi umani, visi, piedi e così via. La luce strutturata è basata semplicemente sulla luce bianca o blu pertanto pienamente compatibile per effettuare misurazioni anche direttamente sul volto di una persona.

I principi di misura su cui si possono basare questi sistemi sono i seguenti:

- sistemi a triangolazione: si basano sulla conoscenza di distanze e di angoli noti tra la sorgente luminosa (emettitore E) e il sensore fotosensibile per ricavare la posizione (ricevitore R) vedi paragrafo relativo alla descrizione di questi sistemi. In questo caso la sorgente di luce ad alta energia viene proiettata, secondo una direzione angolare nota, sulla superficie dell'oggetto da rilevare. La posizione spaziale di quest'ultimo viene poi calcolata sulla base di semplici formule trigonometriche. I sistemi basati sul principio di triangolazione sono caratterizzati da velocità di acquisizione alte, mentre il loro grado di precisione dipende dalla risoluzione del sensore fotosensibile e dalla distanza tra scanner e superficie dell'oggetto da rilevare.

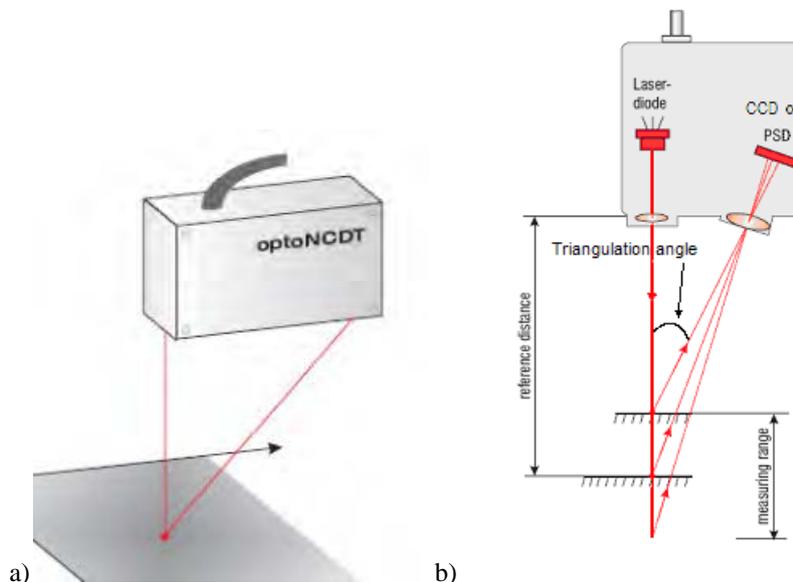


Figura 1.2. Principio di funzionamento dei sistemi ottici a triangolazione laser.

- *Sistemi a tempo di volo o 'ranging'*: si basano sulla misura della posizione tramite la rilevazione del tempo di volo che un raggio laser emesso da un emettitore impiega per essere riflesso dalla superficie dell'oggetto da misurare.

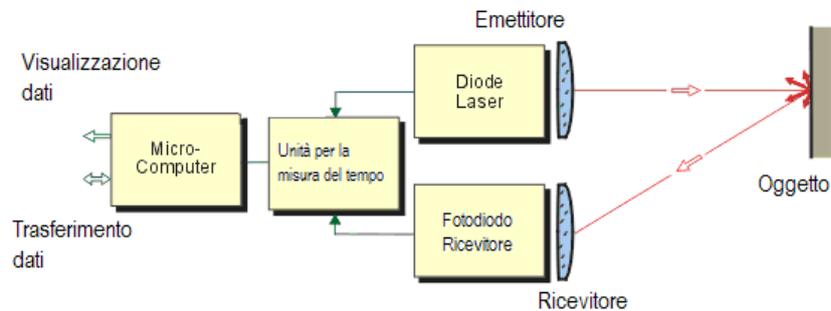


Figura 1.3. Principio di funzionamento dei sistemi ottici a tempo di volo.

- *Sistemi basati sull'interferometria*: vengono utilizzati soprattutto per effettuare misure di distanze piuttosto che rilevamento di forme di oggetti (per questo motivo l'analisi di questo tipo di sistemi non verrà ulteriormente approfondita in questa sede). Il principio di funzionamento di questo metodo è il confronto della fase del segnale emesso (di solito una radiazione luminosa di tipo laser) e il segnale che riflesso dalla presenza dell'oggetto target da rilevare. Dalla differenza di fase misurata si può dedurre il valore della distanza da misurare. Questi metodi possono rivelarsi molto precisi e sono per lo più utilizzati nell'ambito dei controlli dimensionali dei macchinari, sia per il controllo delle dimensioni dei prodotti che per il controllo della posizione relativa di parti della macchina, o delle misure di deformazione degli oggetti.

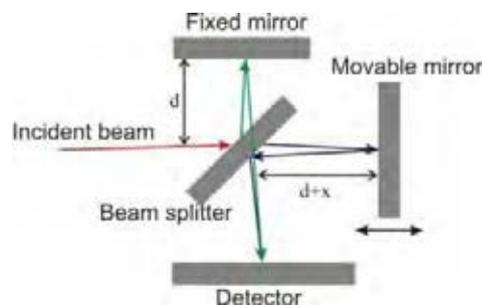


Figura 1.4. Principio di funzionamento dei sistemi ottici ad interferometria

Gli oggetti sono sottoposti direttamente a scansione e le nuvole di punti acquisite sono contemporaneamente confrontate con i modelli CAD di progetto, in modo da verificare la presenza o meno di eventuali errori dimensionali e/o di forma. Altro esempio possono essere le applicazioni relative al controllo della correttezza di montaggio per pezzi facenti parte di un complessivo.

Tabella 1.3. Classificazione dei sistemi per l'acquisizione della forma.

Confronto tra Metodi di misura utilizzati nei sistemi ottici		
Metodo di misura	Vantaggi	Svantaggi
Tempo di volo	<ul style="list-style-type: none"> • Buon data rate; • Adatto per acquisizione di ampi volumi; • Profondità di acquisizione media. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso; • Precisione inferiore a quella per triangolazione su profondità di vista identiche;
Triangolazione ottica attiva (luce laser o luce strutturata)	<ul style="list-style-type: none"> • Relativamente semplice; • Generalmente indipendente dalle condizioni di luce ambientale; • Elevato data rate. • Volumi di acquisizione di medie dimensioni. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sottoposto a vincoli di sicurezza per l'utilizzo di sorgenti laser; • Profondità e campo di acquisizione limitati. • Complessità di calcolo per elaborazione dati media. • Sensibilità al materiali dell'oggetto da acquisire
Interferometria	<ul style="list-style-type: none"> • Precisione elevata. 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacità di misura limitata dall'acquisizione di superfici piate; • Complessità di calcolo per elaborazione dati media. • Molto costoso

1.3 SISTEMA OTTICO PER LA SCANSIONE DEI PEZZI

Per convalidare l'applicazione di sistemi a triangolazione ottica attiva per la misurazione rapida di componenti meccanici, alcuni pezzi campione, corrispondenti a diverse tipologie di produzione della Micra Srl, insieme a pezzi (benchmark) ideati a proposito sono stati sottoposti a misurazione.

La misurazione è stata effettuata nell'ambito di una consulenza fornita dalla MicroService S.r.l. di Alpignano – Torino a Micra Srl. Il sistema di rilevazione effettuato è stato un sistema KONICA MINOLTA RANGE 7, le cui specifiche tecniche sono riportate in Tabella 1.4.



Figura 1.5. A sinistra, sistema di scansione KONICA MINOLTA RANGE7, a destra, esempio di applicazione

Tabella 1.4. Classificazione dei sistemi per l'acquisizione della forma.

Metodo di scansione	Triangolazione laser a linea di luce
Accuratezza	±30µm
Tempo di acquisizione	2.0 secondi per scansione
Numero di punti acquisiti	1.31M punti
Campo di misura	450-800 mm
Area di scansione	270x335x195
Interfaccia dati	USB 2.0
Dimensioni	295x190x200 mm
Peso	6.9 kg

Il sistema di scansione, per ogni posizionamento statico relativo tra il sistema di rilevazione ed il pezzo, acquisisce in circa 2 secondi una scansione superficiale composta da 1280(orizzontale)x1024(verticale) punti sulla superficie dell'oggetto, dei quali sono state determinate le coordinate triassiali nel sistema di riferimento del sistema di rilevazione. Per ogni pezzo da misurare sono state effettuate diverse scansioni, da 6 a 15, al fine di coprirne interamente la superficie. Mediamente tra una scansione e l'altra sono necessari 40 secondi per riposizionare il sistema di acquisizione. Marker opportunamente collocati sul sistema di fissaggio del pezzo hanno permesso di collimare successivamente le diverse scansioni in maniera automatica ed ottenere la nuvola di punti - NDP complessiva.

I punti acquisiti sono trasferiti via USB al computer di controllo del sistema di scansione sul quale è installato il software di acquisizione RANGE VIEWER. Il software elabora i punti allineando le scansioni e generando un file unico contenente i punti di tutte le scansioni. L'elaborazione della nuvola di punti complessiva richiede qualche ulteriore minuto di elaborazione. Per maggiore praticità, il software RANGE VIEWER è anche in grado di ricostruire un modello superficiale con mesh triangolare di tipo STL a partire dalla nuvola di punti. Il numero di vertici della struttura STL è grosso modo equivalente al numero di punti della nuvola di punti.

Al termine della procedura, viene generato un file in formato ASCII, nel quale sono elencate, suddivise per riga, le coordinate X Y Z dei punti acquisiti.

1.4 METODOLOGIA PER IL CONFRONTO TRA SCANSIONE OTTICA E METODOLOGIA TRADIZIONALE

I dati geometrici dei pezzi che sono stati sottoposti alla scansione sono riportati in Tabella 1.5.

In Figura 1.6, un esempio di nuvola di punti e di ricostruzione superficiale in formato STL ottenuto mediante il software RANGE VIEWER.

Il Tabella 1.6, sono riportati i risultati della scansione dei pezzi di riferimento. Il numero delle viste necessarie per coprire completamente la superficie esterna dei pezzi è stato proporzionale alla complessità geometrica del pezzo ed alle sue dimensioni. In tutti i casi sono stati ottenute nuvole di punti di una certa consistenza per una densità superficiale media di punti tra i 20 ed i 30 punti/mm². In un solo caso, ove il pezzo era molto grande anche se geometricamente semplice, la densità di punti è pari a 11.43 punti/mm², tuttavia, vista la semplicità geometrica del

componente, sono stati ritenuti sufficienti. Va rimarcato che nuvole di punti di simili dimensioni sono gestite senza problemi da computer moderni, anche se i tempi di calcolo sono piuttosto lunghi.

Dai risultati della scansione appare evidente il limite del metodo ottico di misurazione, ovvero che è poco idoneo per l'acquisizione di superfici concave o interne al pezzo, come ad esempio i fori. Come rappresentato in Figura FGH per il pezzo 1, ad esempio, le superfici interne dei fori grandi risultano incomplete, quelle dei fori piccoli completamente assenti. Molto indicativamente, si ha che la massima profondità rilevabile della parte interna di un foro è pari al 30% del diametro del foro stesso. Pertanto, tutti i pezzi di riferimento che presentavano fori non sono stati rilevati completamente.

Tabella 1.5. Elenco di pezzi utilizzati per la scansione tridimensionale

#	Disegno	Superficie	Volume	LxPxA
		mm ²	mm ³	mm
1		37231	294991	80x95x65
2		41296	193663	164x164x18
3		82670	581433	237x333x237
4		31225	274356	100x100x55
5		18017	145840	50x50x130

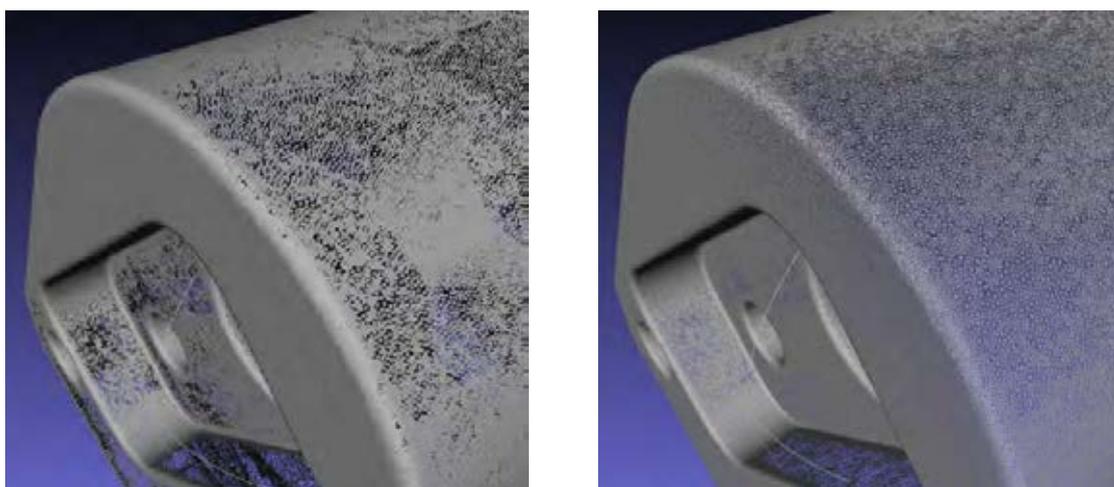


Figura 1.6. Esempio di nuvola di punti e di ricostruzione STL della superficie scansionata

Tabella 1.6. Risultati della scansione

Pezzo	Viste	Punti effettivi	Densità [punti/mm ²]	Commento
1	15	937678	25,19	Rilevamento superficiale incompleto, risultano assenti le superfici interne dei fori piccoli, ed incomplete quelle dei fori grandi
2	11	830704	20,12	Rilevamento superficiale incompleto, risultano assenti le superfici interne dei fori
3	15	944633	11,43	Rilevamento superficiale incompleto, risultano assenti le superfici interne dei fori
4	8	724681	23,21	Rilevamento superficiale incompleto, risultano assenti le superfici interne dei fori piccoli
5	5	560391	31,10	

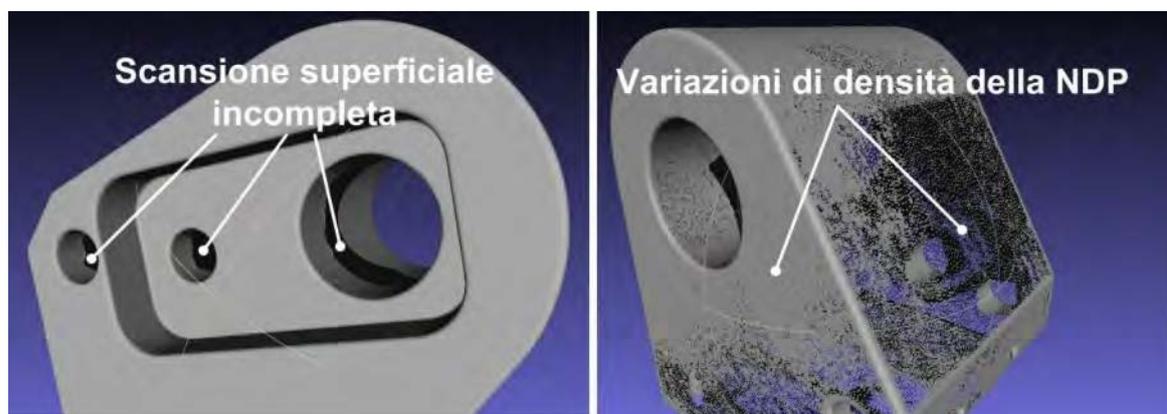


Figura 1.7. Problematiche riscontrate nelle nuvole di punti acquisiti

Le nuvole di punti rilevate presentavano inoltre delle variazioni di densità superficiale dei punti rilevati, in conseguenza del numero limitato di viste applicato. Pertanto, al fine di avere una

maggior uniformità superficiale dei punti sarebbe stato necessario ricorrere ad un numero di viste notevolmente più elevato con aggravio dei tempi di scansione e di elaborazione a causa della maggiore onerosità computazionale.

1.5 METODOLOGIA PER LA VERIFICA DIMENSIONALE MEDIANTE NUVOLA DI PUNTI

Attraverso l'applicazione della nuvola di punti, è possibile procedere alla verifica dimensionale del pezzo scansionato in due diverse maniere:

1. Comparazione diretta tra la nuvola di punti ed il modello CAD 3D del pezzo;
2. Riconoscimento di feature elementari superficiali dalla nuvola di punti (superfici piane, cilindriche, sferiche, coniche), elaborazione di modelli geometrici di dette superfici e applicazione di sistemi di misurazione delle grandezze di interesse mediante formule di geometria computazionale.

1.5.1 COMPARAZIONE DIRETTA TRA LA NUVOLA DI PUNTI ED IL MODELLO CAD 3D DEL PEZZO

Questa funzionalità è supportata da una grande parte dei software di gestione delle nuvole di punti disponibili in commercio. Tra i diversi software, in questa sede è stata applicata una versione dimostrativa del software 3DReshaper, specifico per applicazioni di ricostruzione della forma a partire da nuvole di punti in ambito artistico/conservazione dei beni culturali, industriale/controllo qualità, monitoraggio territoriale e medicale. Questo software mette a disposizione, in un ambiente grafico piacevole e di semplice utilizzo, una serie di funzioni specifiche e di report da applicare in ciascuno di questi ambiti.

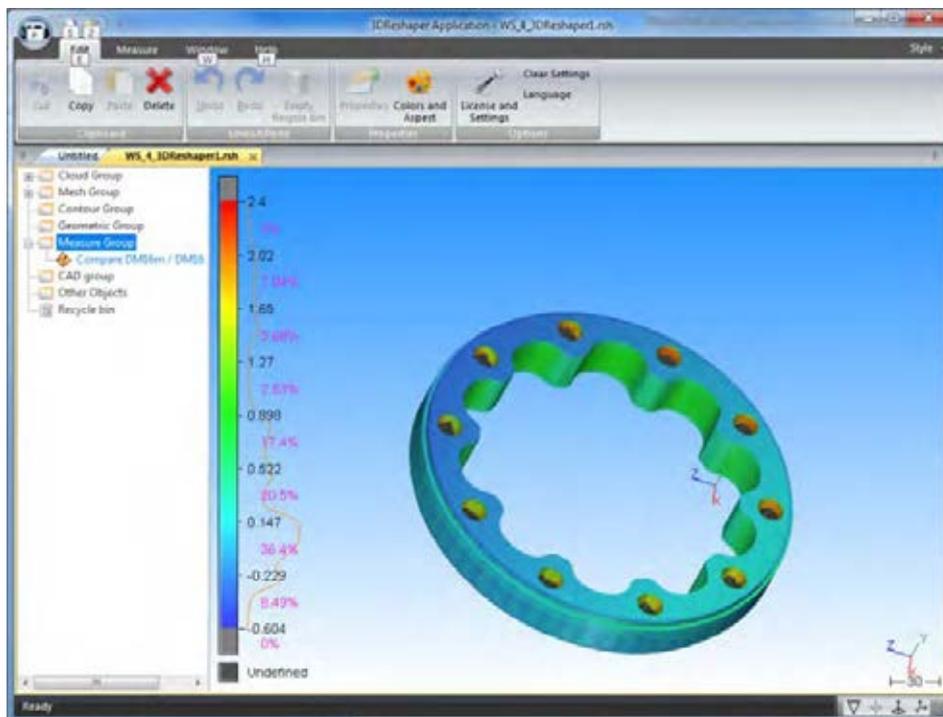


Figura 1.8. Interfaccia grafica del software 3DReshaper

Le fasi della comparazione mediante detto software sono state:

1. Importazione del modello CAD 3D del pezzo, secondo diversi formati (STL, IGES,..)
2. Importazione della nuvola di punti secondo diversi formati
3. Allineamento manuale grossolano tra la nuvola di punti ed il modello CAD 3D mediante punti di riferimento
4. Allineamento fine tra la nuvola di punti ed il modello CAD 3D mediante algoritmo automatico
5. Comparazione diretta.

Verrà fornita descrizione di dettaglio delle fasi di maggiore interesse ovvero 3, 4 e 5.

La funzione di allineamento manuale consiste nel selezionare tre coppie di punti omologhi sulle superfici del modello CAD 3D e della NDP, che vengono visualizzate simultaneamente in modalità schermo suddiviso. A partire dalle coordinate di questi 6 punti, due terne, il software calcola il tensore di trasformazione che trasforma le coordinate dei punti della NDP nelle nuove coordinate, vicine alla superficie del modello CAD 3D. Questa funzione è ovviamente grossolana a causa dell'influenza dell'operatore nella selezione delle tre coppie di punti e nell'imprecisione nella selezione degli stessi.

L'allineamento automatico è basato sulla determinazione dei vettori distanza relativa tra punti della superficie del modello CAD 3D ed i punti della nuvola di punti in un intorno. Una volta ricavati tutti i vettori di distanza, la NDP viene traslata e ruotata al fine di annullare il vettore distanza medio ed il vettore di rotazione medio rispetto al baricentro. Tale funzione è basata su algoritmi di regressione ed è effettuata dal sistema in maniera completamente automatica, a condizione di avere già in partenza una buona collimazione tra la NDP ed il modello 3D.

La comparazione diretta viene effettuata calcolando nuovamente i vettori di distanza, a collimazione avvenuta. Il software fornisce una rappresentazione grafica della deformazione superficiale del pezzo mediante una scala cromatica, come visibile nelle Figure seguenti. Inoltre, sulla sinistra viene riportato un diagramma di frequenza dell'ampiezza dei vettori distanza.

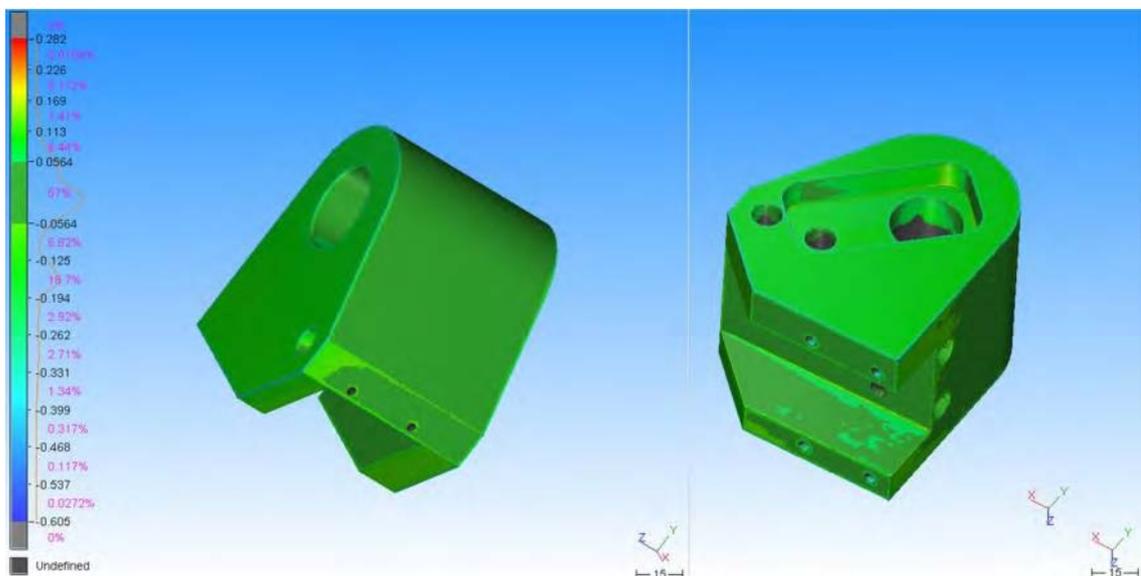


Figura 1.9. Pezzo 1, comparazione diretta tra NDP e modello CAD 3D

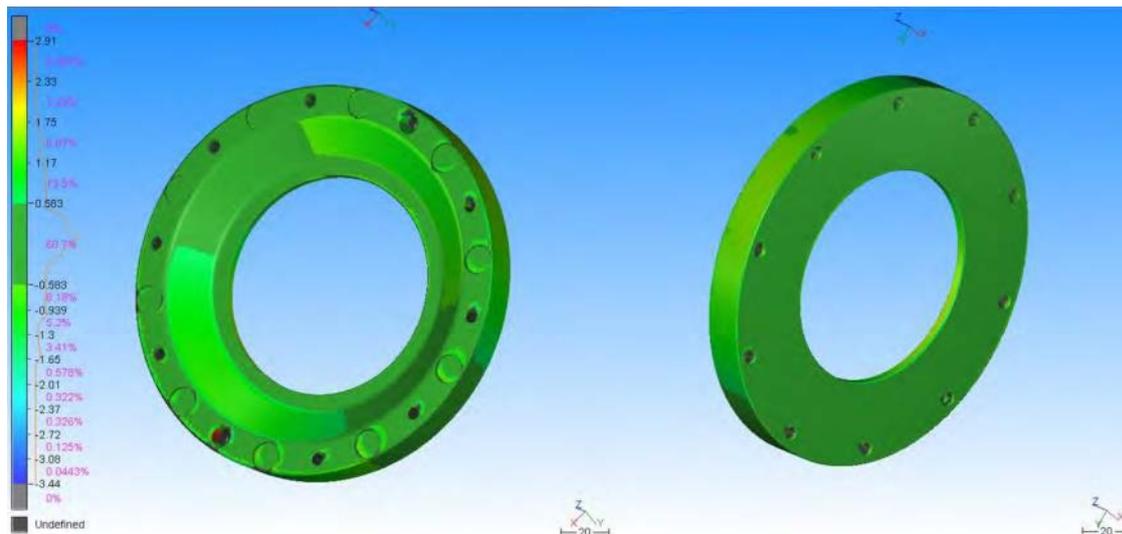


Figura 1.10. Pezzo 3, comparazione diretta tra NDP e modello CAD 3D

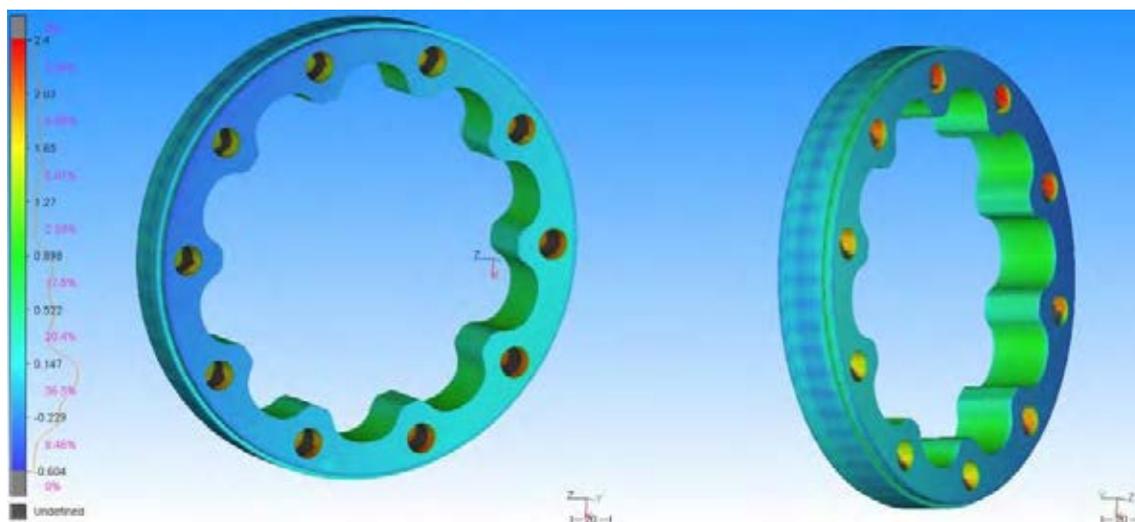


Figura 1.11. Pezzo 4, comparazione diretta tra NDP e modello CAD 3D

Come in evidenza nelle figure di comparazione, l'informazione fornita è molto qualitativa ed anche i punti di maggiore criticità sono tipicamente i fori, nei quali, anche a causa dell'imprecisione del sistema di scansione, i vettori deformazione sono massimi.

1.5.2 RICONOSCIMENTO DI FEATURE ELEMENTARI SUPERFICIALI DELLA NUVOLA DI PUNTI

Anche questa funzionalità è presente in diversi software commerciali per l'analisi delle NDP e quindi in 3DReshaper, tuttavia, vista la difficoltà nell'esportare dall'ambiente 3DReshaper i modelli matematici per procedere poi alla misurazione, si è optato per una loro implementazione da zero in ambiente Matlab.

Verranno ora descritti i principali aspetti derivanti da tale implementazione.

La nuvola di punti viene importata in ambiente Matlab attraverso una funzione base che legge valori numerici incasellati in file ASCII. Si ottiene una matrice di tre colonne, una per coordinata, e tante righe quanti sono i punti della NDP.

A questo punto è stata messa a punto una funzione che effettua le seguenti operazioni:

1. considero un campione di punti della NDP e prendo in considerazione ciascun punto in sequenza;
2. determina i punti della NDP interni ad una sfera centrata sul punto in esame e di raggio predefinito, per esempio 2 mm;
3. determina l'equazione della interpolante i punti interni alla sfera delle diverse feature elementari; eventuali feature che presentano problemi di interpolazione vengono scartate;
4. determina per ciascuna feature interpolata il numero totale di punti della NDP che si colloca entro una distanza prefissata;
5. ricalcola l'interpolante sui punti ottenuti al punto 4 e determina nuovamente il numero totale di punti della NDP che si colloca entro una distanza prefissata;
6. tra tutte le feature elementari interpolate, considera come migliore quella che interpola un numero maggiore di punti;
7. tra tutti i punti del campione, viene selezionato il punto e la feature elementare che interpola il maggior numero di punti;
8. la feature elementare identificata al punto 7 viene memorizzata, i punti ad essa appartenenti vengono eliminati dalla NDP;
9. se il numero di punti ancora contenuti nella NDP è sufficiente, il processo riparte dal punto 1, altrimenti termina.

In questa maniera, si ottiene per ogni NDP una lista di feature elementari interpolate che possono essere utilizzate come modelli geometrici di riferimento per la valutazione della bontà della scansione e per la verifica delle dimensioni del pezzo. Viene generato in automatico un file Excel di report, come ad esempio visibile in Tabella FGH.

Tabella 1.7. Feature elementari riconosciute per il pezzo 1

#	Tipo	Punti	%Punti	Raggio	x_0	y_0	z_0	μ_d	σ_d
1	Piano	146000	15,59%	0	1,78	28,27	30,98	0,000	0,037
2	Cilindro	137230	14,65%	30,11455	0,10	40,85	0,01	-0,025	0,066
3	Piano	121487	12,97%	0	0,62	29,11	-34,66	-0,004	0,049
4	Piano	83445	8,91%	0	-29,98	13,22	0,10	-0,001	0,036
5	Cilindro	50492	5,39%	14,89262	-0,14	40,96	0,01	0,053	0,066
6	Piano	44629	4,77%	0	-2,32	-24,76	-4,56	0,000	0,062
7	Piano	40646	4,34%	0	9,24	29,09	-23,70	0,000	0,058
8	Piano	32071	3,42%	0	10,96	-0,08	-0,65	0,028	0,059
9	Piano	30075	3,21%	0	1,73	-10,55	19,99	0,000	0,054
10	Cilindro	30487	3,26%	12,00251	0,00	40,84	0,15	-0,032	0,061
11	Piano	24977	2,67%	0	40,22	31,15	2,33	0,005	0,058
12	Piano	24200	2,58%	0	5,54	-11,45	-19,80	0,002	0,054

Nella tabella del file di report troviamo indicato, il numero della feature elementare, in ordine di importanza decrescente, il tipo di feature elementare, il numero di punti interpolati, la percentuale di punti interpolati sul totale della NDP, il raggio delle feature cilindriche - se applicabile, le coordinate x_0, y_0 e z_0 di un punto di sostegno della feature, la distanza media dei punti interpolati dalla feature e la deviazione standard delle distanze.

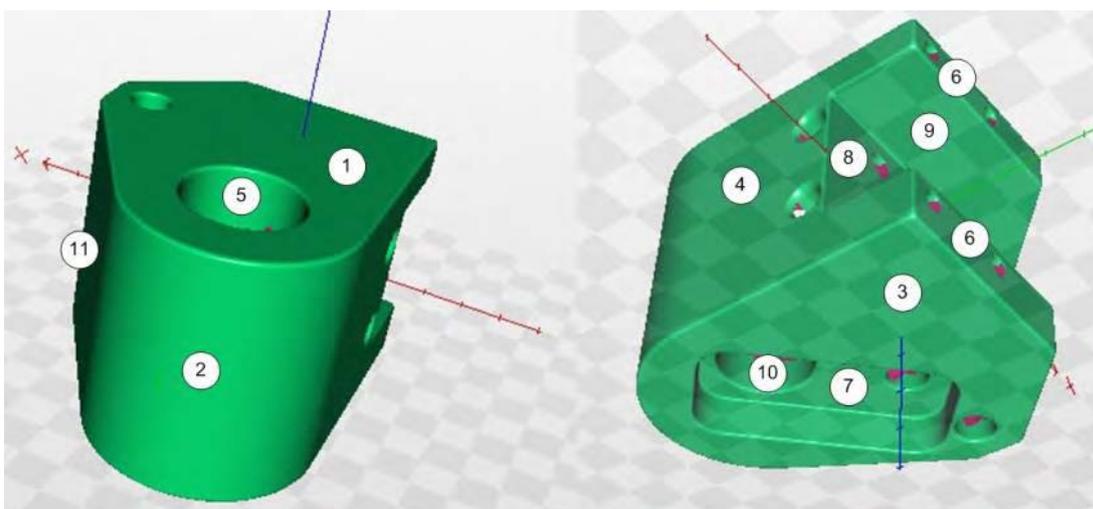


Figura 1.12. Pezzo 1, individuazione delle feature riconosciute - esempio

Tabella 1.8. Confronto applicabilità dei metodi per la misurazione

Pezzo	N quote		N quote misurabili - ottica		N quote misurabili - CMM	
	Totali	Toll.	Totali	Toll.	Totali	Toll.
1	47	15	12	9	47	15
2	27	9	6	6	27	18
3	20	12	6	4	20	12
4	45	18	34	18	20	15
5	6	4	6	4	6	4

Tabella 1.9. Risultati misurazioni per il pezzo 1

#Quota	Dimensione nominale	Specifica		Rilevato			CMM	Diff.
		Min	Max	Min	Med	Max		
1	66	65.50	66.00	65.69	65.70	65.71	65.76	+0.06
2	39.8	39.75	39.80		39.77		39.8	+0.03
3	11.1	11.00	11.10		10.99		11.03	+0.04
4	62			61.94	61.96	61.98	62.03	+0.07
5	35	34.95	35.05		34.93		34.99	+0.06
6	16				16.04			
7	30	29.90	30.10		30.00		30.00	0
8	32			31.89	31.92	31.95	32.04	+0.12
9	65.8	65.70	65.90		65.78		65.79	+0.01
10	80.5			80.38	80.39	80.49	80.48	+0.09
11	8				8.05			
12	45°				45.02°			
13	30°				29.97°			

14	24.8	24.75	24.8	24.73	24.74	24.74	24.78	+0.04
15	30	30	30.02		30,00		30.03	+0.03
16	11			10.96	10.99	11.01		
17	24	24	24.02		24.21		24.02	-0.19
18	10.2	10.2	10.3		10.21		10.29	+0.08

Tabella 1.10. Risultati misurazioni per il pezzo 2

#Quota	Dimensione nominale	Specifica		Rilevato			CMM	Diff.
		Min	Max	Min	Med	Max		
1	17.7	17.60	17.80	17.51	17.80	18.10	17.71	-0.09
2	4.5	4.40	4.60	4.52	4.72	4.92	4.49	-0.23
3	164.7	164.63	164.70		164.64		164.65	+0.01
4	152	152.00	152.10		151.48		151.98	+0.50
5	102.73	102.63	102.83		102.55		102.95	+0.40
6	92	92.00	92.10		92.08		92.07	-0.01
7	8.2				8.15		8.21	+0.06
8	12				11.70		11.99	+0.29

Tabella 1.11. Risultati misurazioni per il pezzo 3

#Quota	Dimensione nominale	Specifica		Rilevato			CMM	Diff.
		Min	Max	Min	Med	Max		
1	165.671	165.62	165.72		165.35			
2	33	33.00	33.02	32.41	32.83	33.25	33.20	+0.38
3	22.8			22.71	23.12	23.53	23.46	+0.34
4	16	16.00	16.10		12.36		12.34	-0.02
5	237				236.67		237.47	+0.80
6	232	231.94	232.00		232.04		232.60	+0.56
7	205				204.59		204.78	+0.19

Tabella 1.12. Risultati misurazioni per il pezzo 4

#Quota	Dimensione nominale	Specifica		Rilevato			CMM	Diff.
		Min	Max	Min	Med	Max		
1	38	38.00	38.02	37.99	38.00	38.01		
2	5			5.01	5.01	5.01	5.05	+0.04
3	20	19.99	20.01	20.00	20.00	20.00	20.05	+0.05
4	48°				47.81°			
5	150°				150.04°			
6	2	1.95	2.05		2.00		2.08	+0.08
7	8				7.95		7.97	+0.02
8	50	49.96	50.01	49.96	49.97	49.99	50.03	+0.06
9	8	8.00	8.03		7.95		7.98	+0.03
10	25				25.01			
11	25	10.96	11.01	24.88	24.90	24.93	24.93	+0.03
12	55.1				55.05			
13	44	12.90	13.10	44.04	44.06	44.08	44.17	+0.09
14	18				18.02			
15	23	22.97	23.00	23.08	23.09	23.11	21.25	+0.16
16	12	11.97	12.00	12.00	12.01	12.02		
17	4	4.00	4.10	3.95	3.97	3.99	4.02	+0.05
18	12.7				12.80			
19	48	47.99	48.01	48.00	48.01	48.01	48.17	+0.16
20	18	18.00	18.03		18.01			
21	22	21.95	22.05		22.01		22.02	+0.01
22	8				7.99			
23	8				7.97			
24	12.5	12.45	12.55		12.49		12.45	-0.04
25	8				7.98			
26	8				8.01			
27	8				8.03			
28	10	9.99	10.01	9.99	10.00	10.01	10.00	0
29	10	9.99	10.01	9.98	10.00	10.02	10.01	+0.01
30	45°				45.00°		45.01	+0.01
31	15	14.97	15.03		14.99		15.02	+0.03
32	5	4.99	5.00		5.00		5.02	+0.02
33	10				10.01		10.03	+0.02
34	10				9.98		10.02	+0.04

Tabella 1.13. Risultati misurazioni per il pezzo 5

#Quota	Dimensione nominale	Specifica		Rilevato			CMM	Diff.
		Min	Max	Min	Med	Max		
1	28	28.00	28.01		28.80		28.89	+0.09
2	52	51.95	52.05		51.80		51.84	+0.04
3	40	39.90	40.10		40.23		40.37	+0.15
4	20	19.95	20.05		19.96		19.95	-0.01
5	50				50.15		50.26	+0.11
6	50				50.18		50.27	+0.09

1.6 CONCLUSIONI

I principali aspetti dell'applicazione dei sistemi ottici/laser per la misurazione di pezzi meccanici risultano essere i seguenti:

1. la metodologia permette di ottenere rapidamente una nuvola di punti, anche relativamente densa, della superficie dell'oggetto. I tempi di acquisizione sono nettamente inferiori rispetto alle misurazioni effettuate mediante macchina di misura a coordinate - CMM;
2. con il sistema ottico è praticamente impossibile acquisire e quindi misurare parti interne al pezzo o cavità. In generale si è osservato che non è possibile misurare le pareti di cavità più profonde di circa 1/3 della larghezza inferiore. Con le macchine di misura a coordinate tale operazione è comunque difficoltosa in quanto spesso è necessario utilizzare tastatori specifici, ma comunque possibile nella maggior parte dei casi;
3. La metodologia di misura con il sistema ottico è basata sulla elaborazione della nuvola di punti - NDP mediante software specifici. Tali software sono in grado di ricostruire un modello a superfici a partire dalla NDP, ciò si basa sul riconoscimento degli elementi geometrici elementari che compongono la superficie. Mediante metodologie di geometria computazionale è quindi possibile, per costruzione, effettuare le misurazioni. Su tale principio si basa anche il sistema di misura della CMM, ma a differenza dell'altro metodo la misurazione viene fatta "a caldo" ovvero con la macchina CMM impegnata. Dal punto di vista economico, la soluzione ottica è preferibile, in quanto, una volta ottenuta la nuvola di punti, l'intera elaborazione può essere effettuata "a freddo" con un qualsiasi computer dotato del software di elaborazione.
4. La precisione delle scansioni ottiche è purtroppo insufficiente per molte applicazioni di certificazione di pezzi meccanici di precisione. In realtà le nuvole di punti sono nettamente meno precise rispetto l'accuratezza dello strumento, dichiarata pari a $\pm 30\mu\text{m}$ dal costruttore. Ciò è dovuto ad imprecisioni nell'allineamento delle viste per la ricostruzione della NDP complessiva ed al fatto che la condizione superficiale dell'oggetto può influenzare la misura. Si ritiene molto più realistica una accuratezza di $\pm 100\mu\text{m}$.
5. Nella maggioranza dei casi la misurazione fatta con la CMM risulta essere maggiore rispetto alla misurazione fatta con il sistema ottico, e nel 30% dei casi vi è una discordanza tra i due sistemi nella verifica di una dimensione.

Per tutte queste ragioni, il metodo ottico risulta alquanto inaffidabile e può essere applicato solo per la misurazione di pezzi grezzi o in fase intermedia di produzione.

2. METODOLOGIA PER LA CORREZIONE ADATTATIVA DEL MODELLO DI RIFERIMENTO

2.1 INTRODUZIONE

Micra srl è un'azienda di produzione di componenti meccanici di precisione. Il parco macchine utensili è così composto:

- Centro di lavoro a 5 assi DECKEL-MAHO DMU 60P, 18.000 g/min, corse 600x700x600 mm, 60 utensili, tastatore e laser per presetting
- Centro di lavoro a 5 assi DECKEL-MAHO DMU 70 eVolution, 18.000 g/min, corse 750x600x520 mm, 60 utensili, tastatore e laser per presetting completo di cambio pallet EROWA EASY a 6 posizioni.
- Centro di lavoro a 5 assi DECKEL-MAHO DMU 100U, 12.000 g/min, corse 1000x1250x1000 mm, 240 utensili, tastatore e laser per presetting completa di cambio pallet a 2 posizioni.
- Centro di lavoro SIGMA MISSION 3M, 12.000 g/min, corse 1000x650x685 mm, con 4°asse
- Centro di lavoro EMCO-FAMUP MC 75-50, 12.000 g/min, corse 750x500x640 mm
- Fresalesatrice a banco fisso FPT Space 2000, corse 2000x800x1250 mm, con testa automatica indexata, cambio utensile e 4°asse
- Tornio Universale CNC DMG CTX gamma 2000 TC con contromandrino, diametro di lavoro max. 680 mm. Lunghezza di lavorazione max. 2000 mm
- Tornio controllo numerico GRAZIANO GT 500M, diam. tornibile 540xL=1100 mm, 3500 g/min con utensili motorizzati, passaggio barra 80
- Tornio DMG CTX 310 V6, diam. tornibile 200xL=400 mm con contromandrino asse Y, passaggio barra 55
- 2 Torni autoapprendimento CMT tipo URSUS-PLUS, diam. tornibile 300xL=1500 mm

Dal confronto con l'azienda sono sorti alcuni problemi che riguardano il ciclo produttivo dei componenti. Si analizza ora il flusso logico di informazioni dettagliando i punti critici emersi.

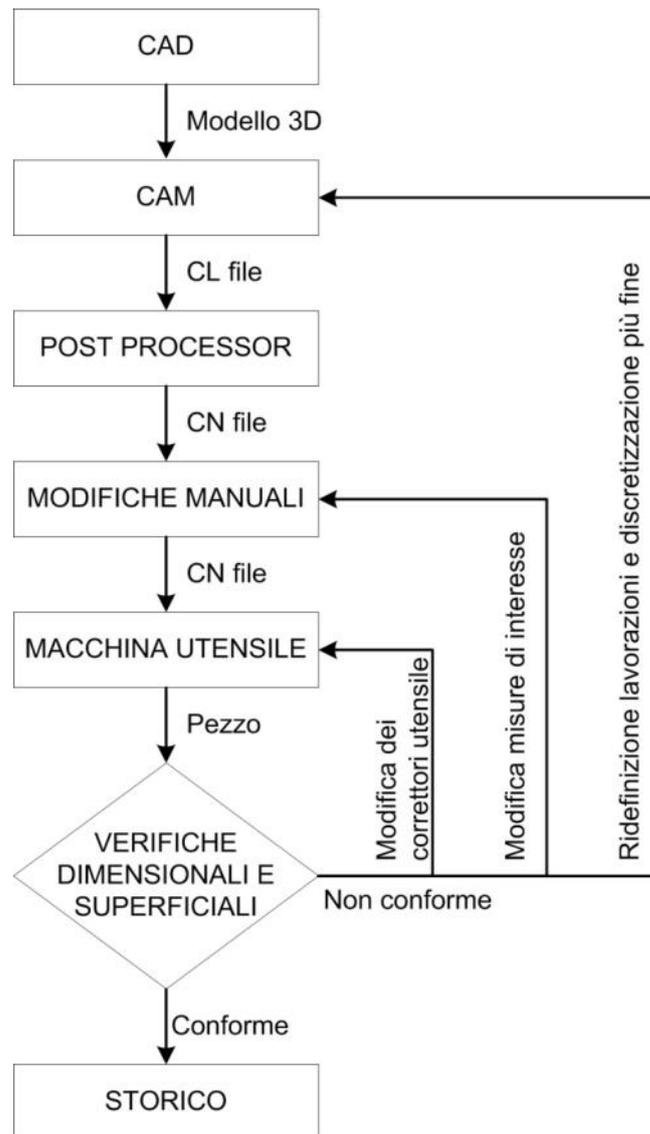


Figura 2.1. Flusso di informazioni riguardanti il prodotto in Micra srl.

2.2.1 MODELLI CAD

I principali lavori eseguiti da Micra srl sono effettuati su commissione, pertanto all'azienda viene fornito direttamente il disegno del pezzo da eseguire. Emerge che, indicativamente nella metà dei casi, dal committente è fornito un modello bidimensionale del pezzo mentre nell'altra metà è fornito un modello 3D in formato IGES. Per entrare nella catena di produzione come descritta in figura 2.1 si deve comunque avere come punto di partenza un modello solido, quindi, se necessario, viene disegnato internamente all'azienda e salvato in formato IGES per compatibilità con il resto dei lavori.

Occasionalmente capita che il modello del pezzo da produrre venga ridefinito dal cliente rispetto alla specifica concordata in fase contrattuale. Questo introduce delle problematiche organizzative rilevanti le quali, se non gestite correttamente, compromettono fortemente la qualità del pezzo da produrre. In particolare emerge che se le modifiche da parte del cliente non sono tempestivamente introdotte nella catena di produzione del pezzo si può arrivare a

produrre fisicamente un pezzo non conforme che deve essere eliminato che comporta una notevole perdita economica per la commessa.

2.2.2 CAM - POST PROCESSOR

Il software utilizzato per la fase CAM all'interno dell'azienda è HyperMILL della OPENMIND.

Questo CAM può essere integrato con diverse soluzioni CAD tra le quali si ha: hyperCAD, thinkdesign, SolidWorks ed infine Autodesk Inventor. I vantaggi che derivano da integrazioni con altri software CAD è la possibilità di poter utilizzare il CAM senza rinunciare al familiare ambiente di lavoro CAD. Inoltre per l'importazione dei dati da diversi sistemi CAD sono disponibili una serie di interfacce dirette e di interfacce standard. In particolare, le interfacce dirette consentono di importare dati in maniera affidabile da CATIA, Pro/ENGINEER, Unigraphics, Parasolid e SolidWorks. Inoltre sono disponibili per lo scambio di dati anche comuni interfacce standard quali IGES, STEP o STL. La figura 2.2 riassume le diverse possibilità d'integrazione.

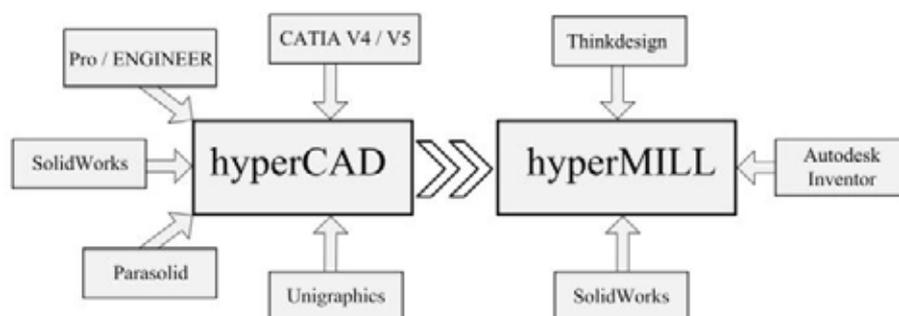


Figura 2.2. Integrazioni possibili con diversi sistemi CAD.

HyperMILL è una soluzione CAM completa, comprensiva di strategie 2D, incluse la tecnologia feature e il supporto di cicli di controllo. Nel campo 3D offre funzioni aggiuntive per l'ottimizzazione mirata dei programmi. La tecnologia a 5 assi mette a disposizione degli utenti numerosissime soluzioni per la lavorazione a 5 assi, dalla fresatura con inclinazione fissa all'indicizzazione automatica fino alla fresatura simultanea a 5 assi. Questa soluzione consente di ampliare le strategie 3D nonché la finitura per profilatura e la ripresa di materiale residuo in una lavorazione a 5 assi.

CICLI DUE ASSI

Per la programmazione di tipici cicli 2D sono disponibili le strategie per la spianatura, la contornatura, la lavorazione di tasche e la ripresa di materiale residuo, la foratura e la fresatura playback (gestione interattiva dell'utensile per il controllo delle collisioni con visualizzazione in tempo reale dell'asportazione di materiale). Inoltre la foratura è definibile come filettatura e maschiatura o come foratura profonda. In più è possibile combinare liberamente strategie di fresatura e tornitura in un unico programma. Per la tornitura sono presenti strategie di sgrossatura, finitura, lavorazione di gole, maschiatura e foratura. In figura 2.3 sono riportati alcuni esempi di lavorazioni 2D.

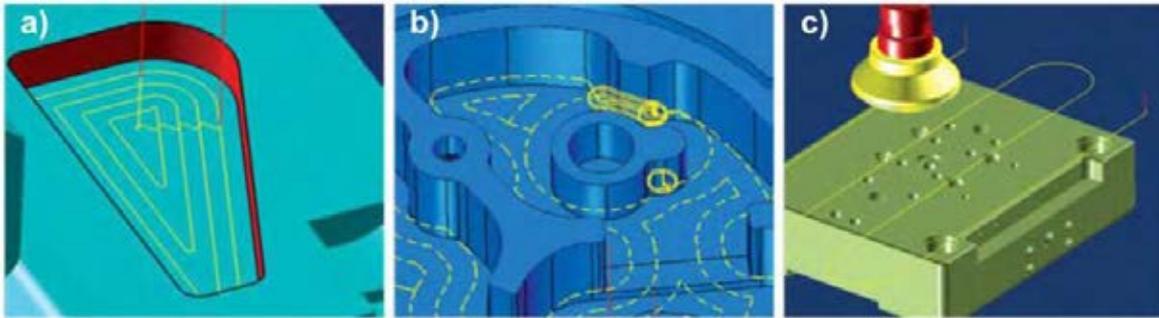


Figura 2.3. Esempi di lavorazioni 2D.

CICLI TRE ASSI

Nel campo 3D è disponibile una vasta gamma di strategie, dalla sgrossatura di qualsiasi pezzo grezzo alla finitura per profilatura e la finitura a Z costante, fino alla ripresa di materiale residuo e alle strategie speciali quali la finitura completa o la finitura a passate concentriche. Inoltre, ogni strategia dispone di funzionalità aggiuntive e di funzioni di ottimizzazione che consentono di impostare ogni lavorazione individualmente in base alle esigenze specifiche. La funzione di controllo e prevenzione delle collisioni garantisce la sicurezza dei processi. In figura 2.4 sono riportati degli esempi di lavorazioni 3D.

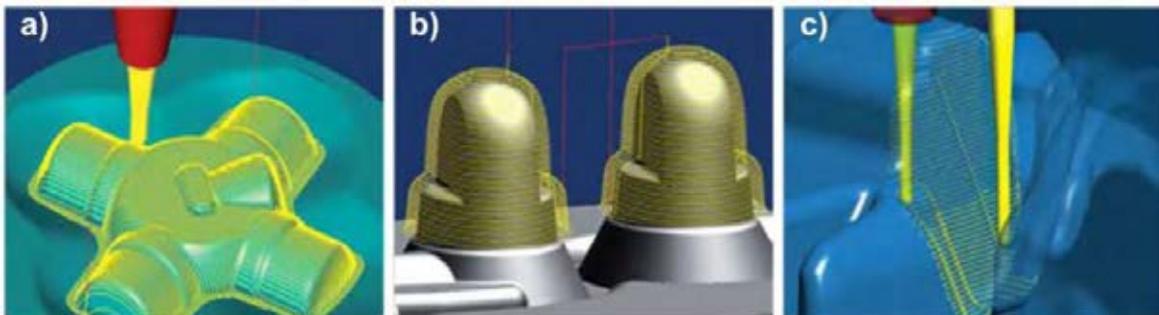


Figura 2.4. Esempi di lavorazioni 3D.

CICLI CINQUE ASSI

Per quanto riguarda le lavorazioni a 5 assi, a seconda del tipo di lavorazione richiesto e della cinematica della macchina è possibile selezionare la lavorazione a 5 assi ottimale tra diverse strategie di incidenza a 5 assi: la fresatura con incidenza fissa 3+2, l'indicizzazione automatica e la lavorazione simultanea a 5 assi. Come strategie a 5 assi sono disponibili anche la sgrossatura, la finitura per profilatura, la finitura a Z costante o la finitura a passate concentriche. Inoltre è disponibile una serie di cicli speciali a 5 assi quali la fresatura frontale, la fresatura a creatore o la lavorazione taglio bordo.

Il prerequisito fondamentale per una lavorazione a 5 assi sicura è l'affidabilità delle funzioni di controllo e prevenzione delle collisioni. Per svolgere tale compito questo software calcola in maniera completamente automatica l'inclinazione ed il posizionamento degli utensili. Inoltre, l'ottimizzazione delle inclinazioni degli utensili migliora le condizioni di taglio. Con il posizionamento automatico, i percorsi utensile vengono suddivisi in modo completamente

automatico in singoli segmenti con inclinazione fissa dell'utensile. I movimenti simultanei a 5 assi vengono eseguiti solo tra un segmento e l'altro. Ciò consente di eseguire, ad esempio, una ripresa del materiale residuo che comprende, in un'unica operazione, varie numerose aree di fresatura con inclinazioni diverse, ottenendo tempi di programmazione più brevi, lavorazione rapida e superfici di ottima qualità. In figura 2.5 viene riportato un esempio di lavorazioni 5D.

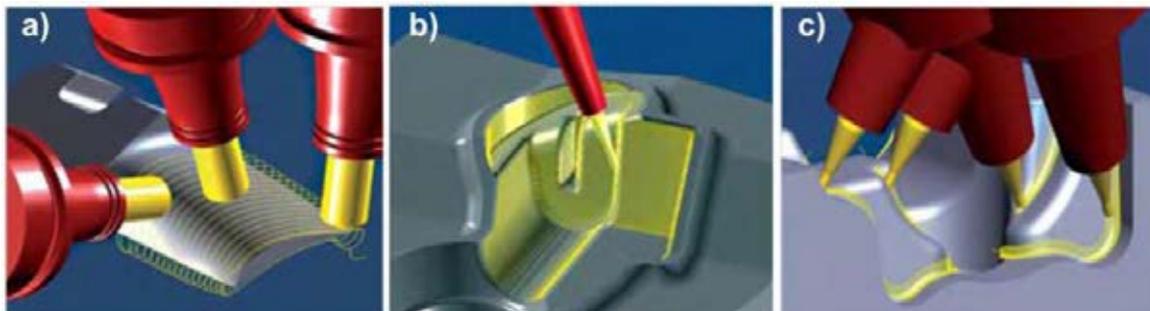


Figura 2.5. Esempi di lavorazioni 5D.

Micra srl, come specificato nel precedente paragrafo, ha a disposizione i disegni in formato IGES forniti dai committenti come punto di partenza del flusso di informazioni relative al prodotto. Essi vengono importati in ambiente HyperCAD - HyperMILL attraverso il modulo di importazione di geometrie tridimensionali.

Emerge che, in alcuni casi, il programmatore non conosce l'esatta geometria di particolari tipi di utensile perché essa non è esplicitamente dichiarata dal costruttore. La maggior parte dei casi questo avviene per frese ad alto avanzamento per le quali la forte spinta di mercato costringe i costruttori a mantenere il più possibile segreto ogni dettaglio che potrebbe permettere i concorrenti di riprodurre il loro prodotto. Ciò pregiudica fortemente la lavorazione poiché non è sempre noto il sovrametallo residuo dalle operazioni per le quali si utilizzano tali utensili. In questi casi c'è il forte rischio di collisioni e non conformità del pezzo da eseguire.

La fase di post processing del file CL è gestita in modo piuttosto accorto. In particolare sono presenti in azienda diversi post processor per le diverse macchine utensili presenti. In particolare è presente un post processor per ogni macchina utensile.

Nonostante ciò il programmatore è comunque costretto a effettuare delle piccole modifiche ai file CN per le fasi di carico e scarico pezzo e cambio utensile automatico. Questo comporta un notevole dispendio di tempi di programmazione della lavorazione e nello stesso tempo introduce un'intrinseca probabilità di errore umano.

2.2.3 MESSA IN MACCHINA

Nella fase di messa in macchina dei file CN è necessario predisporre la macchina utensile alla lavorazione. In particolare l'operazione che crea la maggiore possibilità d'errore è la definizione dei correttori utensile. Normalmente essi dovrebbero essere misurati esternamente in reparti appositi (tool room) ed assegnati nella macchina utensile nel momento in cui l'utensile è caricato in macchina.

Spesso capita, per svariate cause (per esempio la sostituzione dell'utensile in macchina causa rottura), che ci siano delle discordanze tra l'effettiva misura dell'utensile e la misura impostata in macchina. Ciò comporta, nel migliore dei casi, una non qualità del prodotto finale ma si può arrivare fino alla rottura utensile o collisione di organi della macchina se le misure impostate si discostano fortemente dalle misure reali.

2.2.4 CORREZIONE DEGLI ERRORI DIMENSIONALI

Per lavorazioni complesse e che richiedono un'elevata precisione del prodotto finito, il programma elaborato dal CAM non è sufficiente a garantire i requisiti di qualità richiesti.

Spesso capita che i pezzi realizzati in prima istanza siano da considerarsi non conformi e quindi si deve agire sulla lavorazione per correggere alcuni parametri di lavorazione. In alcuni casi emerge che la causa d'errore principale è da attribuirsi ad alcune frese snelle, necessarie per la lavorazione, che risentono particolarmente delle forze di taglio alle quali sono sottoposte le quali si flettono pregiudicando fortemente la lavorazione

Le principali metodologie utilizzate per correggere gli errori sui pezzi finiti sono le seguenti: (figura 2.1)

- Modifica dei correttori utensile direttamente in macchina. Nel caso in cui si presenti un errore dimensionale costante su tutta la superficie del pezzo molto probabilmente esso è dovuto ad un'errata definizione dei correttori utensile.
- Modifiche manuali sui file CN. Nel caso in cui ci siano delle superfici fuori misura, si può andare a correggere le singole righe del file CN in cui sono contenuti i percorsi utensile per eseguire quelle superfici
- Modifiche alle definizioni delle lavorazioni. Se il problema è piuttosto marcato, si deve agire direttamente sul calcolo delle traiettorie del CAM eventualmente definendo profondità di passata e modalità di o addirittura percorsi utensile ripetuti per essere sicuri che tutto il materiale da asportare sia lavorato.

Tutte le soluzioni adoperate per risolvere i problemi di non qualità pregiudicano fortemente tempo (costo) di lavorazione del prodotto. Esse hanno anche una forte ricaduta sull'esperienza che deve avere l'operatore per eseguire il manufatto poiché deve saper gestire contemporaneamente tutte queste modalità di correzione degli errori. Ne risulta che l'approccio adoperato è particolarmente oneroso dal punto di vista economico e non garantisce comunque la buona riuscita del processo produttivo.

Nel seguente paragrafo verrà presentato un metodo che vuole sostituire tutte le operazioni manuali di correzione intrinsecamente aleatorie e perfettibili.

2.3 METODOLOGIA PROPOSTA

Per ovviare a tutte le metodologie utilizzate per risolvere gli errori dimensionali di pezzi ad elevata precisione si propone il seguente metodo automatico di correzione delle traiettorie utensile. Figura 2.6

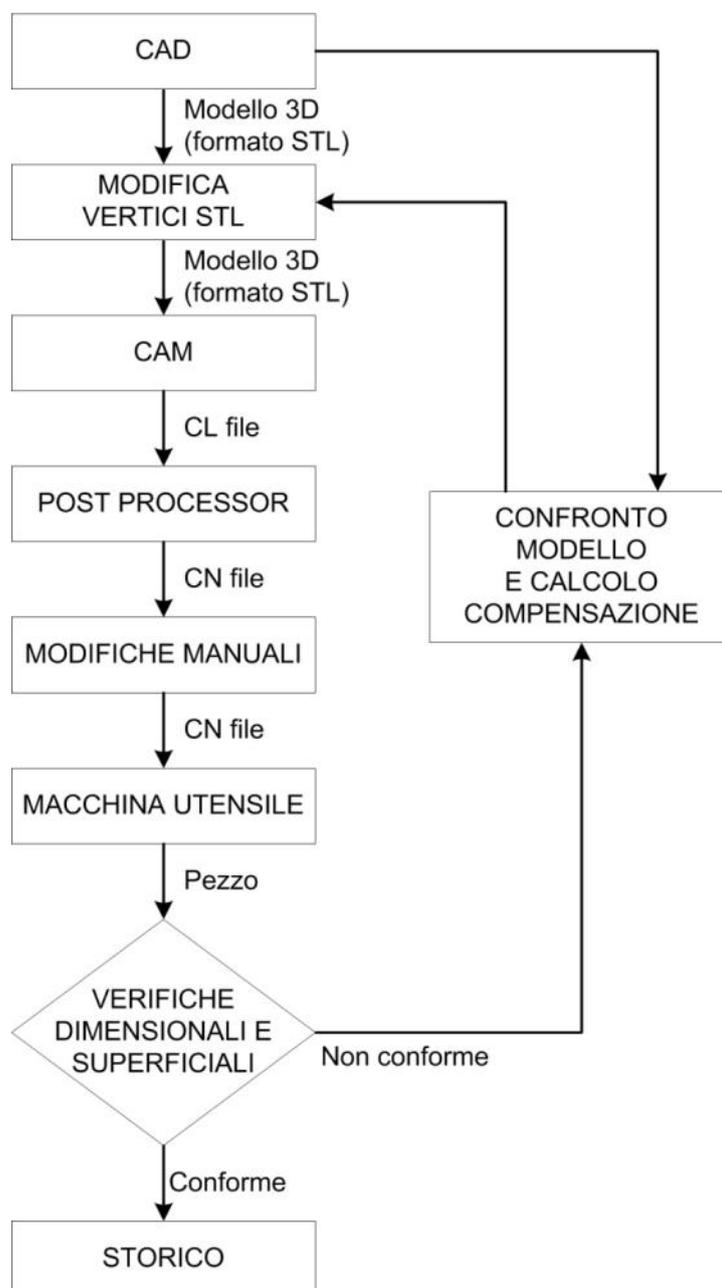


Figura 2.6 Flusso di informazioni riguardanti il prodotto proposto nel seguente lavoro.

L'algoritmo proposto intende correggere gli errori dimensionali misurati a seguito della lavorazione del primo pezzo del lotto, indipendentemente da che fonte di errore li ha generati. In particolare esso agisce direttamente sulla geometria del modello che è fornita in output dal modellatore CAD.

Il principio che sta alla base dell' algoritmo proposto è il confronto tra la geometria del pezzo che si vuole ottenere ed la misurazione del pezzo che, nelle condizioni operative presenti, viene eseguito. Nel caso ci siano discrepanze tra le due informazioni si va a modificare la geometria del modello iniziale in modo da creare un secondo modello fittizio che introdotto all'interno della fase CAM permette di calcolare delle traiettorie utensili compensate in grado ovviare alle cause degli errori dimensionali indipendentemente da dove esse si presentino.

Le fasi principali del metodo sono le seguenti:

- Generazione del modello in formato STL opportunamente infittito
- Elaborazione delle informazioni derivanti dalla misurazione tramite nuvola di punti
 - Rilevamento punti di interesse
 - Calcolo dei vettori normali alla superficie locale
 - Calcolo dei piani interpolanti la nuvola di punti locale
 - Calcolo del vettore distanza
- Ridefinizione del modello
 - Calcolo tramite FEM dei vettori compensazione
 - Applicazione dei vettori deformazione al modello STL
- Aggiornamento del modello interno al software CAM

2.3.1 GENERAZIONE DEL MODELLO

L'algoritmo di correzione degli errori dimensionali richiede che il modello tridimensionale sia stato descritto in formato STL per poter intervenire sulla geometria e modificarla per punti di controllo (come sarà descritto nel paragrafo seguente). Il formato STL rappresenta un solido la cui superficie è stata discretizzata in triangoli. Il file, quindi, è strutturato in un database di coordinate (X,Y,Z) dei vertici dei triangoli e di vettori indicanti la normale uscente di ogni triangolo.

Per compatibilità con i formati di modelli che normalmente gestisce l'azienda è necessario avere a disposizione uno strumento di conversione di modelli solidi. Per questa esigenza è sufficiente utilizzare il modulo di importazione ed esportazione di modelli solidi di HyperCAD per la conversione da formato IGES in modelli formato STL.

In figura 2.7-b si può un esempio di modello STL dove sono evidenziati i bordi dei triangoli componenti la superficie.

Il modellatore solido, in fase di conversione da IGES a STL, limita il massimo errore cordale di discretizzazione del modello, infatti, si può notare la dimensione dei triangoli componenti la superficie è variabile in funzione della curvatura locale.

Per controllare con adeguata accuratezza anche i piani che compongono la superficie del pezzo, è necessario infittire la mesh del modello.

Per fare ciò si è implementato un algoritmo di ridefinizione dei file STL scritto in ambiente MATLAB. In particolare si è pensata una funzione ricorsiva di suddivisione dei triangoli aventi un lato eccessivamente lungo in diversi triangoli con lato di misura inferiore ad una soglia

prefissata. Variando la dimensione massima consentita dei triangoli componenti la mesh si è può controllare la definizione del modello STL.

In figura 2.7-c è raffigurato il modello STL ridefinito nel quale è stata imposta a 3 mm la massima dimensione dei lati dei triangoli componenti la superficie. Si nota da subito che il numero di vertici dei triangoli è notevolmente aumentato, questo avrà delle ricadute fondamentali in fase di ridefinizione del modello.

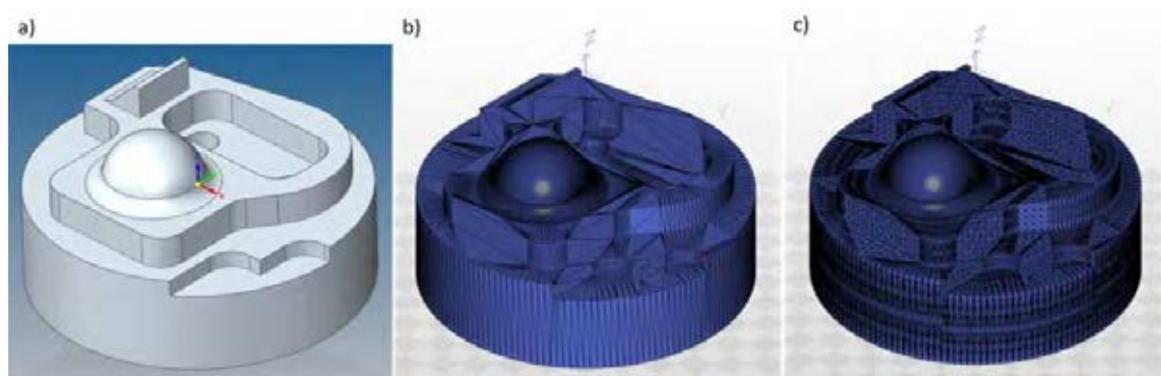


Figura 2.7. a) Modello salvato in formato IGES; b) Modello salvato in formato STL; c) Modellosalvato in formato STL opportunamente infittito.

Il modello ridefinito è predisposto dunque ad essere importato come geometria di riferimento per la generazione delle traiettorie in HyperMILL e successivamente per essere modificato con l'algoritmo proposto nel seguente lavoro.

2.3.2 ELABORAZIONE DELLA NUVOLA DI PUNTI

L'algoritmo presentato è stato scritto in ambiente MATLAB, si omettono per chiarezza espositiva i dettagli tecnici di implementazione per concentrarsi sulla logica di calcolo.

Tramite funzioni di lettura di file STL si carica in memoria il modello del pezzo che si desidera modificare.

Per mantenere la continuità della superficie del modello anche dopo la ridefinizione della posizione dei vertici si è implementata una funzione che permette di unire logicamente i vertici dei triangoli consecutivi. Il file STL salvato nella memoria del computer definisce tutti i triangoli autonomamente quindi i vertici comuni di triangoli successivi sono rindondanti. Senza questa ridefinizione si potrebbero creare delle superfici incomplete o ancora peggio delle superfici autointersecanti.

Importata la geometria, è necessario caricare in memoria la nuvola di punti derivata dalla misurazione del pezzo fisico. Per fare ciò si adoperano delle comuni procedure di lettura di file di testo. In figura 2.8 è visualizzato un esempio di modello solido con la nuvola di punti sovrapposta. Si può notare in alcuni punti (per esempio in prossimità dello spigolo nella zona centrale) che il pezzo fisico, rappresentato dalla sua misurazione con la nuvola di punti, si

discosta dal modello teorico del file STL, ci si aspetta, quindi, che l'algoritmo di comparazione della nuvola di punti con il modello evidenzi questo scostamento.

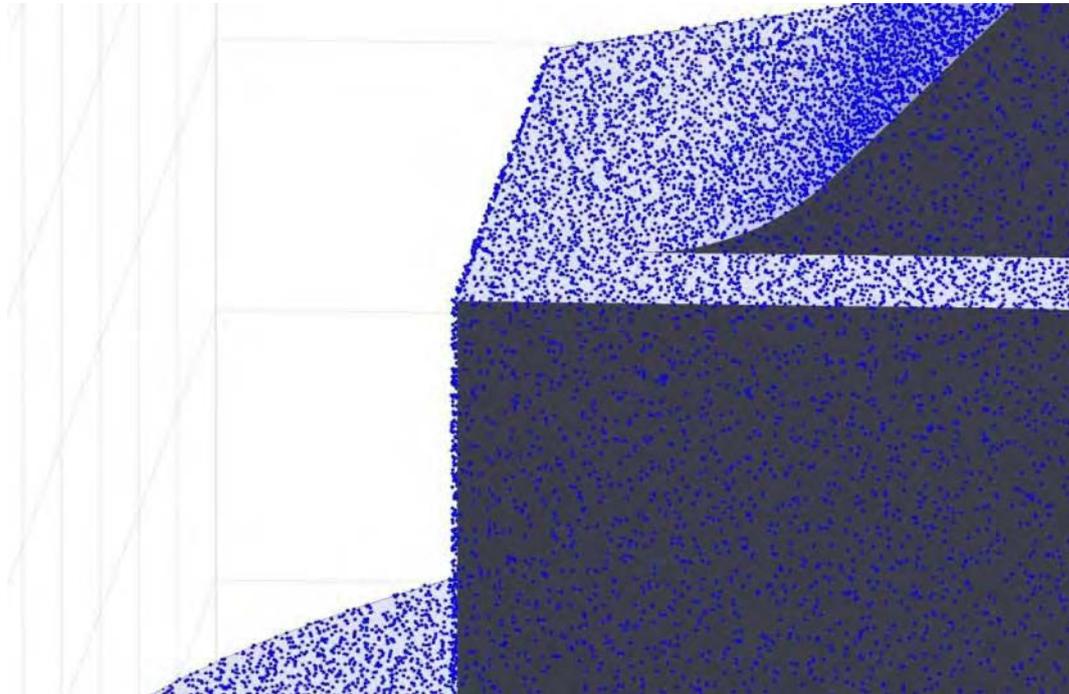


Figura 2.8. Dettaglio del modello con sovrapposta la nuvola di punti.

Per la ridefinizione dei vertici dei triangoli si procede automaticamente ad effettuare le operazioni descritte nei paragrafi seguenti per ogni vertice dell'STL di partenza.

RILEVAMENTO DEI PUNTI DI INTERESSE DELLA NUVOLA DI PUNTI

Per calcolare la distanza tra il vertice preso in considerazione e la nuvola di punti si considerano solamente i punti della nuvola contenuti in una sfera di raggio unitario. Per fare ciò si deve calcolare la distanza tra il vertice considerato e tutti i punti della nuvola e selezionare quelli con distanza inferiore a quella data.

In figura 2.9 si può notare un esempio del risultato di questa operazione per il vertice che verrà preso come riferimento per la descrizione dell'algoritmo. I punti evidenziati in rosso saranno gli unici ad essere considerati per l'elaborazione del vertice dell'STL considerato.

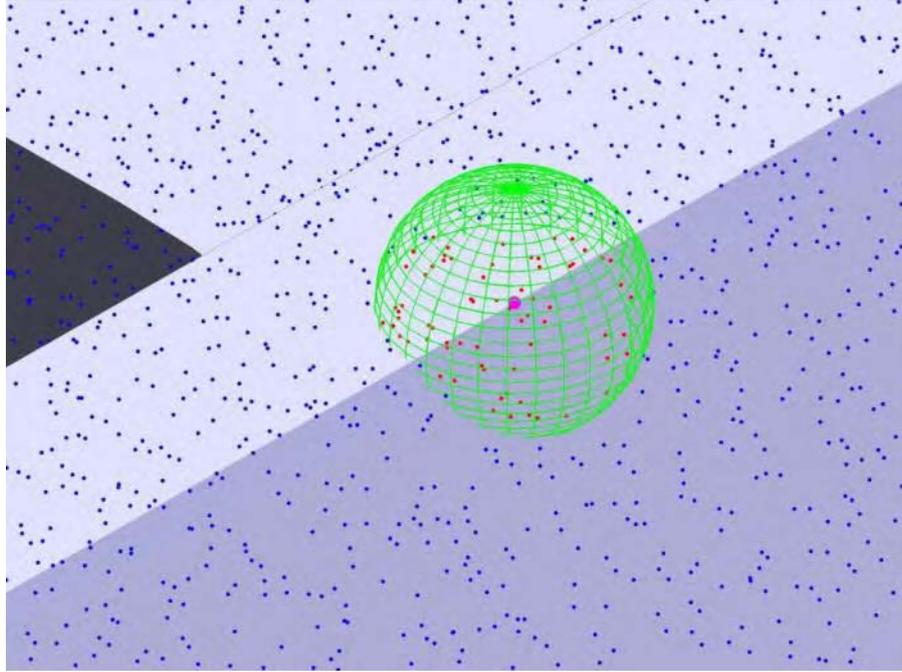


Figura 2.9. Punti di interesse della nuvola di punti.

RICONOSCIMENTO SUPERFICIE LOCALE

Per il vertice considerato si selezionano tutti i triangoli a cui quel vertice appartiene e si calcolano i vettori normali alle superfici dei piani dei triangoli.

Si vanno quindi a dividere i vettori ottenuti in famiglie di vettori aventi direzione uguale. In questo modo si definiscono i vettori che rappresentano le normali alla superficie locale del modello considerato.

In figura 2.10 si notano i triangoli che hanno in comune il vertice considerato e le loro normali uscenti. In questo caso si vengono a formare due insiemi di vettori con direzione uguale.

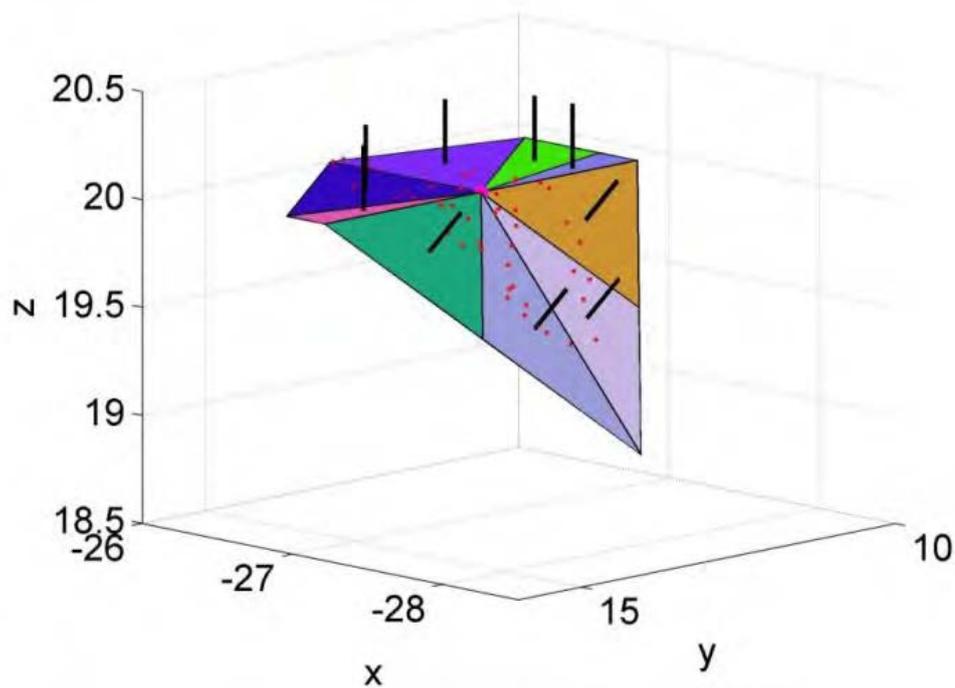


Figura 2.10. Geometria locale al punto considerato.

IDENTIFICAZIONE PIANI INTERPOLANTI

Per il calcolo della distanza tra il vertice e la nuvola di punti si devono identificare i piani interpolanti la nuvola di punti locale. Considerando gli insiemi di versori calcolati in precedenza, si identificano tramite regressione lineare i piani interpolanti perpendicolari ad ogni famiglia di versori.

Per il calcolo effettivo si considerano tutti i piani (aventi normale fissata) passanti per i singoli punti della nuvola di punti locale e si selezionano i piani che contengono il maggior numero degli altri punti considerati.

In questo modo si identifica un'insieme di piani avente numerosità pari alla numerosità dell'insieme di versori locali.

In figura 2.11 sono riportati i piani interpolanti identificati per il vertice in esame.

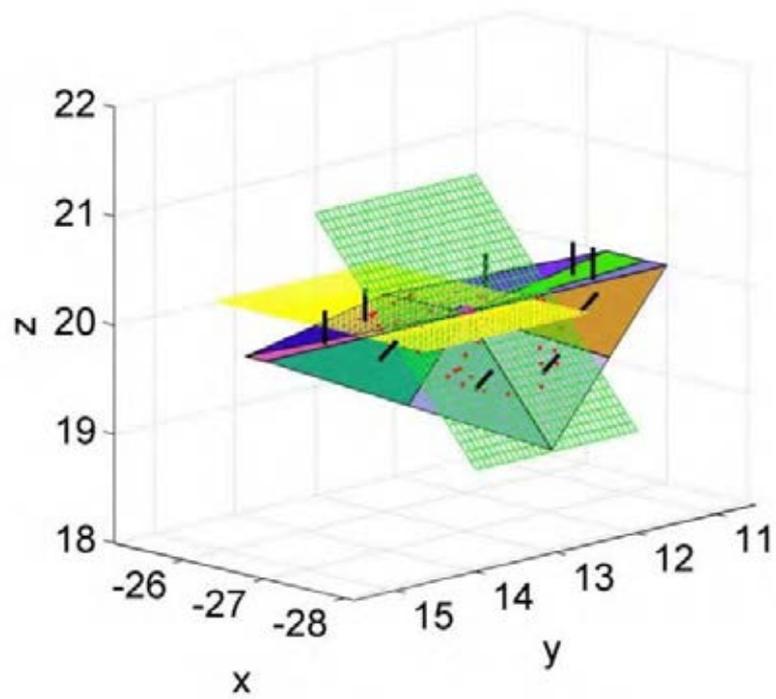


Figura 2.11. Piani interpolanti la nuvola di punti locale.

Si nota in figura 2.12 che effettivamente i piani identificati descrivono con accuratezza la geometria locale del modello.

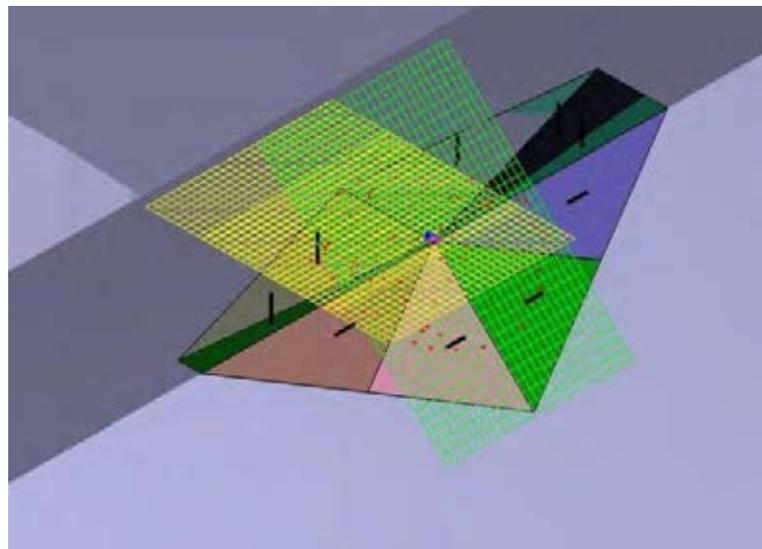


Figura 2.12. Piani interpolanti la nuvola di punti locale sovrapposti al modello solido.

CALCOLO DISTANZA TRA MODELLO E NUVOLA DI PUNTI

Si calcola ora il vettore distanza tra il vertice del modello considerato e nuvola di punti. Si procede dunque a definire la direzione del vettore distanza attraverso alcune considerazioni geometriche e il suo modulo attraverso calcoli matematici.

Per quanto riguarda l'implementazione è necessario differenziare il calcolo in base alla numerosità dell'insieme di piani.

SINGOLO PIANO INTERPOLANTE

In questo caso il vettore distanza ha direzione fissata dalla normale al piano interpolante e modulo definito dalla semplice distanza punto-piano nello spazio

DUE PIANI INTERPOLANTI

Nel caso in cui i due piani non siano coincidenti (per il quale si ricadrebbe nel caso precedente) per il calcolo del vettore distanza si procede preliminarmente a calcolare la retta intersezione dei due piani mettendo a sistema le equazioni dei piani interpolanti, successivamente si calcola il vettore distanza tra la retta nello spazio ed il vertice dell' STL considerato. Il vettore distanza avrà modulo pari alla distanza retta-punto nello spazio e direzione ortogonale al versore della retta e passante per il vertice dell'STL.

TRE PIANI INTERPOLANTI

Nel caso in cui la geometria locale sia definita da tre piani interpolanti distinti, si può calcolare il vettore distanza semplicemente come differenza vettoriale tra il vertice dell'STL e il punto di intersezione dei tre piani interpolanti

PIANI INTERPOLANTI MAGGIORI DI TRE

Se si presenta una geometria locale con un numero di piani interpolanti maggiore di tre si deve ricorrere al calcolo del baricentro dei punti intersezione di tutte le combinazioni di tre piani interpolanti non coincidenti. In questo modo si è definito il punto medio delle intersezioni dei piani interpolanti che è utilizzato direttamente per il calcolo del vettore distanza tramite una semplice differenza vettoriale rispetto al vertice del modello STL.

A conclusione dell'algoritmo fin qui descritto, si ottengono tanti vettori distanza quanti sono i vertici dell'STL di partenza. In figura 2.13 un esempio di vettori distanza calcolati.

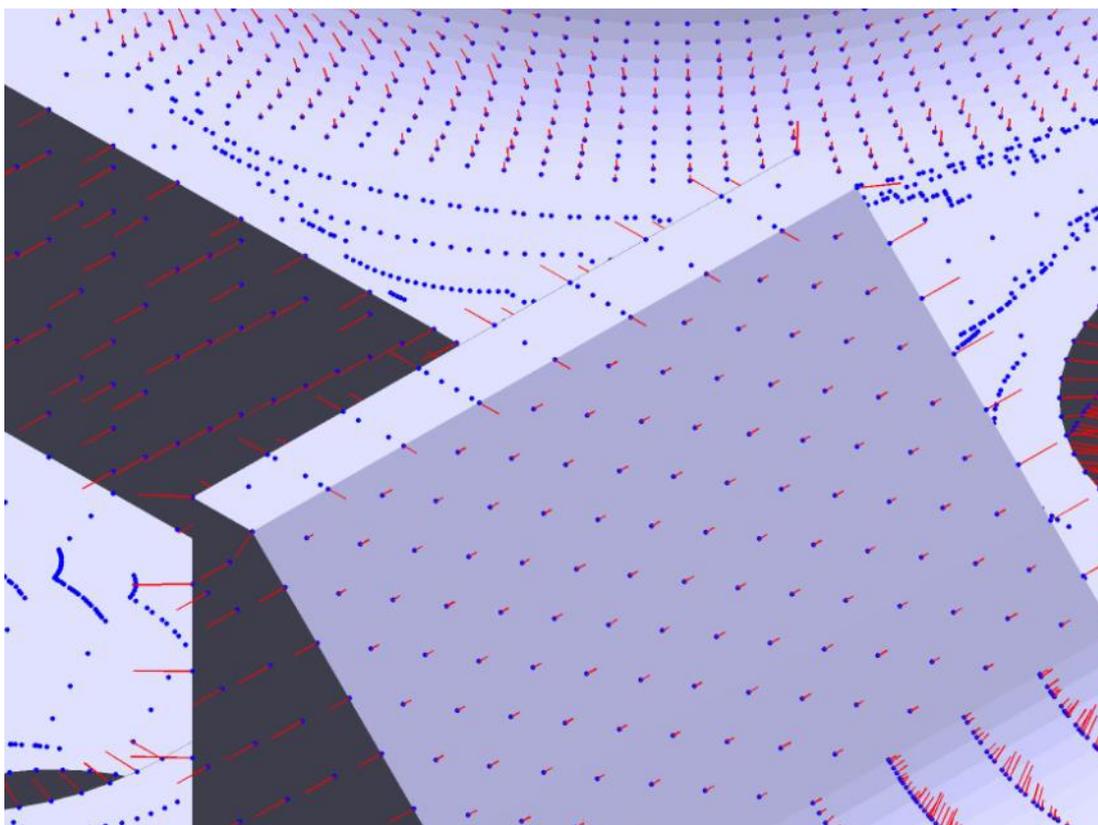


Figura 2.13 Vettori distanza dei vertici del file STL.

2.3.3 RIDEFINIZIONE DEL MODELLO

Per la ridefinizione della geometria è stato applicato un modello agli elementi finiti (FEM) per calcolare le deformazioni da imporre ai vertici dell'STL.

In particolare (Figura 2.14) si sono rappresentati i triangoli del file STL come una struttura reticolare avente delle travi al posto dei lati dei triangoli (costante elastica k_t). I vertici sono stati modellati come vincoli cedevoli della struttura (costante elastica k_v) ai quali è stata applicata una deformazione imposta u_{imp} .

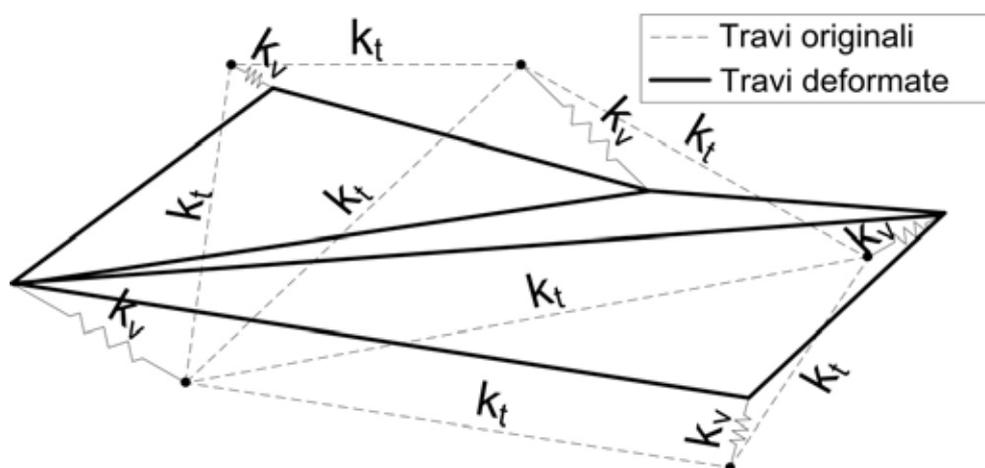


Figura 2.14 Struttura reticolare.

Per calcolare le matrici di rigidezza del sistema si deve applicare il principio di sovrapposizione degli effetti per tutte le travi che compongono il sistema.

Si riporta il modello di calcolo per la singola trave (Figura 2.15).

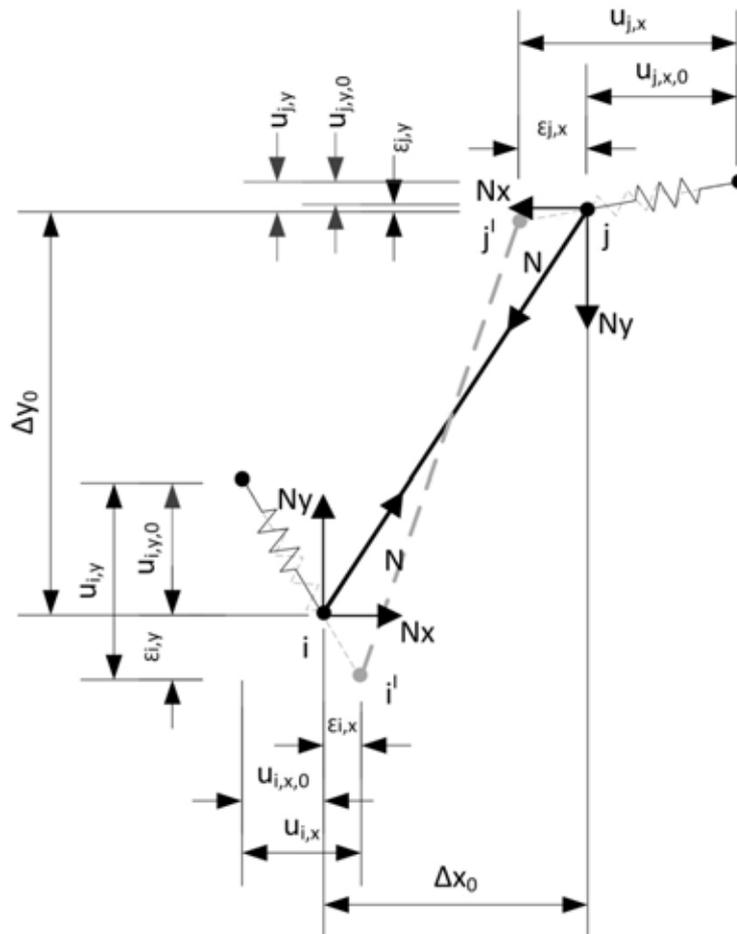


Figura 2.15. Deformazione singola trave.

Si definisce la posizione assoluta dei nodi i e j

$$i = \begin{cases} x = i_{x,0} + \varepsilon_{i,x} \\ y = i_{y,0} + \varepsilon_{i,y} \\ z = i_{z,0} + \varepsilon_{i,z} \end{cases} \quad j = \begin{cases} x = j_{x,0} + \varepsilon_{j,x} \\ y = j_{y,0} + \varepsilon_{j,y} \\ z = j_{z,0} + \varepsilon_{j,z} \end{cases} \quad (2.1)$$

mentre, per il generico nodo si ha che

$$\begin{cases} u_x = u_{x,0} + \varepsilon_x \\ u_y = u_{y,0} + \varepsilon_y \\ u_z = u_{z,0} + \varepsilon_z \end{cases} \quad (2.2)$$

Le lunghezze della trave a riposo e caricata si può esprimere come

$$l_0 = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (2.3)$$

ed

$$l = \sqrt{(\Delta x + \varepsilon_x)^2 + (\Delta y + \varepsilon_y)^2 + (\Delta z + \varepsilon_z)^2} \quad (2.4)$$

Si calcola ora l'equazione di equilibrio della trave nella quale sono applicate le forze derivanti dalla trazione (N) della trave e le forze derivanti dal vincolo elastico (V):

$$F = \sum_{i=0}^m N + V \quad (2.5)$$

Si può dunque scomporre la forza nelle tre componenti parallele agli assi cartesiani e, ad esempio per l'asse x , si ha che:

$$F_x = k_t \sum_{i=0}^m \frac{\Delta x_i}{l_i} (l_i - l_{i,0}) + k_v (j_x - j'_x) \quad (2.6)$$

La precedente equazione non è lineare e quindi si può approssimarla attraverso l'espansione in serie di Taylor troncata al primo ordine, quindi

$$F_x \cong F_x(0) + \sum_{i=0}^m \frac{\partial F_x}{\partial x_i} \Big|_0 dx_i \quad (2.7)$$

dove

$$F_x(0) = k_v u_{x,0} \quad (2.8)$$

ed

$$\sum_{i=0}^m \frac{\partial F_x}{\partial x_i} = \sum_{i=0}^m k_t \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\Delta x_i}{l_i} (l_i - l_{i,0}) \right) + k_v \quad (2.9)$$

Supponendo che si eseguano solo piccoli spostamenti in confronto alle lunghezze delle travi si può approssimare la precedente equazione attraverso l'uguaglianza

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\Delta x_i}{l_i} (l_i - l_{i,0}) \right) \cong \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\Delta x_{i,0}}{l_{i,0}} (l_i - l_{i,0}) \right) \quad (2.10)$$

Si procede quindi al calcolo della derivata come segue

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\Delta x_{i,0}}{l_{i,0}} (l_i - l_{i,0}) \right) = \frac{\Delta x_{i,0}}{l_{i,0}} \left(\frac{1}{2} \frac{2(x_i - x_j)}{l_i} \right) \quad (2.11)$$

Essa deve essere valutata nella condizione iniziale per Eq 2.7

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\Delta x_{i,0}}{l_{i,0}} (l_i - l_{i,0}) \right) = \frac{\Delta x_{i,0}^2}{l_{i,0}^2} \quad (2.12)$$

Analogamente per le altre coordinate si ha che

$$\frac{\partial}{\partial y_i} \left(\frac{\Delta x_{i,0}}{l_{i,0}} (l_i - l_{i,0}) \right) = \frac{\Delta x_{i,0} \Delta y_{i,0}}{l_{i,0}^2} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial z_i} \left(\frac{\Delta x_{i,0}}{l_{i,0}} (l_i - l_{i,0}) \right) = \frac{\Delta x_{i,0} \Delta z_{i,0}}{l_{i,0}^2} \quad (2.14)$$

Definendo la generica matrice

$$\Delta = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_0^2}{l_0^2} & \frac{\Delta x_0 \Delta y_0}{l_0^2} & \frac{\Delta x_0 \Delta z_0}{l_0^2} \\ \frac{\Delta x_0 \Delta y_0}{l_0^2} & \frac{\Delta y_0^2}{l_0^2} & \frac{\Delta y_0 \Delta z_0}{l_0^2} \\ \frac{\Delta x_0 \Delta z_0}{l_0^2} & \frac{\Delta y_0 \Delta z_0}{l_0^2} & \frac{\Delta z_0^2}{l_0^2} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

E definendo i vettori degli spostamenti

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_i \\ \varepsilon_j \end{bmatrix} \quad u_0 = \begin{bmatrix} u_{0,i} \\ u_{0,j} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

si può riscrivere l'Equazione 2.5 in forma matriciale come segue

$$k_t \begin{bmatrix} \Delta_i & -\Delta_i \\ -\Delta_j & \Delta_j \end{bmatrix} \varepsilon - k_v I \varepsilon + k_v I u_0 = 0 \quad (2.17)$$

che può essere risolta nella seguente forma

$$\varepsilon = \left(k_t \begin{bmatrix} \Delta_i & -\Delta_i \\ -\Delta_j & \Delta_j \end{bmatrix} - k_v I \right)^{-1} \cdot (-k_v I u_0) \quad (2.18)$$

Ottenendo in questo modo gli spostamenti dei vertici della trave a fronte dello spostamento iniziale imposto.

Per passare alla struttura reticolare complessiva si deve dunque applicare il principio di sovrapposizione degli effetti a tutti i lati dei triangoli che compongono il modello STL considerato. Si può dimostrare che la matrice di rigidità risulterà una matrice sparsa dove gli unici elementi diversi da zero sono gli elementi che descrivono le travi che condividono lo stesso vertice. Il calcolo quindi della matrice inversa risulterà quindi computazionalmente semplificato.

A questo punto si può calcolare la posizione del nuovo vertice del file STL come combinazione lineare di deformazione imposta e deformazione ricavata dal calcolo FEM. Equazione 2.19

$$P_{new} = P_0 - k_1 u_0 - k_2 \varepsilon_{FEM} \quad (2.19)$$

Per ridefinire il modello STL di partenza è sufficiente dunque applicare uno spostamento dei vertici pari all'opposto del vettore distanza calcolato in precedenza. in questo modo la geometria ridefinita compenserà gli errori che sono stati rilevati dalla misura del pezzo.

In figura 2.15 un esempio di ridefinizione della geometria, in questo caso tutti i vettori distanza sono usciti dal modello quindi nuova geometria risulta dimensionalmente più piccola rispetto all'originale.

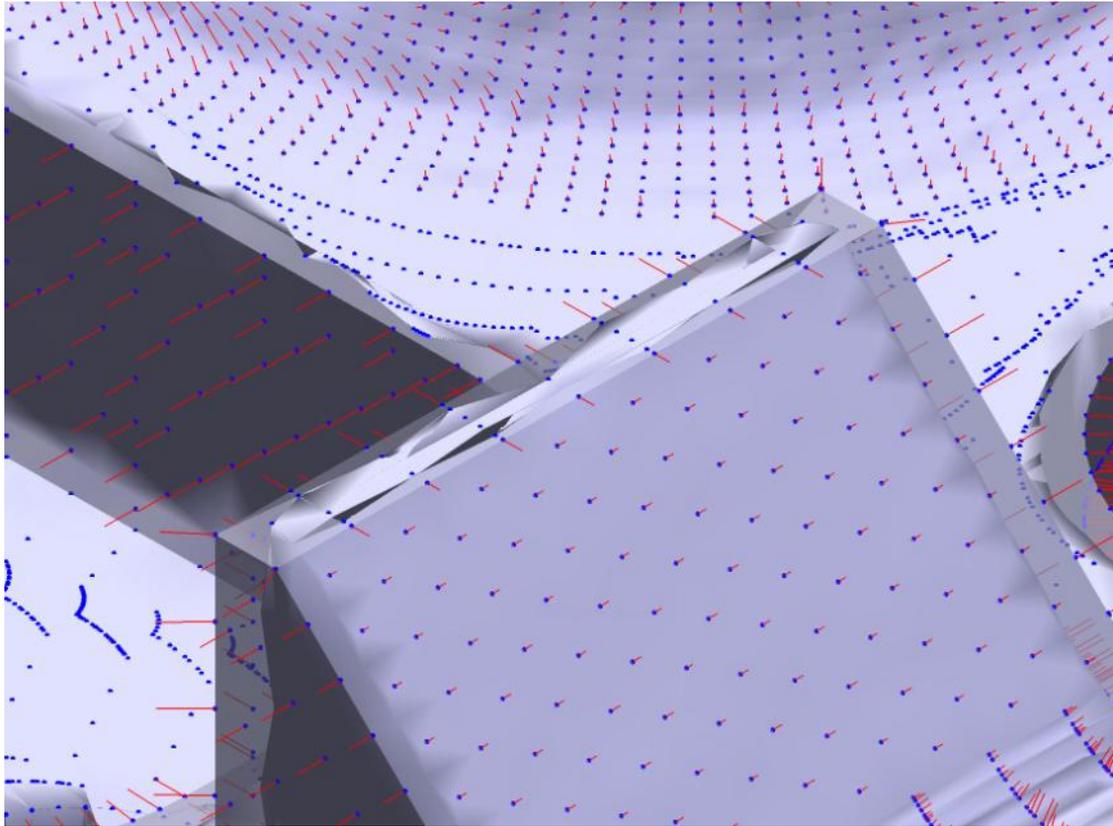


Figura 2.15. Ridefinizione della geometria del file STL.

2.4 ESEMPIO APPLICATIVO

Per convalidare il metodo proposto si è deciso di testare l'algoritmo su un pezzo benchmark. Micra srl ha provveduto alla progettazione del componente che, nonostante non abbia alcuna funzionalità pratica, ricalca geometrie per le quali si verificano frequentemente degli errori dimensionali sui pezzi lavorati. In particolare i diversi dettagli geometrici del pezzo in esame sono rappresentativi della maggior parte delle forme presenti nei pezzi prodotti in azienda. In figura 2.16 è raffigurato il disegno tecnico del pezzo.

Come descritto nel paragrafo 2.4.5, per simulare delle evidenti difettosità geometriche si sono introdotti forzatamente degli errori di programmazione delle traiettorie utensile. In particolare si è scelto di alterare la geometria degli utensili di finitura per lasciare un sovrametallo sul pezzo da eseguire.

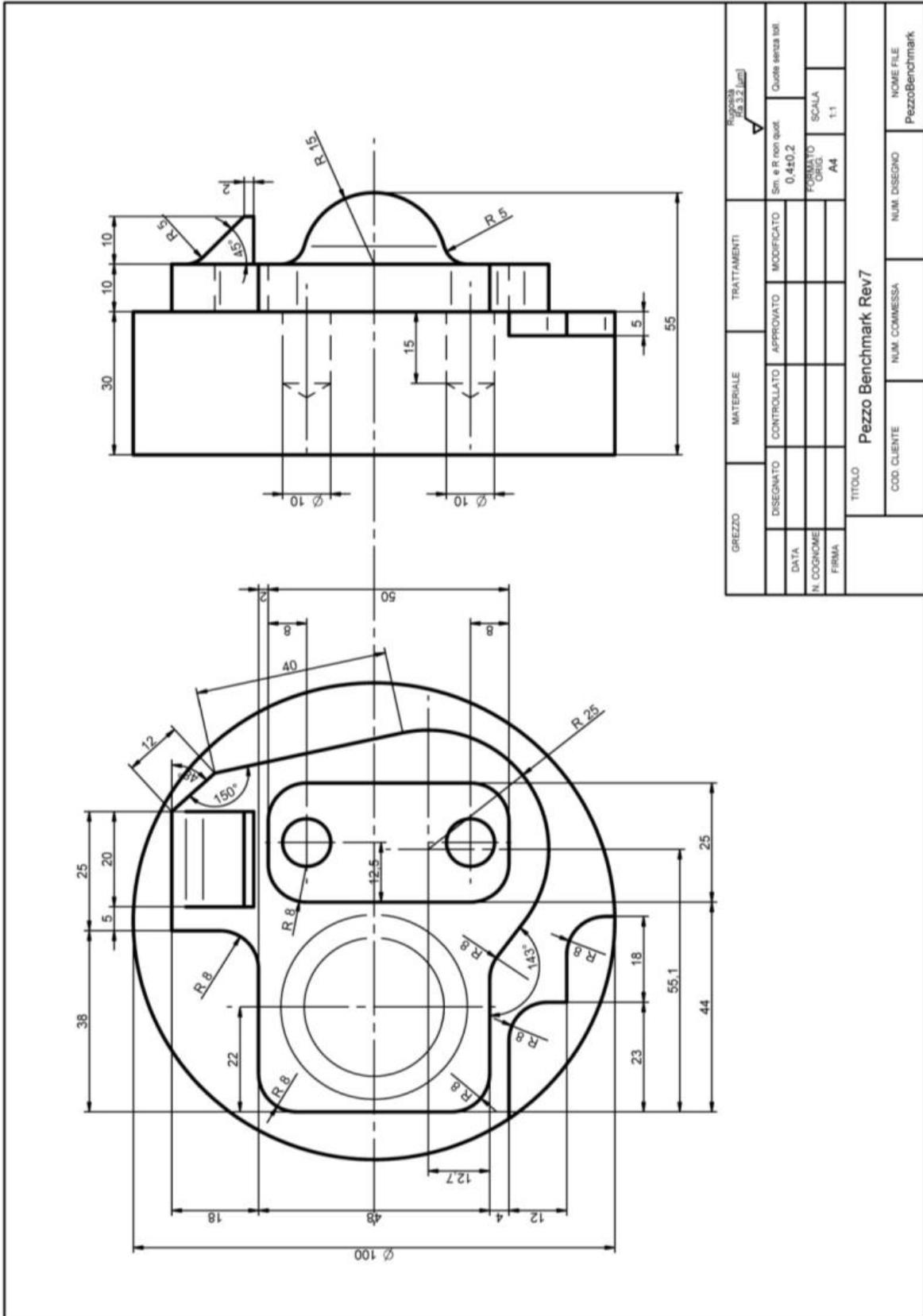


Figura 2.16 Disegno tecnico pezzo Benchmark.

Per l'esecuzione del pezzo descritto si sono ripercorse tutte le fasi descritte in figura 2.6. Si descrivono ora le operazioni salienti per la buona riuscita della sostituzione del modello all'interno del processo produttivo.

2.4.1 SOFTWARE CAD/CAM UTILIZZATI

Il software CAM impiegato per il calcolo delle traiettorie è l'HyperMILL della OPEN MIND, integrato nell'ambiente CAD HyperCAD.

Il modello del pezzo in esame è stato opportunamente convertito in file STL per garantire la successiva modifica con l'algoritmo proposto.

2.4.2 IMPORTAZIONE DELLA GEOMETRIA

Per importare la geometria all'interno di HyperMILL è stato sufficiente aprire il file STL all'interno del modulo CAD e salvare la geometria in formato "e3" - formato proprietario di OPENMIND. In figura si può notare la geometria importata all'interno di HyperMILL.

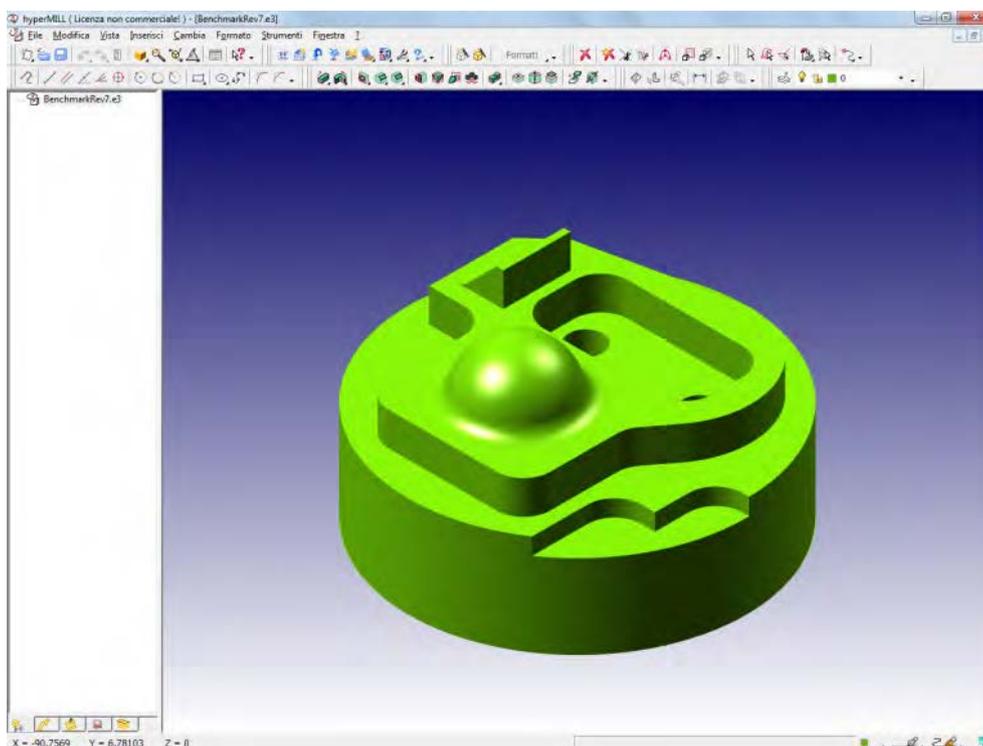


Figura 2.17. Geometria importata in HyperMILL.

2.4.3 DEFINIZIONE DEI PROFILI DI CONTROLLO DELLE LAVORAZIONI

Al fine di limitare le aree di lavorazione di alcune operazioni di finitura si è reso necessario definire dei profili chiusi contenenti le principali form feature di interesse. Essi sono stati disegnati ricalcando la geometria importata, ma non sono in nessun modo collegati a essa.

Questo dettaglio si verificherà fondamentale in fase di ridefinizione della lavorazione descritta nel paragrafo 2.4.7

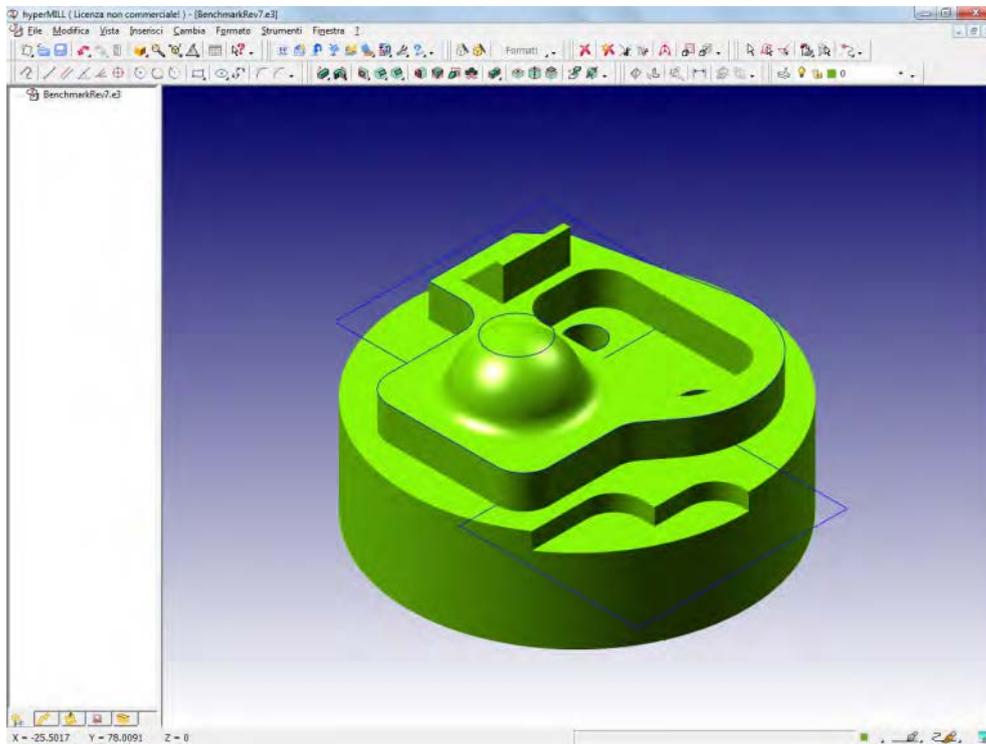


Figura 2.18. Profili di controllo delle lavorazioni.

2.4.4 DEFINIZIONE DELLA LISTA LAVORAZIONI

Prima di definire le singole operazioni è stato necessario specificare la lista lavorazioni. Essa è da considerarsi come un contenitore di lavorazioni aventi definizioni comuni.

Si è definito dunque il nome della lista lavorazioni e il percorso di salvataggio dei file POF contenenti le informazioni relative ai percorsi utensile e del grezzo di fine lavorazione.

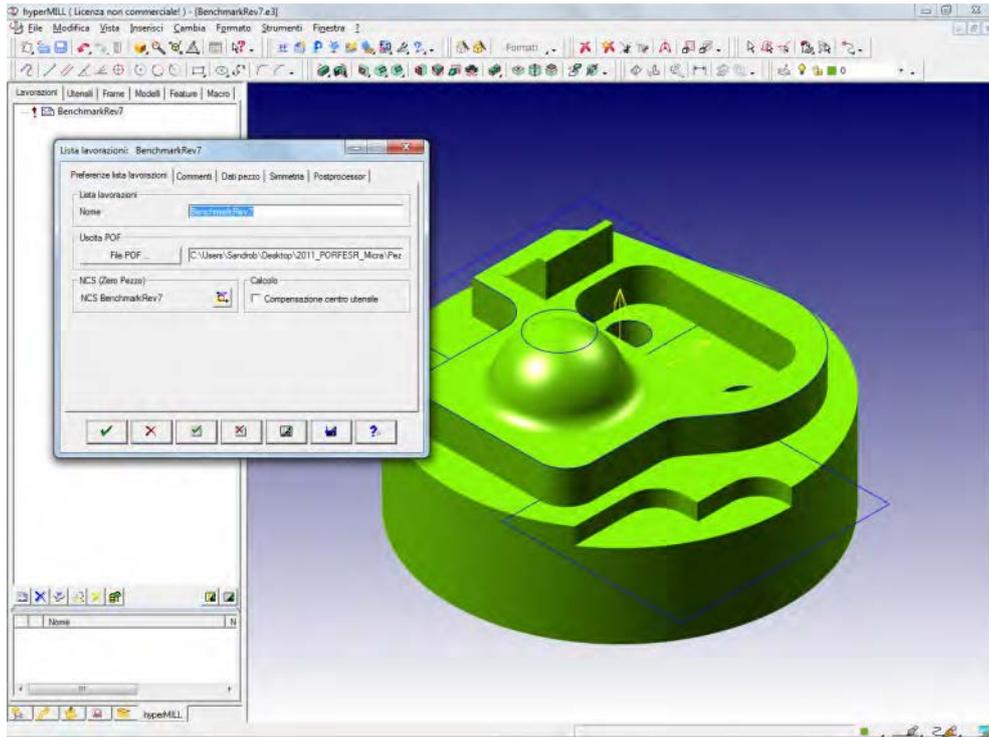


Figura 2.19. Definizione della lista lavorazioni.

Successivamente si è definito il grezzo di lavorazione, per questo caso è stato sufficiente calcolarlo automaticamente impostando il calcolo come "grezzo cilindrico" con sovrametallo opportuno. Figura 2.20

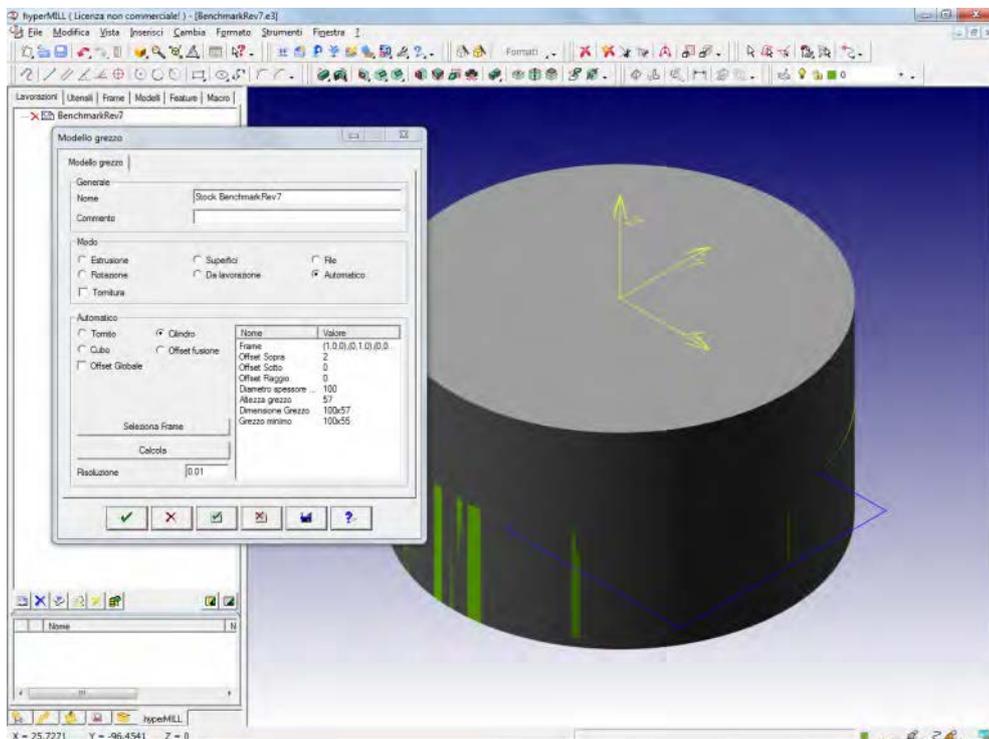


Figura 2.20. Definizione del grezzo.

Si deve ora definire l'area di fresatura della lista lavorazioni. Normalmente in questa fase si selezionano superfici appartenenti al modello solido importato nelle prime fasi. Per garantire la successiva modifica della geometria del pezzo si deve cambiare strategia definendo l'area di fresatura come file esterno. HyperMILL permette agevolmente questa operazione anche se limita i formati dei file accettati come input. I formati accettati sono essenzialmente due: formato 3DF ed STL. Nel caso preso in esame, si è definita l'area di fresatura con lo stesso file utilizzato per la definizione della geometria. Figura 2.21

Il modello solido e l'area di fresatura erano coincidenti dal punto di vista geometrico ma la loro dichiarazione era completamente indipendente. Questa distinzione è di fondamentale importanza in fase di ridefinizione della geometria.

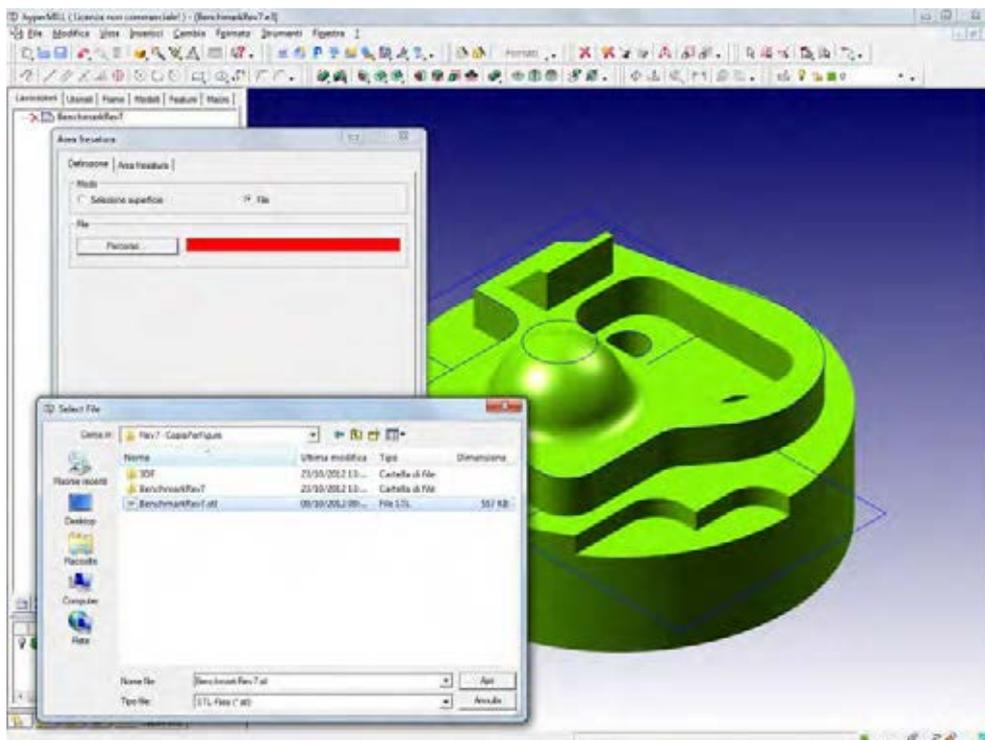


Figura 2.21. Definizione dell'area di fresatura.

A questo punto si sono abilitati il grezzo creato e l'area di fresatura definita come illustrato in figura 2.22.

Nelle lavorazioni che saranno definite in seguito, si è sempre fatto riferimento a questa definizione di grezzo e area di fresatura in modo che tutte le lavorazioni siano a esse dipendenti.

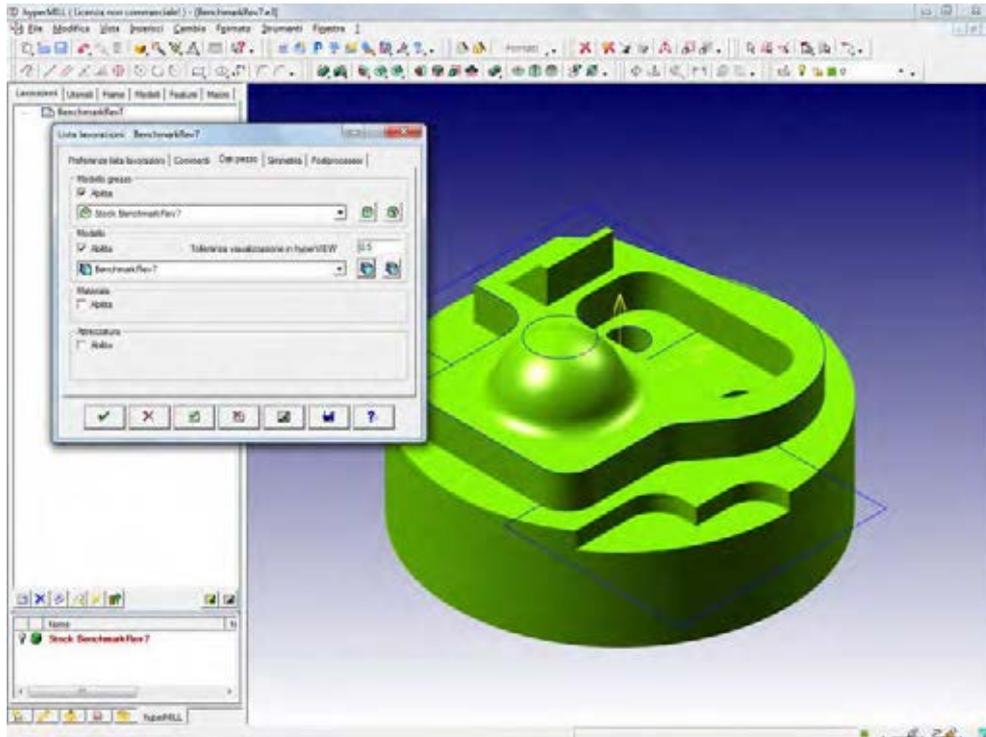


Figura 2.22. Abilitazione grezzo ed area di fresatura.

Nelle definizioni della lista lavorazioni è necessario indicare lo zero pezzo principale per le lavorazioni in esso contenute. Si è scelto di definire lo zero pezzo con l'asse Z coincidente con l'asse del grezzo ma si è spostata l'origine degli assi affinché stia sulla superficie superiore del grezzo di partenza. In figura 2.23 la definizione dello zero pezzo.

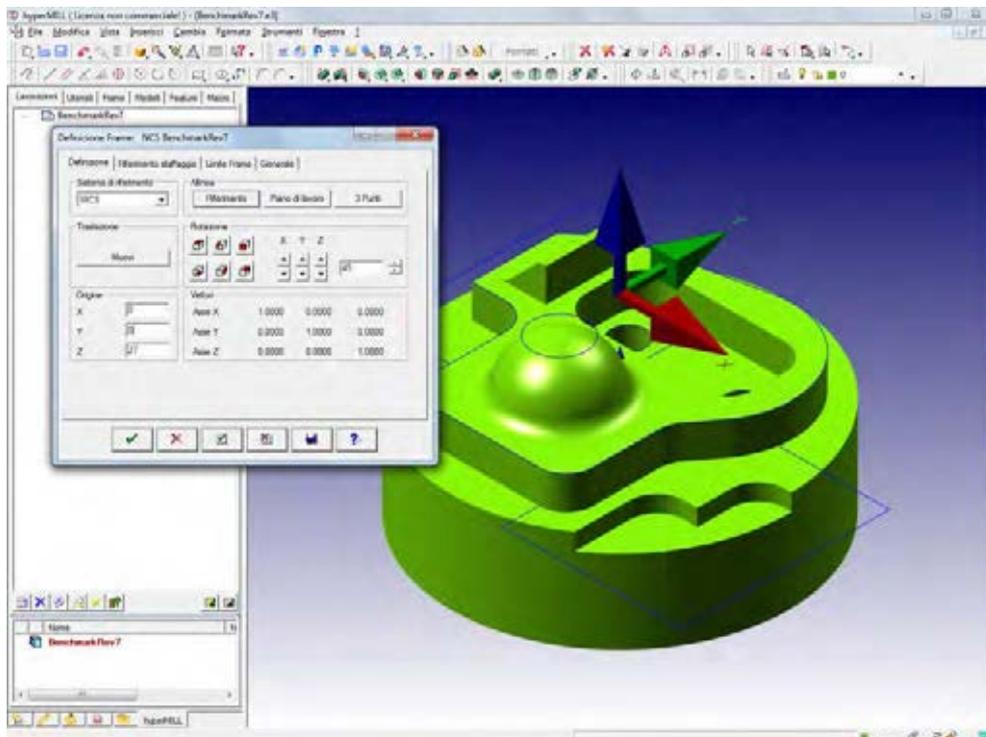


Figura 2.23. Definizione zero pezzo principale.

Per completare le definizioni della lista lavorazioni è necessario indicare in che modo devono essere scritti i file NC elaborati dal post processor di HyperMILL. Si è scelto di esportare i file NC in formato ISO standard per tradurli esternamente in formato compatibile con la macchina utensile utilizzata per l'esecuzione della lavorazione.

In figura 2.24 il dettaglio delle impostazioni.

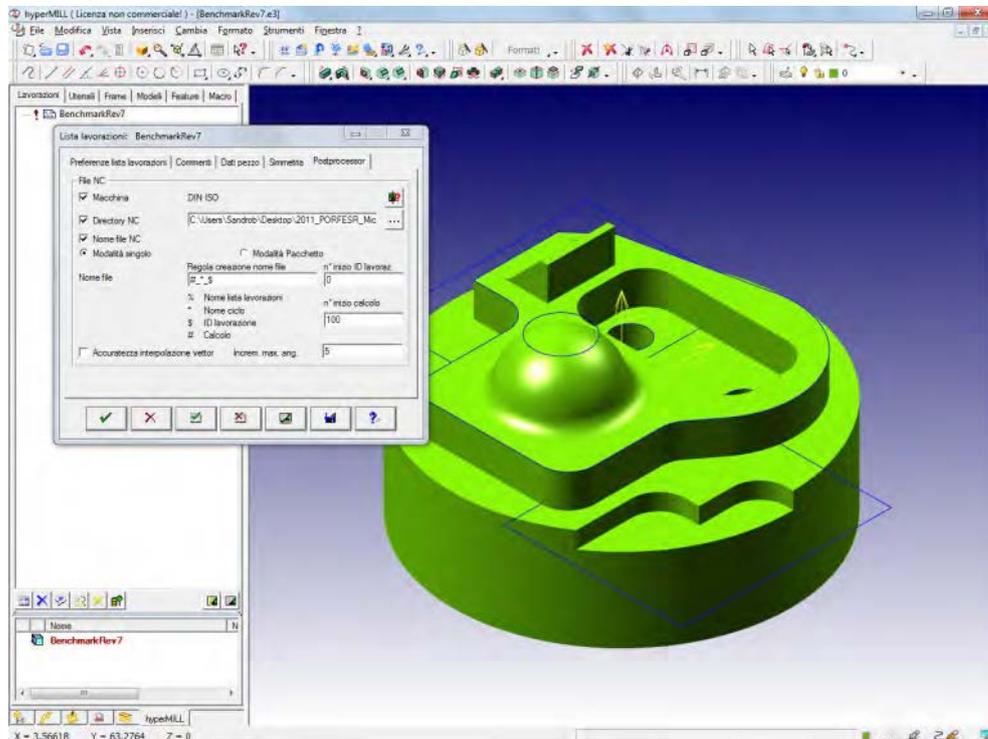


Figura 2.24. Definizione del post processor.

2.4.5 DEFINIZIONE DELLE LAVORAZIONI

Si riporta a titolo di esempio una definizione di operazione di sgrossatura del pezzo.

In quest'operazione è necessario indicare come riferimento il grezzo di partenza e l'area di fresatura. Per effettuare successivamente la sostituzione della geometria è stato necessario indicare come riferimento il modello grezzo e l'area di fresatura indicato nella lista di lavorazioni come illustrato in figura 2.25.

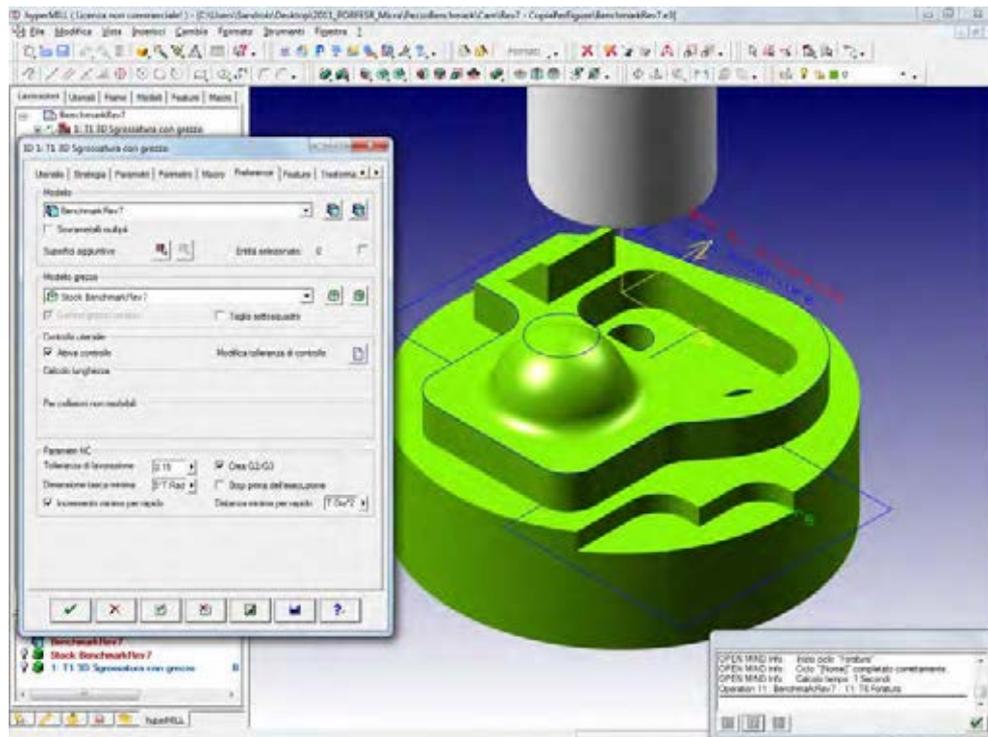


Figura 2.25. Esempio di operazione di sgrossatura.

Per tutti gli altri parametri di quest'operazione e per le successive operazioni di sgrossatura a finitura del pezzo si rimanda al manuale tecnico di HyperMILL.

In tabella 2.1 sono descritte le lavorazioni definite per l'esecuzione del pezzo.

Tabella 2.1. Lavorazioni eseguite

Numero operazione	Tipo lavorazione	Numero utensile	Note
1	Sgrossatura con grezzo	1	Sgrossatura di tutto il pezzo
2	Sgrossatura con grezzo	2	Sgrossatura di tutto il pezzo
3	Finitura z costante	2	Semifinitura semisfera e parte inclinata
4	Finitura z costante	2	Profilatura rialzo e tasca
5	Finitura completa	2	Finitura piano superiore a parte inclinata
6	Finitura completa	2	Finitura piano alla base della semisfera
7	Finitura completa	2	Finitura piano base
8	Finitura completa	3	Finitura baffo di riferimento
9	Finitura per profilatura	4	Finitura testa calotta semisferica
10	Finitura z costante	4	Finitura semisfera e parte inclinata
11	Foratura	5	Foratura fondo tasca

Si è scelto di introdurre forzatamente un errore di programmazione delle traiettorie utensile in modo da amplificare i difetti geometrici presenti sul pezzo da realizzare. Per fare ciò è stata alterata la geometria degli utensili utilizzati.

Tabella 2.2. Utensili utilizzati

Numero utensile	Tipo fresa	Diametro impostato in HyperMILL [mm]	Diametro effettivo dell'utensile [mm]
1	Fresa a riccio	40	40
2	Fresa a candela integrale	10.2	10
3	Fresa a candela integrale	10	10
4	Fresa a testa emisferica	8.2	8
5	Punta per foratura	10	10

Si riportano in figura le traiettorie calcolate per tutte le operazioni previste per l'esecuzione del pezzo.

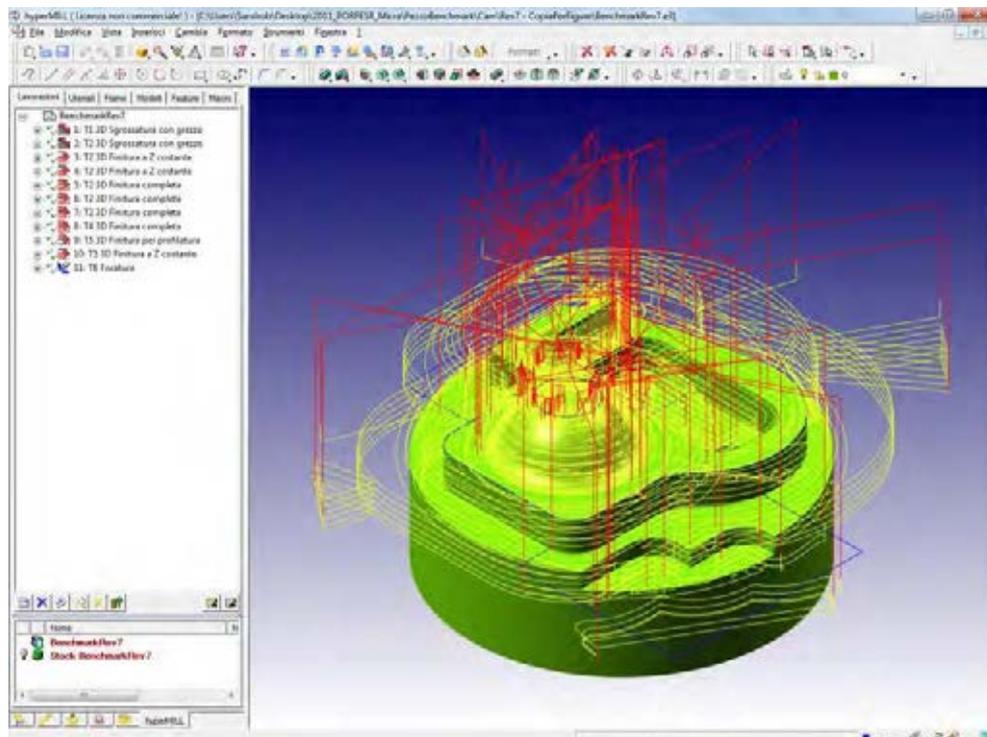


Figura 2.26. Traiettorie utensile calcolate.

2.4.6 ESECUZIONE DELLA LAVORAZIONE

Si riportano a titolo illustrativo alcune foto riguardanti la produzione del pezzo Benchmark.



Figura 2.27. Grezzo dopo la sgrossatura.

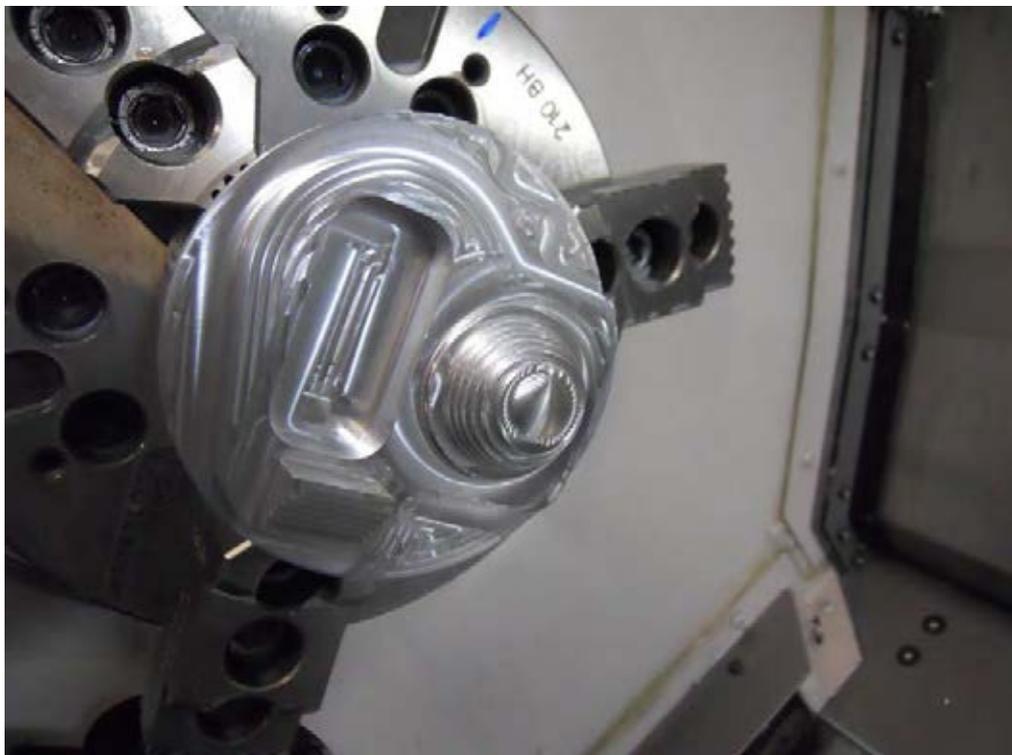


Figura 2.28. Finitura testa emisferica

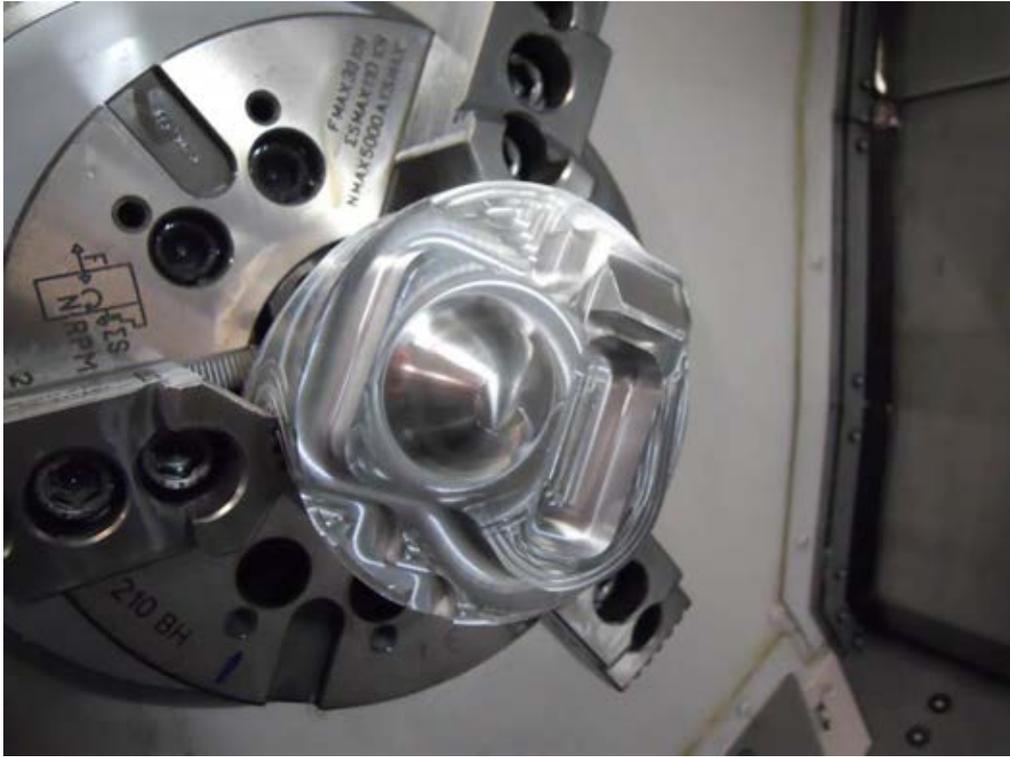


Figura 2.29. Finitura globale.

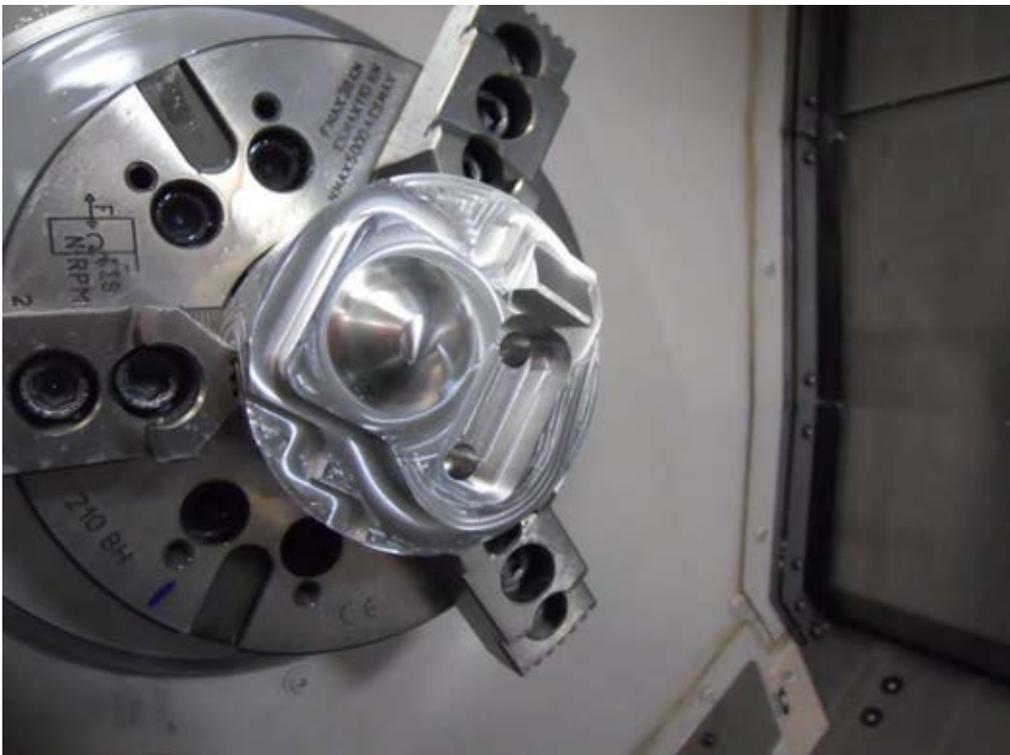


Figura 2.30. Pezzo finito.

2.4.7 RIDEFINIZIONE DEL MODELLO

Per la ridefinizione è stata effettuata la misurazione del pezzo tramite la nuvola di punti, per la verifica della misurazione è riportato anche il confronto con le misure effettuate alla CMM. I risultati più significativi sono sintetizzati in tabella 2.3.

In figura 2.31 ed 2.32 si può notare il risultato del calcolo dei vettori distanza per tutti i vertici del modello. Per chiarezza espositiva la rappresentazione dei vettori è amplificata di un fattore dieci.

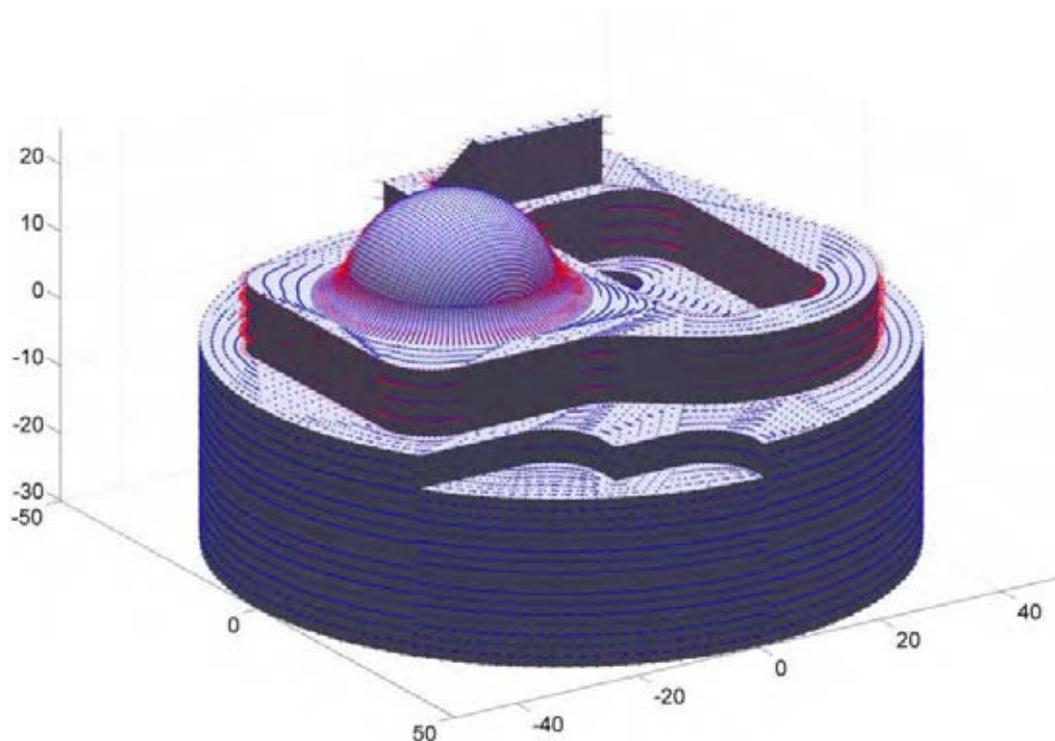


Figura 2.31. Risultato del calcolo dei vettori distanza per il pezzo Benchmark.

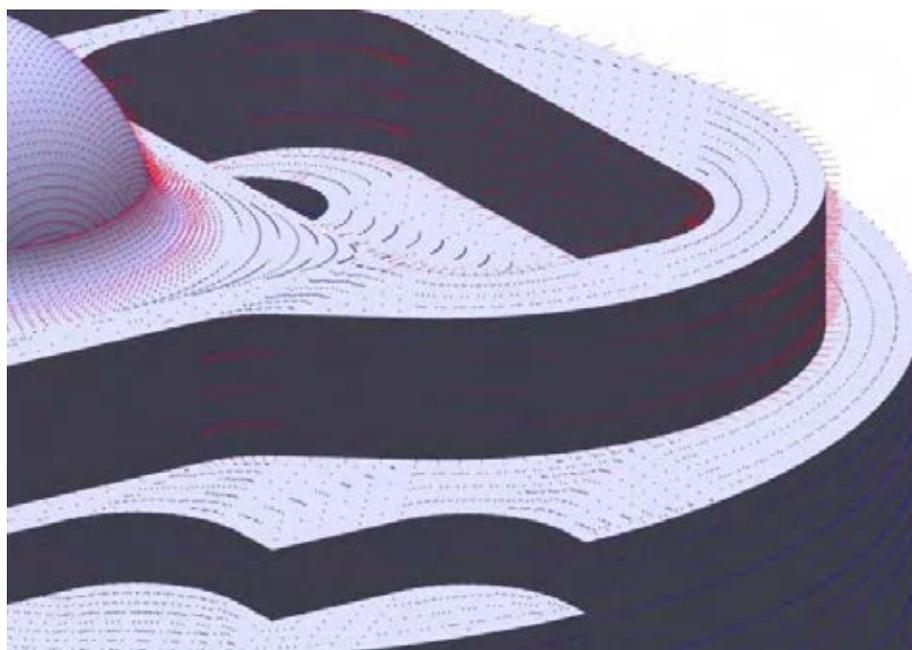


Figura 2.32. Dettaglio di risultato del calcolo dei vettori distanza per il pezzo Benchmark.

Tabella 2.3. Risultati misurazioni per il pezzo benchmark non compensato

#Quota	Dimensione nominale	Specifica		Rilevato			CMM	Diff.
		Min	Max	Min	Med	Max		
1	38	38.00	38.02	37.97	37.98	38.00		
2	5			4.98	4.99	5.00	5.05	+0.05
3	20	19.99	20.01	18.79	19.60	20.42	20.22	+0.62
4	48°				47.86°			
5	150°				150.08°			
6	2	1.95	2.05		2.19		2.28	+0.09
7	8				7.89		7.87	-0.02
8	50	49.96	50.01	49.73	49.77	49.81	49.83	+0.06
9	8	8.00	8.03		7.91		7.90	-0.01
10	25				25.05			
11	25	10.96	11.01	24.79	24.80	24.80	24.74	-0.06
12	55.1				55.16			
13	44	12.90	13.10	44.19	44.20	44.21	44.36	+0.16
14	18				18.01			
15	23	22.97	23.00	23.09	23.09	23.10	21.40	+0.31
16	12	11.97	12.00	11.99	12.00	12.02		
17	4	4.00	4.10	3.77	3.83	3.90	3.93	+0.10
18	12.7				12.86			
19	48	47.99	48.01	48.19	48.20	48.21	48.36	+0.16
20	18	18.00	18.03		17.99			
21	22	21.95	22.05		22.12		22.12	0
22	8				7.96			
23	8				7.95			
24	12.5	12.45	12.55		12.39		12.36	-0.03
25	8				7.90			
26	8				8.07			
27	8				8.08			
28	10	9.99	10.01	9.99	10.00	10.01	10.00	0
29	10	9.99	10.01	9.98	10.00	10.02	10.00	0
30	45°				44.99°		45.04	+0.05
31	15	14.97	15.03		15.06		15.10	+0.04
32	5	4.99	5.00		4.99		5.02	+0.03
33	10				10.00		10.02	+0.02
34	10				9.99		10.02	+0.03

A conclusione dell'algorithm, si applica a tutti i vertici del modello una compensazione di intensità pari al modulo del vettore distanza e di direzione contraria a quest'ultimo.

Il modello STL modificato dall'algorithm è illustrato in figura 2.33.

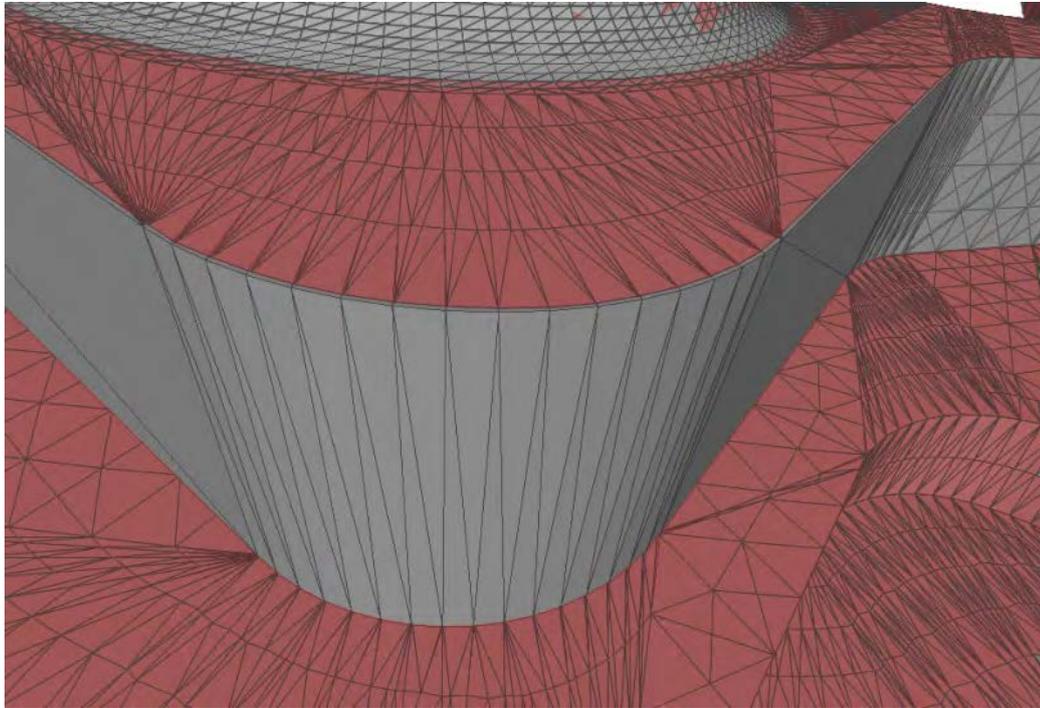


Figura 2.33. Particolare del modello del pezzo Benchmark ridefinito; il modello di partenza è rappresentato in grigio mentre il modello ridefinito, in rosso, è sovrapposto.

2.4.8 RICALCOLO DEL PART PROGRAM

A seguito dell'elaborazione della nuvola di punti descritta nel precedente paragrafo si ha a disposizione un nuovo file STL in cui le coordinate dei vertici sono state opportunamente modificate.

La nuova geometria deve essere introdotta all'interno del file di HyperMILL per il ricalcolo delle traiettorie compensate dall'elaborazione della nuvola di punti.

Per fare ciò si deve modificare l'area di fresatura definita al paragrafo 2.4.4 come indicato di figura 2.34.

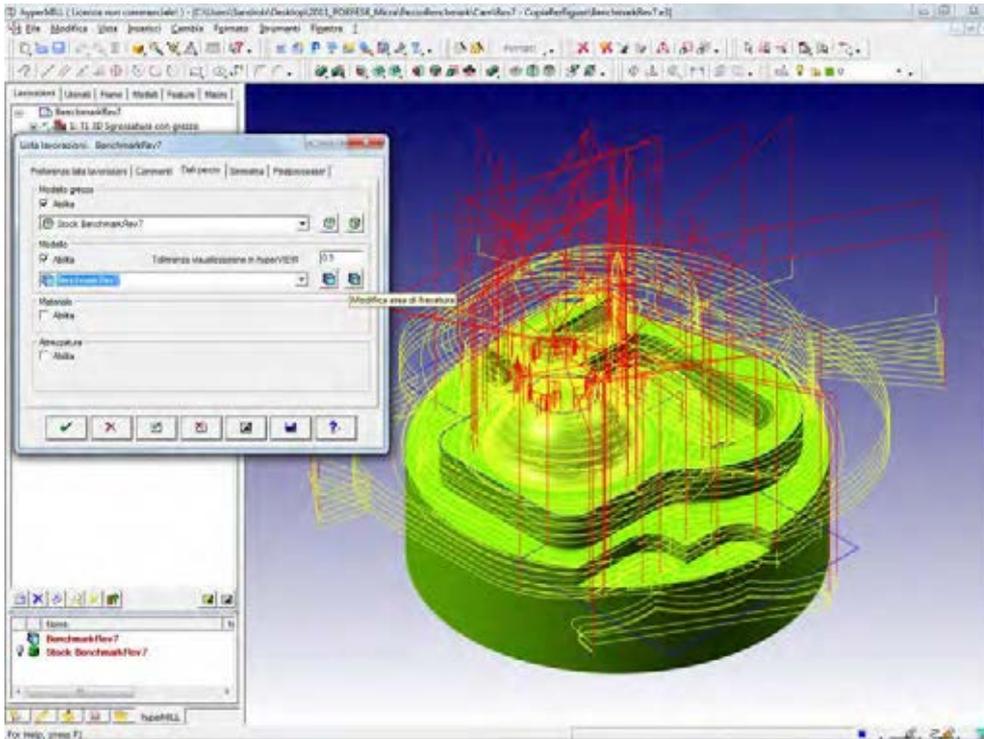


Figura 2.34. Modifica dell'area di fresatura.

Si definisce quindi la nuova area di fresatura attraverso il file STL output dell'algoritmo descritto in precedenza.

In figura 2.35 un dettaglio della ridefinizione del grezzo.

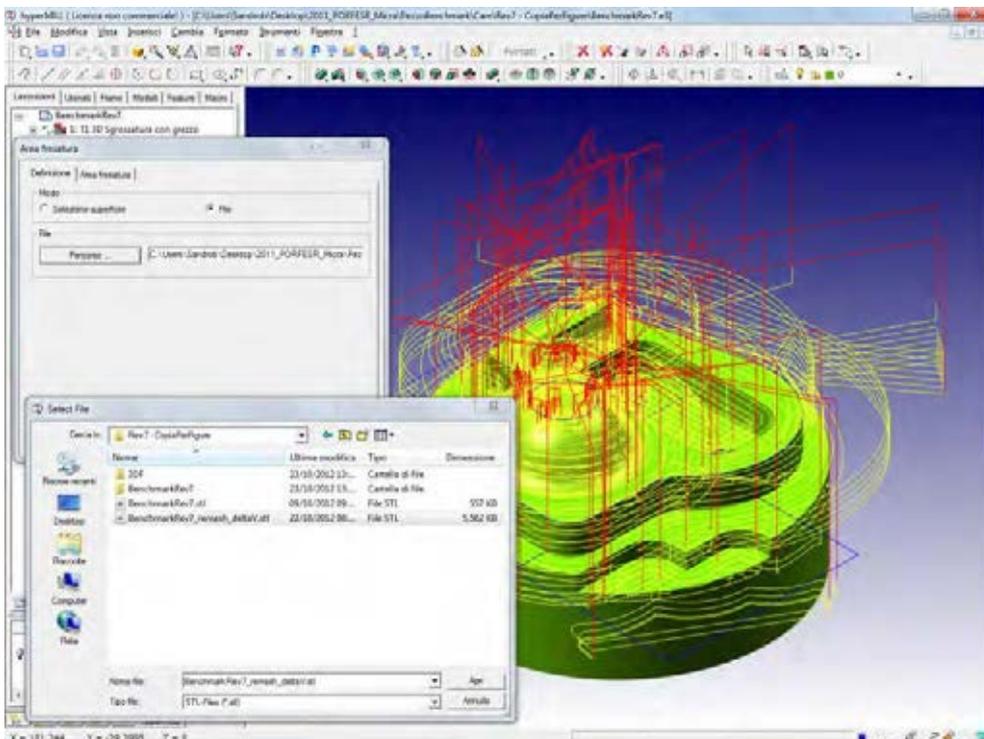


Figura 2.35. Modifica dell'area di fresatura, selezione nuovo file.

Una volta modificata l'area di fresatura è sufficiente ricalcolare tutte le traiettorie della lista lavorazioni presente senza modificare nessun altro parametro di definizione delle singole lavorazioni.

Si avranno quindi a disposizione delle nuove traiettorie che dovranno essere messe in macchina per l'esecuzione del secondo pezzo.

In figura 2.36 il pezzo fisico creato.



Figura 2.36. Foto del pezzo Benchmark

Le misure del pezzo benchmark compensato sono sintetizzate in tabella 1.12.

Si riporta in figura 2.37 una mappa delle distanze tra il modello cad e le misure effettuate tramite nuvola di punti.

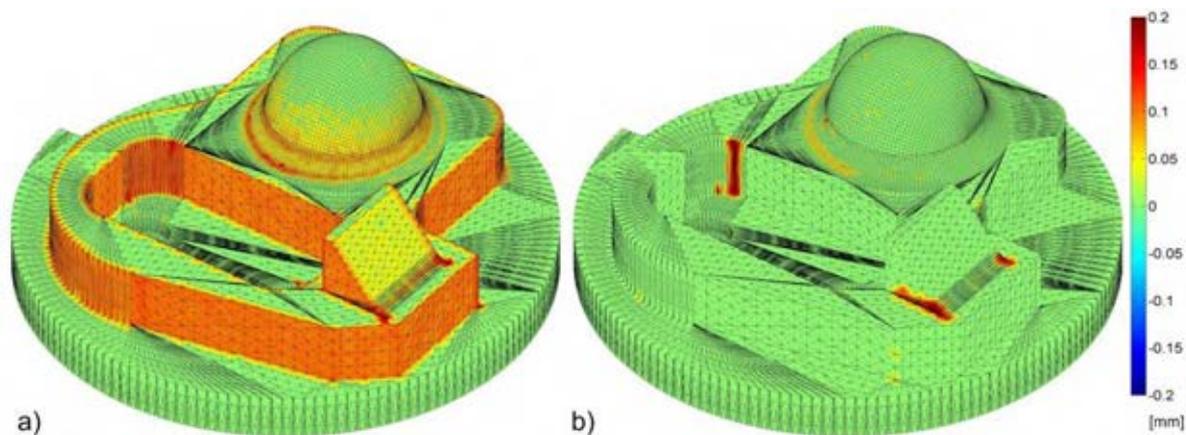


Figura 2.36. Foto del pezzo Benchmark: a) Non compensato, b) compensato.

2.5 CONCLUSIONI

E' stata ideata e messa in opera una procedura innovativa per la correzione automatica di errori dimensionali di pezzi prodotti per lavorazione ad asportazione di truciolo.

Tale metodo si basa sulla modifica del modello di riferimento utilizzato dal software CAM e ricalcolo automatico delle traiettorie di lavorazione in maniera tale da compensare le imperfezioni riscontrate.

La procedura è stata implementata in maniera integrata tra l'ambiente Matlab e l'ambiente CAM HyperMill e testata su di un pezzo benchmark ideato allo scopo.

La validazione ha messo in evidenza che la procedura è in grado di correggere effettivamente errori macroscopici di lavorazione dovuti, ad esempio a: errore di azzeramento del pezzo o dell'utensile, usura dell'utensile, deflessione dell'utensile o del pezzo, dilatazioni termiche.

3. METODOLOGIE PER LA PROGETTAZIONE DI ATTREZZATURE SENSORIZZATE

3.1 INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, a causa dell'aumento di competitività dei mercati internazionali, si riscontra un forte interesse per sistemi di lavorazione non presidiati o sistemi intelligenti di lavorazione, in cui molte attività produttive sono svolte in modo automatico e semi-automatico, ovvero senza la presenza o l'intervento di operatori.

La necessità di monitorare il processo produttivo nasce dal desiderio di avere cicli produttivi e macchine automatizzate sempre più affidabili ed efficienti, per far fronte alla continua richiesta di abbattimento dei costi da parte del mercato. Partendo da questo concetto, diventa opportuno dotare le macchine utensili di sensori e sistemi di elaborazione dei segnali sensoriali in grado di rilevare eventuali anomalie di processo ed inviare alla macchina utensile dei segnali di allarme, seguiti dall'attuazione di tempestive contromisure al fine di ridurre o annullare le suddette anomalie [Teti 2010]. Nel caso più semplice, si potrebbe forzare l'arresto delle parti in moto relativo della macchina utensile.

L'adozione di tali sistemi dovrebbe provocare la riduzione dei costi di produzione, grazie alla riduzione di ore uomo dedicate al presidio della lavorazione, al minore numero di guasti e fermi macchina, e contemporaneamente si dovrebbe ottenere una migliore qualità dei pezzi prodotti, nonché la possibilità di sfruttare le informazioni raccolte durante la lavorazione per ottimizzare le lavorazioni successive.

Nell'ambito delle lavorazioni ad asportazione di truciolo, vi sono grandezze fisiche che possono essere misurate al fine di identificare e rappresentare lo stato del processo, tra cui le forze di taglio, le vibrazioni del sistema di lavorazione, le emissioni acustiche e sonore che scaturiscono dalla zona di taglio, le temperature caratteristiche del processo, etc.. Tali grandezze fisiche sono a loro volta influenzate dalla tipologia dell'utensile, dalla sua usura, dai parametri di processo, dal tipo di fluido lubro-refrigerante, dalle traiettorie utensile pezzo, dalle caratteristiche statiche e dinamiche del sistema di lavorazione (rigidezze, risonanze, smorzamenti, etc.) .

Le variabili utili per il monitoraggio della lavorazione possono essere misurate mediante l'applicazione di adeguati sensori fisici. I segnali rilevati da questi sensori sono sottoposti a condizionamento analogico e digitale, al fine di essere registrati ed ulteriormente elaborati da un software dedicato, che estrae degli indicatori sintetici in grado di rappresentare lo stato dell'utensile/processo. Tali indicatori vengono comunicati come input a degli algoritmi decisionali, che determinano delle azioni, come raffigurato nella figura sottostante.



Figura 3.1. Flusso logico del monitoraggio

3.2 OBIETTIVI DEL MONITORAGGIO

Dai colloqui con i tecnici della Micra sono emerse alcune esigenze specifiche, derivanti dalle problematiche riscontrate nei reparti produttivi. Nella fattispecie, i sistemi di monitoraggio dovrebbero tendere al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- *il rilevamento di collisioni tra organi mobili della macchina*, ed in particolare tra utensile, pezzo ed attrezzature. Esistono in commercio diversi sistemi di monitoraggio per ridurre gli effetti catastrofici delle collisioni. Le collisioni possono causare ingenti danni alla macchina utensile, pezzi scarti e fermi macchina che, nella maggior parte dei casi, si traducono in notevoli costi di riparazione e di mancata produzione. Le grandezze fisiche solitamente monitorate per il tempestivo rilevamento di una collisione durante i processi di produzione sono: vibrazioni, forze di taglio e potenza assorbita dal motore del mandrino. Bisogna sottolineare che questi sistemi di monitoraggio non sono in grado di prevedere i fenomeni di collisione ma solo di limitarne i danni.
- *L'identificazione dello stato dell'utensile (Tool Condition Monitoring – TCM)*, e nella fattispecie
 - la rottura improvvisa dell'utensile;
 - la stima del livello di usura;

Questi fenomeni sono rilevabili applicando sensori di emissione acustica (AE), accelerometri, dinamometri, anche se le prestazioni dipendono fortemente dal tipo di applicazione e dalle caratteristiche del sistema portautensile/portapezzo sensorizzato.

- *La rilevazione di vibrazioni anomale di utensile e/o pezzo (chatter)*. Con il termine chatter si intende un fenomeno vibratorio che si può verificare durante i processi ad asportazione di truciolo, per specifiche combinazioni di parametri di taglio. Si tratta di un fenomeno molto complesso caratterizzato da moti caotici instabili dell'utensile rispetto al pezzo e da forti oscillazioni delle forze di taglio. L'insorgenza di chatter può provocare un'usura prematura o la rottura improvvisa dell'utensile, il danneggiamento sia della struttura portautensili e dei cuscinetti del mandrino, elevata rugosità superficiale e scarsa precisione dimensionale del pezzo. Tali vibrazioni sono generalmente rilevate da sensori di vibrazione, a contatto (accelerometri) o non a contatto (sonde capacitive o induttive), celle di carico ovvero dinamometri, microfoni.

3.3 SENSORI E SISTEMI SENSORIALI PER MONITORAGGIO DEI PROCESSI DI TAGLIO

Per conseguire gli obiettivi di monitoraggio illustrati al paragrafo precedente, è possibile ricorrere ai sensori elencati in Tabella 3.1, vedi anche Figura 3.2.

Tabella 3.1. Sensori generalmente applicati per monitoraggio di processo (per la stima indiretta delle problematiche evidenziate nel paragrafo precedente)

Grandezze fisiche da misurare	Possibili sensori
Spostamento e velocità assi e mandrini delle macchine utensili	Righe ottiche, inductosyn, encoder, resolver (trasduttori già integrati nelle macchine utensili); dinamo tachimetriche per le velocità
Correnti (coppia) assi e mandrini	Amperometri (già integrati nelle macchine utensili)
Potenza assi e mandrini	Wattmetri (esempio, ad inserzione Aaron)
Temperatura	Termocoppie, pirometri, termocamere
Emissioni sonore (0.02-20 kHz)	Microfoni audio, bassa frequenza passiva
Emissioni acustiche ultrasoniche (50-1000 kHz)	Sensori AE piezoelettrici
Vibrazioni/accelerazioni di assi o di parti del sistema portautensile-utensile-pezzo-portapezzo	Trasduttori di spostamento/vibrazione a contatto (es., accelerometri piezoelettrici), e non a contatto (sonde capacitive, sonde induttive ovvero a correnti parassite, laser, etc.); misure indirette di vibrazione possono anche essere ottenute da sensori di deformazione.
Deformazioni di parti della macchina utensile	Estensimetri convenzionali (resistivi), estensimetri piezoelettrici
Forze, coppie di taglio	Estensimetri, celle di carico/dinamometri piezoelettrici

Le caratteristiche ideali di un sistema di monitoraggio sensoriale, che influiscono pesantemente sulla progettazione delle attrezzature speciali in cui vengono installati i sensori, dovrebbero essere:

- accuratezza, ovvero capacità di classificare correttamente lo stato dell'utensile/sistema di lavorazione;
- reattività, ovvero rapidità nel fornire una risposta al fine di promuovere tempestive contromisure in-process; questa caratteristica è correlata con la risposta in frequenza del sistema attrezzatura-sensore-catena di misura;
- affidabilità, ovvero la probabilità che il dispositivo funzioni correttamente per un intervallo di tempo predefinito, rispondendo nel medesimo modo se le medesime condizioni rimangono le stesse;
- robustezza, ovvero capacità di classificare correttamente lo stato dell'utensile/sistema di lavorazione anche se uno o più componenti del sistema (nell'ipotesi che sia multi-sensore) sono malfunzionanti;
- praticità di applicazione e flessibilità per poter estendere il sistema sensoriale ad applicazioni simili, con piccole modifiche.

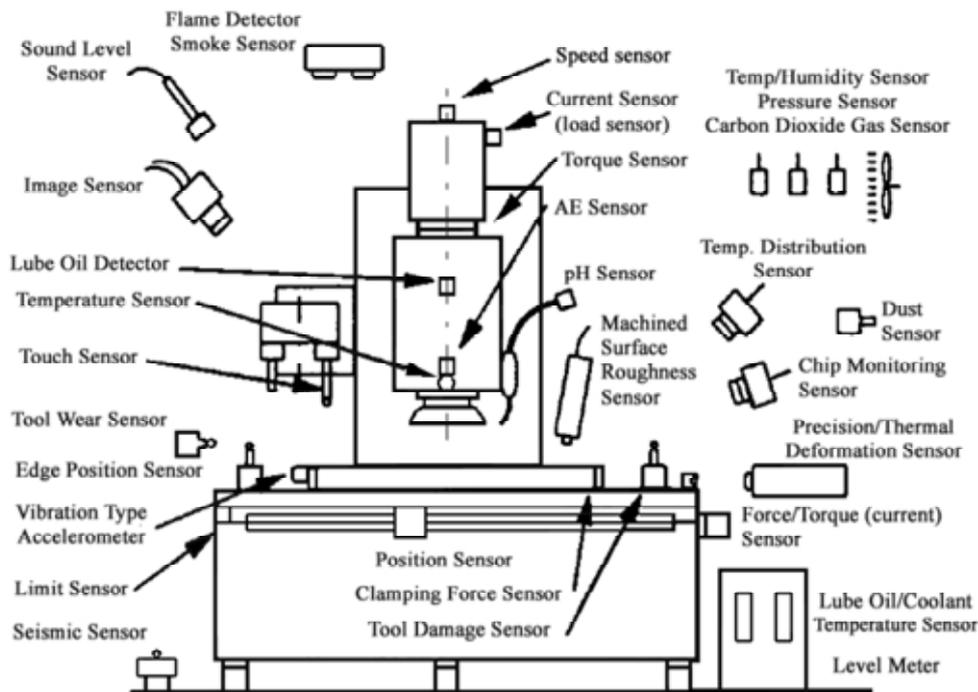


Figura 3.2. Applicazione in macchina di diverse tipologie sensori per il monitoraggio del processo [Byrne, 1995]

Inoltre, l'applicazione in condizioni industriali comporta i seguenti requisiti:

- il sistema sensoriale non dovrebbe ridurre in modo significativo la rigidità né alterare altri parametri modali (per esempio, gli smorzamenti) della macchina utensile;
- il sistema dovrebbe essere compatibile con cambio pallet e cambio utensili, qualora presenti;
- non dovrebbe imporre dei vincoli sulla scelta dei parametri di taglio e su qualsiasi altra condizione di lavoro (dimensioni degli utensili, le dimensioni del pezzo, geometria utensile, ed altri);
- il funzionamento del sistema sensoriale non dovrebbe dipendere dalla conoscenza delle condizioni di taglio effettive, né sulla conoscenza a-priori della dinamica del sistema di lavorazione;
- il sistema dovrebbe essere insensibile al rumore ambientale.

Nelle tabelle successive sono elencati alcuni lavori scientifici che dimostrano l'efficacia delle tecniche di monitoraggio basate su sensori per il conseguimento degli obiettivi sopra evidenziati. Lo studio di tali lavori, unitamente all'esperienza maturata in questo settore, hanno consentito di ricavare alcune linee guida generali per una corretta integrazione dei sensori all'interno di attrezzature speciali, che potrebbero essere ingegnerizzate, realizzate ed applicate presso le aziende coinvolte nel progetto di ricerca.

Nel seguito verranno illustrate più nel dettaglio alcune caratteristiche salienti dei sensori elencati in Tabella 3.1, e verranno determinate le tipologie di sensore più idonee per l'applicazione presso le aziende coinvolte nel progetto di ricerca.

Tabella 3.2 Esempi di applicazioni di sensori integrati nel sistema di lavorazione per scopi di monitoraggio di processo

Processo	Obiettivo del monitoraggio / scopo del lavoro	Grandezze misurate e sensori utilizzati	Rif.
Fresatura	Sviluppo di un sistema anticollisione	Magneti, molle e smorzatori speciali integrati nel mandrino della fresatrice.	[Abele 2011]
Fresatura	Stima indiretta dell'usura e rottura utensile mediante monitoraggio forze di taglio	Forze di taglio tramite dinamometro	[Huang 2007]
Fresatura	Monitoraggio real-time rottura utensile	Forze di taglio tramite dinamometro e trasduttori di corrente motori assi e mandrino.	[Mohring 2010]
Fresatura	Rilevamento rottura utensile	Vibrazioni tramite accelerometro	[Jun 1999]
Foratura	Monitoraggio rottura utensile	Emissioni acustiche tramite sensore AE, corrente assi tramite trasduttore di corrente	[Li 1999]
Fresatura	Monitoraggio usura utensile e rottura tagliente	Vibrazioni tramite accelerometro triassiale.	[Kalvoda 2010]
Fresatura	Stima indiretta dell'usura dell'utensile	Sensori di emissione acustica (AE) montati sull'attrezzatura portapezzo	[Kuljanic 2006]
Fresatura	Monitoraggio usura utensile	Vibrazioni tramite accelerometro.	[Orhan 2007]
Fresatura	Monitoraggio usura utensile in operazioni ad alta velocità	Forze di taglio tramite dinamometro triassiale, vibrazioni tramite accelerometro, emissioni acustiche tramite 2 sensori AE.	[Haber 2004]
Fresatura	Sviluppo sistema di monitoraggio mediante sensori	Forze di taglio tramite estensimetro, vibrazioni tramite accelerometro MEMS, temperatura tramite micro termometro	[Mohring 2010]
Foratura	Monitoraggio usura utensile con logica fuzzy	Forze di taglio tramite dinamometro, vibrazioni tramite accelerometro, emissioni sonore tramite microfono.	[Aliustaoglu 2009]
Fresatura	Stima indiretta usura dell'utensile	Velocità di rotazione tramite encoder rotativo, forze di taglio tramite dinamometro	[Girardin 2010]
Brocciatura	Monitorare condizioni utensile	Emissioni acustiche tramite sensore AE, vibrazioni tramite accelerometro, forze di taglio tramite dinamometro, pressione idraulica.	[Axinte 2003]
Foratura	Stima usura utensile real-time basandosi sulla potenza assorbita dal motore	Potenza motore tramite sensore interno al controllo numerico, usura utensile tramite microscopio, coppia di taglio tramite dinamometro.	[Kim 2002]

Tabella 3.3 Esempi di applicazioni di sensori integrati nel sistema di lavorazione per scopi di monitoraggio di processo

Processo	Obiettivo del monitoraggio / Scopo del lavoro	Grandezze misurate e sensori utilizzati	Rif.
Fresatura	Identificazione chatter	Forze di taglio tramite dinamometro	[Suh 2002]
Fresatura	Identificazione chatter	Velocità motore tramite encoder rotativo, emissioni acustiche tramite sensore AE	[Ismail 2002]
Fresatura	Sviluppo sistema di identificazione del chatter (vibrazioni anomale)	Forze di taglio tramite dinamometro rotante, vibrazioni tramite accelerometro, emissioni acustiche tramite sensore AE, potenza assorbita.	[Kuljanic 2008]
Fresatura	Sviluppo sistema di identificazione del chatter (vibrazioni anomale)	Forze di taglio tramite dinamometri, vibrazioni tramite accelerometro.	[Kuljanic 2009]
FMS	Sviluppo sistema di monitoraggio basato su sistema a multi-sensoriale	Potenza motore, vibrazioni, temperatura motore, temperatura olio motore, pressione idraulica e pneumatica attuatori tramite sistema multi-sensoriale	[Zhou 2000]
Foratura	Sviluppo sensore di forza integrato con il mandrino	Forze di taglio tramite dinamometro integrato con mandrino e tramite sensore di potenza del motore, emissioni acustiche tramite sensore AE	[Byrne 2007]
Fresatura	Valutazione prestazioni dinamometro integrato con il mandrino per il monitoraggio dei processi	Forze di taglio tramite dinamometro ad anello integrato con il mandrino e tramite dinamometro a piattaforma, temperatura liquido di raffreddamento mandrino tramite termometro	[Jun 2002]
Tornitura di precisione	Sviluppo dinamometro per la misura delle forze di taglio	Forze di taglio tramite estensimetro, vibrazioni tramite accelerometro	[Kim 1997]
Tornitura Fresatura Rettifica	Applicazione dei sensori AE per il monitoraggio	Emissioni acustiche tramite sensore AE	[Inasaki 1998]
Tornitura	Sviluppo modello on-line per stima indiretta della finitura superficiale e della deviazione dimensionale	Forza di taglio tramite dinamometro, vibrazioni tramite accelerometro, temperatura.	[Azouzi 1997]
Tornitura	Sviluppo modello per la stima indiretta della finitura superficiale basato sui parametri di taglio e sulla vibrazione dell'utensile	Vibrazioni tramite accelerometro, rugosità superficiale tramite rugosimetro.	[Abouelatta 2001]
Fresatura di finitura	Sviluppo modello real-time per la rilevazione di varie problematiche e per la stima della finitura superficiale	Vibrazioni tramite accelerometro, rugosità superficiale tramite rugosimetro.	[Song 2005]
Tornitura	Monitoraggio superficie lavorata	Emissioni acustiche tramite sensore AE	[Guo 2005]
Fresatura	Monitoraggio anomalie utensile e problemi di finitura superficiale	Forze e coppia tramite dinamometro, emissioni acustiche tramite AE	[Marinescu 2008]

3.4 SELEZIONE TIPOLOGIE DI SENSORI IDONEI PER APPLICAZIONI IN AMBITO INDUSTRIALE

3.4.1 MISURE DI CORRENTE (COPPIA) E POTENZA ASSI E MANDRINI

L'approccio più semplice e facile da implementare per il monitoraggio dei processi è quello sfruttare i segnali di corrente e potenza assorbita dai motori degli assi macchina e/o del mandrino.

Solitamente il segnale di coppia o di potenza viene impiegato per il rilevamento collisioni e rottura utensile in operazioni massive [Ismail 2002].

Il vantaggio principale dell'utilizzare parametri ricavati dagli assi e dai mandrini per rilevare disfunzioni nel processo di taglio è che l'apparato di misura non disturba la lavorazione. Inoltre, in alcune macchine utensili moderne sono disponibili alcune funzioni avanzate per la misura della potenza assorbita dal motore, per scopi di monitoraggio e di controllo di base della lavorazione.

Molto spesso, i segnali di corrente ed i potenza assorbita dal motore, vengono usati come misura indiretta delle forze di taglio. Quando si utilizzano questi sistemi sensoriali è di importanza fondamentale conoscere la relazione tra ingresso (corrente/potenza) e uscita (forza/coppia).

L'utilizzo del segnale di corrente/potenza per il monitoraggio della superficie lavorata fa insorgere alcune problematiche [Byrne 1995, Ketteler 1999]:

- la quantità di potenza richiesta per la rimozione del materiale può essere una quota molto ridotta di energia totale assorbita, ad esempio, nelle operazioni di foratura con punta di piccolo diametro e lavorazioni di finitura;
- la potenza fornita dal motore al mandrino è proporzionale alla risultante delle forze di taglio ed è meno sensibile all'usura dell'utensile;
- l'innalzamento della temperatura del motore influenza l'assorbimento di potenza elettrica;
- i motori (drive motors) sono fortemente influenzati dalla lubrificazione, dalla velocità trasversale e dallo stato di usura degli assi.

Le prestazioni dei metodi di misura indiretti, come quelli di corrente/potenza motore possono essere migliorate attraverso lo sviluppo di modelli che identificano la distorsione introdotta dal sensore all'interno sistema meccanico/elettromeccanico. Una serie di studi hanno fornito una migliore comprensione del segnale per diverse caratteristiche dei mandrini e dei sistemi di azionamento assi [Stein 1990, Altintas 1992, Mannan 1992, Prischow 1999].

Mannan e Broms [Mannan 1992] hanno eseguito un'indagine sulla influenza della temperatura nella misurazione della corrente motore. Le indagini di laboratorio svolte da Ketteler [Ketteler 1999] hanno riscontrato una variazione del 12% della potenza assorbita dal mandrino tra macchina a riposo e macchina "calda" dopo un ciclo di lavoro.

In sintesi, solo una piccola parte dei segnali di coppia o potenza degli assi e dei mandrini dipende dalla lavorazione. La potenza totale assorbita è infatti una funzione complessa e spesso aleatoria dei parametri cinematici dell'asse/mandrino (posizione, velocità ed accelerazione) e delle forze agenti sull'asse/mandrino (di inerzia, di attrito, di taglio, ed altre) e da altri fattori non controllabili quali la temperatura dell'olio di lubrificazione. Pertanto, spesso non è facile o possibile separare la componente dovuta al taglio (che a sua volta dipende dallo stato dell'utensile) dalle altre componenti.

Inoltre, a causa delle grandi masse collegate, il segnale dell'assorbimento di potenza ha uno scarso contenuto in frequenza, quindi non è adeguato per monitorare fenomeni che variano

rapidamente nel tempo – come le collisioni e le rotture utensile – qualora la conoscenza dei valori medi della grandezza misurata non sia sufficiente ai fini del monitoraggio.

Da un'analisi delle tipologie di lavorazioni e delle caratteristiche delle macchine utensili di Micra, questo approccio non risulta idoneo per il conseguimento degli obiettivi preposti. Per esempio, coppie e potenze di taglio di operazioni di finitura su leghe leggere (tipiche in Micra) sono praticamente trascurabili rispetto agli altri contributi (inerziali, di attrito) che costituiscono il segnale misurato.

Di conseguenza, alla luce delle considerazioni fin qui svolte, l'ipotesi di considerare segnali di coppia/potenza ricavati dagli assi/mandrini della macchina utensile per funzioni di monitoraggio di processo viene eliminata.

3.4.2 MISURE DI TEMPERATURA

Per quanto concerne le misure di temperatura, queste sono correlate soltanto con il degrado dell'utensile, in quanto collisioni e vibrazioni anomale non hanno un effetto immediato in termini di variazioni di temperatura nella zona di taglio o di parti del sistema portautensile-utensile-pezzo-attrezzatura portapezzo. Inoltre, le misure di temperatura pongono in generale notevoli problemi di affidabilità, praticità e flessibilità. Per esempio, le misure eseguite con pirometri richiederebbero delle calibrazioni preventive al fine di identificare i coefficienti di emissività delle superfici radianti ispezionate. Volendo misurare le temperature nella zona di taglio, il comportamento caotico del truciolo potrebbe disturbare non poco le misure. Eventuali termocoppie dovrebbero essere installate molto vicine al punto di taglio, fatto non possibile in fresatura.

Pertanto, anche le misure di temperatura sono fortemente sconsigliate per potenziali applicazioni in Micra.

3.4.3 MISURE DI EMISSIONI SONORE

La misura di emissioni sonore tramite semplici microfoni posizionati in vicinanza della zona di taglio generalmente è abbastanza promettente per gli scopi di monitoraggio preposti. Tuttavia, rumori ambientali tipici di un vero reparto produttivo – provenienti dalle macchine utensili, impianti e sistemi ausiliari funzionanti nelle vicinanze del punto ove è collocato il microfono – potrebbero disturbare la misura, influenzando negativamente sull'accuratezza della classificazione dello stato dell'utensile/processo.

Pertanto, l'utilizzo di microfoni in Micra è fortemente sconsigliata.

3.4.4 MISURE DI EMISSIONE ACUSTICA ULTRASONICA (AE)

I sensori di emissione acustica ultrasonica misurano le onde elastiche che scaturiscono dal processo di taglio, da eventuali collisioni e da altri fenomeni fisico-meccanici, le quali si propagano attraverso il sistema pezzo-attrezzatura portapezzo o attraverso il sistema utensile-portautensile, vedi Figura sottostante.

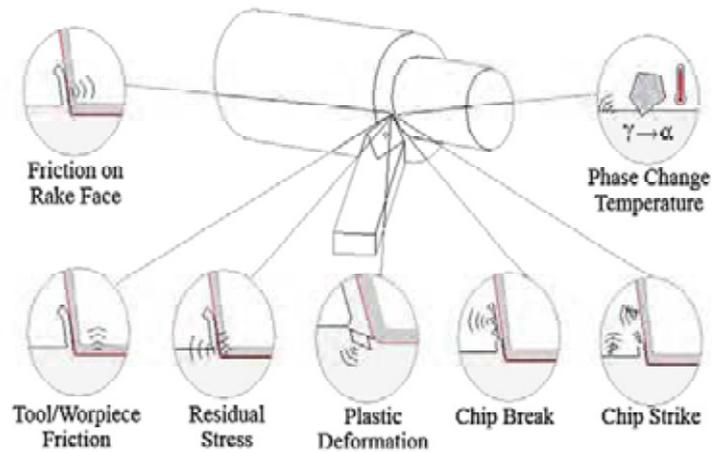


Figura 3.2. Caratteristiche del processo di taglio rilevabili mediante analisi dei segnali AE [Teti 2010].

Questi sensori possiedono una elevata larghezza di banda, tipicamente da 50 a 900kHz. Recenti studi hanno messo in evidenza che il segnale di AE è ripetutamente riflesso dalle superfici interne della struttura in cui il sensore è montato [Jemielniak 2001]. Ciò determina la durata prolungata del segnale registrato dal sensore. Inoltre, a causa delle elevate frequenze di campionamento necessarie (2MHz, per esempio), la mole di dati raccolti può essere in taluni casi eccessiva. Pertanto, si rende necessaria un'adeguata analisi ed elaborazione dei dati raccolti, al fine di estrarre degli indicatori sintetici in grado di rappresentare lo stato del sistema. Per ridurre la mole di dati da acquisire ed anche l'onere di calcolo, spesso si considera il solo segnale AE_{RMS} , ottenuto dal segnale grezzo in seguito ad integrazione del segnale (considerato in valore assoluto) su un intervallo di tempo predefinito (dipendente dalla costante di tempo del filtro installato nell'unità di condizionamento). Ciò consente di adottare una frequenza di campionamento notevolmente minore.

I sensori AE basati sul principio piezoelettrico sono i più promettenti per applicazioni industriali (rispetto a quelli capacitivi, più accurati ma anche più delicati).

Si sottolinea inoltre che i sensori AE non sono disturbati da rumore sonoro ambientale, al contrario dei microfoni, e sono insensibili a campi elettrici e magnetici.

I sensori AE per il loro montaggio possono richiedere l'utilizzo di un materiale di accoppiamento tra superficie e sensore. Questi ultimi devono essere liberi da sporcizia, vernice, o qualsiasi altro ostacolo che può influenzare l'accoppiamento acustico. Più lontano il sensore AE è posto dalla sorgente, maggiore è l'attenuazione del segnale. Questo ha implicazioni significative sulle misurazioni di AE durante le lavorazioni. Se il sensore AE viene montato in un punto del pezzo da lavorare, un fattore da tenere in considerazione è che durante la lavorazione cambia continuamente la distanza tra sensore e sorgente. La scelta della collocazione del sensore deve essere quindi cruciale [Woulfe, 2000].

Concludendo, i sensori di emissione acustica ultrasonica (AE) sono promettenti per applicazioni presso le aziende coinvolte nel progetto di ricerca.

Per fissare le idee, consideriamo un modello della Kistler (Kistler8152B), vedi Figura 3.3. Il sensore è di piccole dimensioni, e si può montare sulla attrezzatura portapezzo o sul portautensile, il più vicino possibile alla sorgente (punto di contatto utensile-pezzo). Il sensore ha un alloggiamento molto robusto saldato. Si può fissare alla superficie attraverso una basetta magnetica o una vite mordente o un bullone M6, vedi Figura 3.4. o 1/4-28 bullone è tutto ciò

che è necessario. L'elemento sensibile, fatta di ceramica piezoelettrica, è montato su una membrana di acciaio sottile. La sua costruzione determina sensibilità e la risposta in frequenza del sensore. L'elemento che realizza il contatto con la superficie del corpo meccanico è leggermente sporgente rispetto alla struttura esterna del sensore, per garantire un buon accoppiamento. Si raccomanda comunque di rispettare le indicazioni in Figura 3.4, per garantire un buon contatto. L'utilizzo di un grasso molto viscoso siliconico è inoltre raccomandato per migliorare le condizioni di contatto.

Si ricorda tuttavia che questo sensore necessita di un'unità di condizionamento, cui il sensore è collegato tramite i cavi di Figura 3.3. Di conseguenza, si dovrà progettare l'attrezzatura per tenere conto della presenza dei cavi.

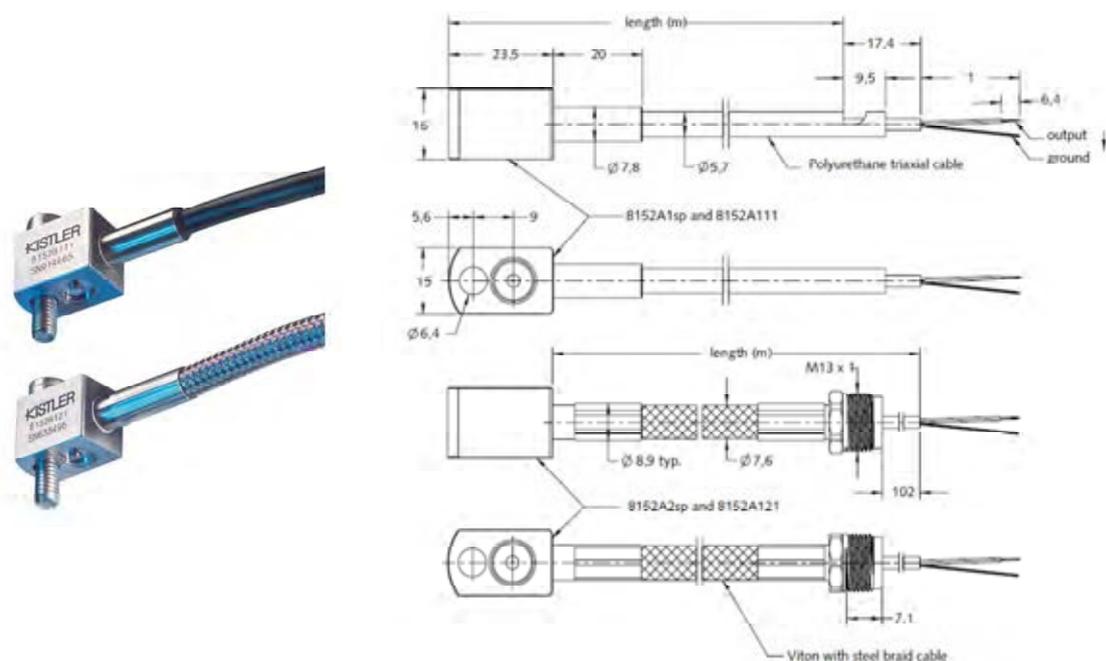


Figura 3.3. Caratteristiche sensore AE commerciale (Kistler 8152B) [Kistler website].

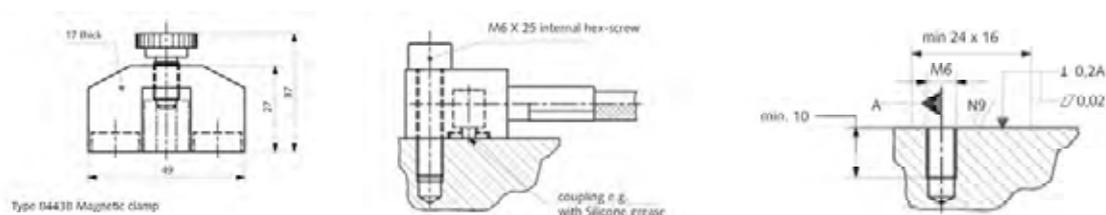


Figura 3.4. Possibili configurazioni di fissaggio del sensore AE: tramite dispositivo magnetico (a sinistra), oppure tramite vite mordente (centro). A destra le condizioni della superficie per un buon accoppiamento.

In Figura 3.5 è illustrato un esempio di applicazione di sensore di emissione acustica, il quale è fissato su un corpo metallico posto sotto il pezzo, solidale alla morsa che trattiene il pezzo da

lavorare. Per un corretto funzionamento del sensore, e per garantire misure ripetibili, è opportuno:

- collocare il sensore il più vicino possibile al punto di taglio, compatibilmente con la necessità di evitare la saturazione del segnale;
- ridurre al minimo le interfacce derivanti dall'interposizione di corpi metallici tra la sorgente dell'emissione acustica e posizione del sensore, che possono causare attenuazione del segnale variazione del suo contributo armonico;
- garantire la ripetibilità del fissaggio del pezzo nell'attrezzatura, assicurando che le onde elastiche possano propagarsi dal punto di taglio al sensore attraverso corpi in contatto reciproco.

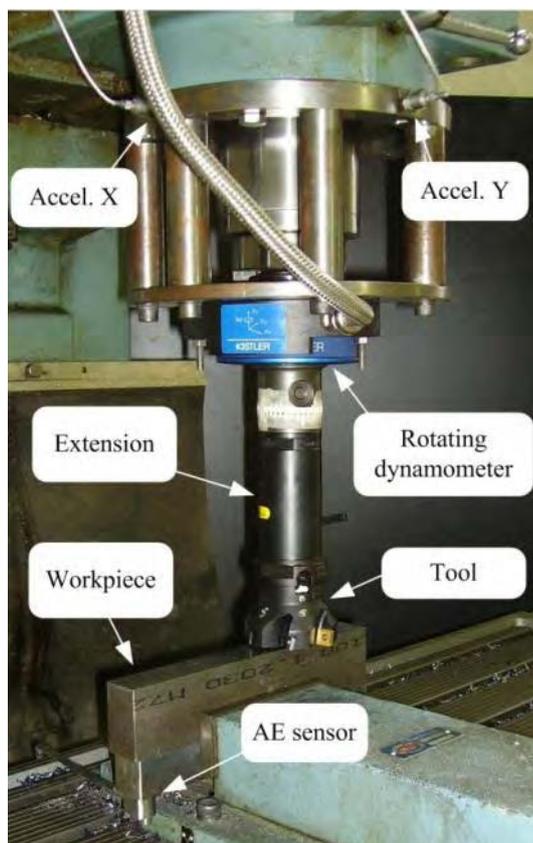


Figura 3.5. Esempio di configurazione sperimentale su una fresatrice tradizionale a mandrino verticale, comprendente una morsa per il serraggio del pezzo lavorato, sotto il quale è posizionato un corpo metallico cui è connesso un sensore di emissione acustica (Kistler 8192B). Sono anche presenti un dinamometro rotante (Kistler 9123C), e due accelerometri piezoelettrici monoassiali (Kistler 8704B50) fissati sull'incastellatura del mandrino [Kuljanic 2008].

3.4.5 MISURE DI VIBRAZIONI

Per quanto riguarda la misura delle vibrazioni/accelerazioni di parti del sistema portautensile-utensile-pezzo-portapezzo, sensori a contatto quali gli accelerometri piezoelettrici sono maggiormente raccomandati, poiché le sonde non a contatto (di tipo capacitivo, induttivo, ottico) sono maggiormente sensibili a variazioni di temperatura, umidità, materiale e caratteristiche della superficie ispezionata (necessariamente metallica!), presenza di sporcizie (quali trucioli, fluido lubro-refrigerante) e quindi sono più idonei per applicazioni in laboratorio ove le condizioni di processo e di misura sono più controllate e controllabili.

Di conseguenza, l'applicazione in Micra di accelerometri piezoelettrici (da integrare in adeguate attrezzature portapezzo/portautensile) è fortemente raccomandata, anche grazie alle eccellenti proprietà dinamiche ed alla sensibilità, robustezza e facilità di collocazione di tale tipo di sensore.

Per esempio, gli accelerometri triassiali della Kistler hanno caratteristiche compatibili con le applicazioni d'interesse, come il modello sotto riportato. Si tratta di un accelerometro piezoceramico triassiale miniaturizzato con ottime caratteristiche dinamiche. Esistono diverse versioni, caratterizzate da diverse sensibilità (ovvero range). Da un'analisi delle applicazioni tipiche in Micra ed altre simili riscontrate in letteratura, si consiglia una sensibilità da 20 a 10 mV/g, idonea per rilevare rotture utensili e vibrazioni anomale.

Il sensore presenta ingombri minimi e può essere fissato meccanicamente tramite grani prigionieri o tramite supporti meccanici o magnetici intermedi.

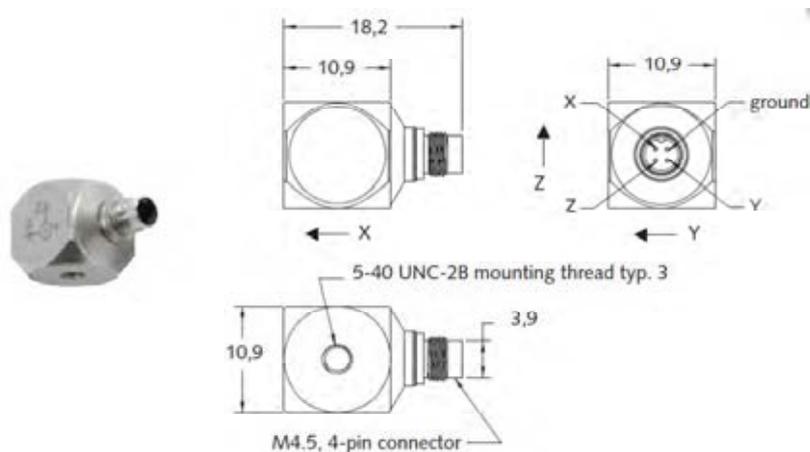


Figura 3.6 Accelerometro triassiale miniaturizzato Kistler 8763BXXXA (XXX=50-2000, a seconda della sensibilità ovvero del range). Idoneo per rilevare vibrazioni anomale, collisioni, rottura utensile.

Measure	Connect	Amplify	Output	Analyze
 Type 8763B...A or Type 8763B...B Low impedance IEPE	 Type 1756B... or Type 1734A... or Type 1784A... 4-pin neg. 3x BNC pos.	 Type 51... Power supply / signal conditioner	 Type 1511 BNC pos. BNC pos.	 not supplied

Figura 3.7 Catena di misura per accelerometro Kistler 8763BXXXA.

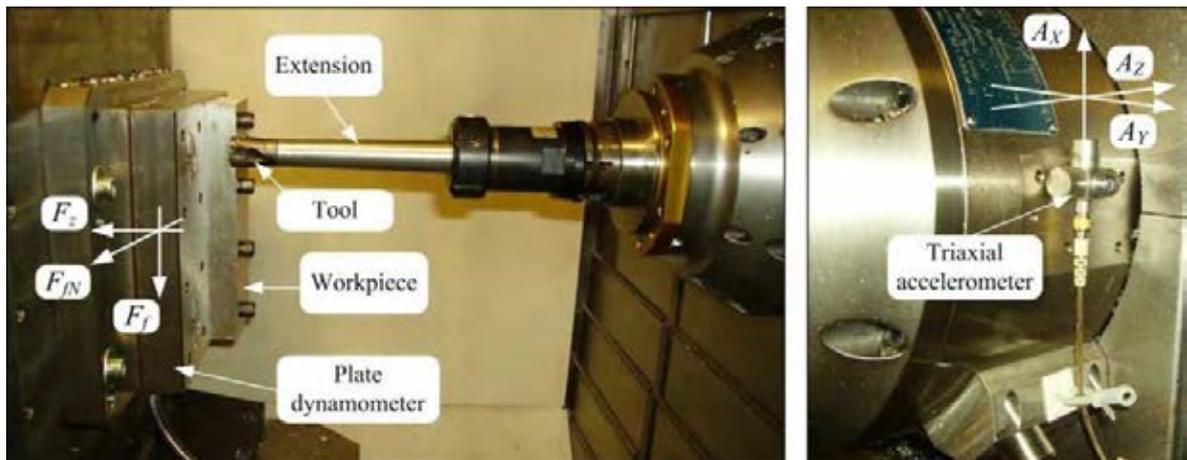


Figura 3.8. Esempio di configurazione sperimentale su una fresatrice CN a 3+1 assi, a mandrino orizzontale, comprendente un pallet rotante con attrezzatura a squadra, sulla quale è fissato un dinamometro piattaforma (Kistler 9255B) ove è bloccato il pezzo da lavorare. Il dinamometro viene utilizzato per misurare le forze di taglio scambiate tra utensile e pezzo. La configurazione sperimentale comprende anche un accelerometro triassiale Kistler (8792A50) fissato tramite vite mordente sull'incastellatura del mandrino. Questa configurazione è raccomandata per rilevare vibrazioni anomale e collisioni [Kuljanic 2009].

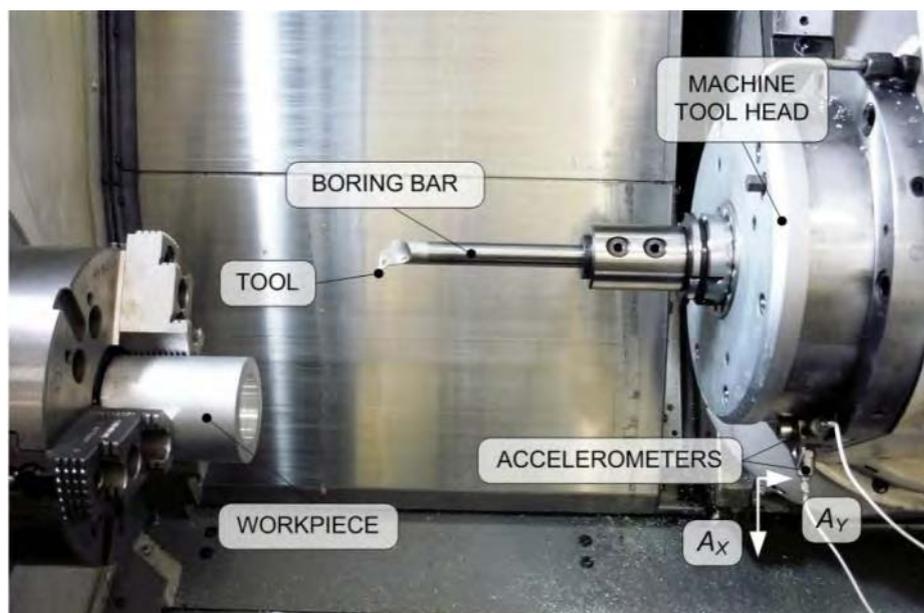


Figura 3.9 Esempio di configurazione sperimentale su una macchina utensile CN multifunzionale (tornio-fresatrice), qui utilizzata per eseguire lavorazione di tornitura interna tramite barenno. Due accelerometri monoassiali (Kistler 8704B50) sono fissati sulla testa tramite un supporto dedicato. Questa configurazione è idonea per la rilevazione di vibrazioni anomale (chatter), rottura utensile collisioni [Sortino 2012].

In alternativa, esistono versioni con design più robusto di altri costruttori, come quello illustrato nel seguito. Si tratta di un accelerometro triassiale industriale ICP®. Gli accelerometri ICP®, acronimo di Integrated Circuit Piezoelectric, sono di tipo piezoelettrico, con amplificatore di carica integrato nella struttura ove alloggia la masserella sismica. Tale architettura potrebbe

risultare vantaggiosa in ambito industriale, in quanto riduce la complessità della catena di misura e potrebbe limitare l'effetto di disturbi di tipo elettromagnetico.

In altre parole, gli accelerometri ICP non necessitano di preamplificatore esterno, ma solo di un alimentatore esterno a corrente continua. Il segnale in uscita dall'accelerometro è in questo caso una differenza di potenziale e la catena di misura è detta a bassa impedenza. Questo accelerometro è di tipo a taglio con elementi sensibili ceramici. Nel dettaglio questa configurazione prevede l'elemento piezoelettrico attaccato tra un montante centrale e la massa sismica. Un anello esterno applica un precarico di compressione per dare rigidità alla struttura e per assicurare che il sensore lavori in regime lineare. In presenza di una accelerazione, la massa genera uno sforzo di taglio nel cristallo che per l'effetto piezoelettrico produce sugli elettrodi ad esso applicati delle cariche elettriche di segno opposto. La variazione di cariche elettriche nel tempo (dipendente dalla velocità di deformazione del cristallo) genera una corrente elettrica, legata all'accelerazione che l'ha indotta. L'output dagli elettrodi per mezzo di sottilissimi conduttori viene trasmesso ad un circuito interno, al trasduttore che ne effettua il condizionamento e poi al connettore. Questo modello, avendo l'elemento sensibile isolato rispetto alla base ed all'involucro dell'accelerometro, presenta una bassa sensibilità sia alle variazioni di temperatura che agli effetti di deformazione della superficie su cui è montato. Si noti tuttavia che gli ingombri del sensore sono notevolmente superiori (più di tre volte) rispetto al modello illustrato in precedenza, che rimane certamente un'alternativa interessante.

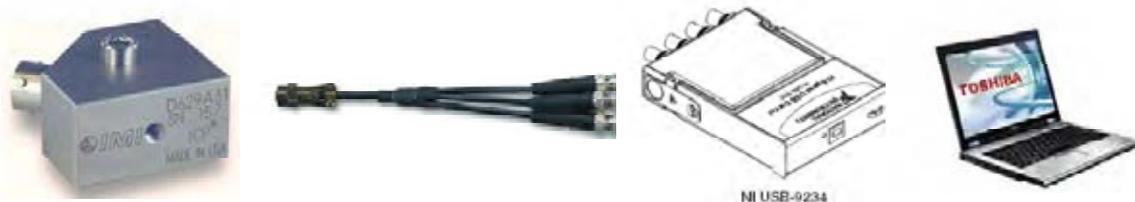


Figura 3.10 Accelerometro industriale ICP (a sinistra) e possibile catena di misura. Idoneo per rilevare vibrazioni anomale, collisioni, rottura utensile.

3.4.6 MISURE DI DEFORMAZIONI, FORZE E COPPIE DI TAGLIO

Per quanto riguarda la misura delle forze/coppie di taglio, si potrebbero impiegare degli *estensimetri* ("strain gauges") convenzionali o piezoelettrici (Figure 3.11-12), i quali misurano le deformazioni locali della superficie su cui sono applicati, da cui si possono stimare indirettamente le forze applicate sulla struttura. Gli svantaggi di tali sensori sono la moderata sensibilità, che può rendere necessario un indebolimento della struttura meccanica per amplificarne la flessibilità e quindi il segnale misurato, con conseguente riduzione di rigidità e peggioramento della risposta dinamica della catena di misura [Korkut 2003].

Inoltre, tali dispositivi richiedono un'attenta calibrazione e accorgimenti particolari atti a ridurre l'influenza delle variazioni di temperatura sulla lettura.

Quindi, tali sensori si prestano per la stima (non molto accurata) delle forze di taglio, che può essere impiegata per rilevare fenomeni violenti ed impulsivi quali le collisioni, purché tali collisioni coinvolgano la struttura su cui sono installati gli estensimetri. Al fine di rilevare collisioni tra altre parti in moto relativo della macchina utensile, sarà comunque necessario applicare anche altri sensori (per esempio, accelerometri piezoelettrici) collocati in punti strategici.

Il principale vantaggio di tali dispositivi consiste nel basso costo (specialmente gli estensimetri convenzionali di tipo resistivo), soprattutto nella prospettiva di dover essere sostituiti se danneggiati a seguito di una collisione.

Comunque, non si esclude che tali sensori possano essere idonei per rilevare la rottura dell'utensile e vibrazioni anomale, in lavorazioni di sgrossatura e forse semi-finitura, anche se tali ipotesi richiedono specifiche verifiche sperimentali.

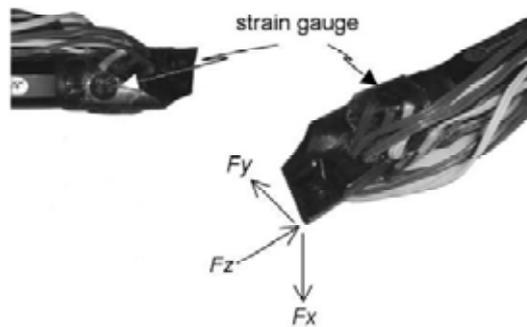


Figura 3.11 Esempio di applicazione di estensimetri (strain gauges), installati sul bareno portainsero, per la misura delle forze di taglio in tornitura interna [Scheffer 2004].

Volendo misurare deformazioni locali di una porzione del sistema portautensile-utensile-pezzo-portapezzo derivanti da forze di taglio o da collisioni, gli estensimetri convenzionali porrebbero qualche problema in termini di sensibilità, robustezza e praticità. Un'alternativa molto promettente sono i trasduttori di deformazione superficiale di nuova generazione basati su cristalli piezoelettrici, vedi Figure sottostanti.

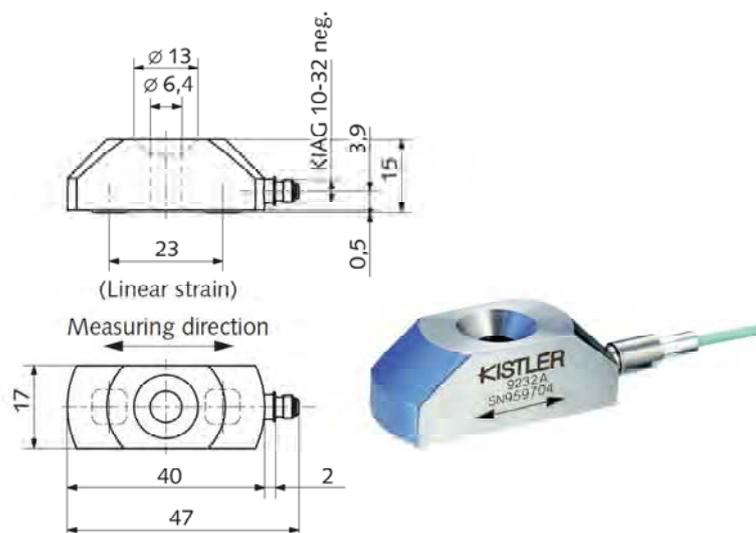


Figura 3.12 Sensore piezoelettrico per la misura della deformazione superficiale Kistler 9232A. Può essere utilizzato anche per stimare delle forze agenti sulla struttura meccanica su cui è montato. Idoneo per rilevare la rottura utensile o collisioni.

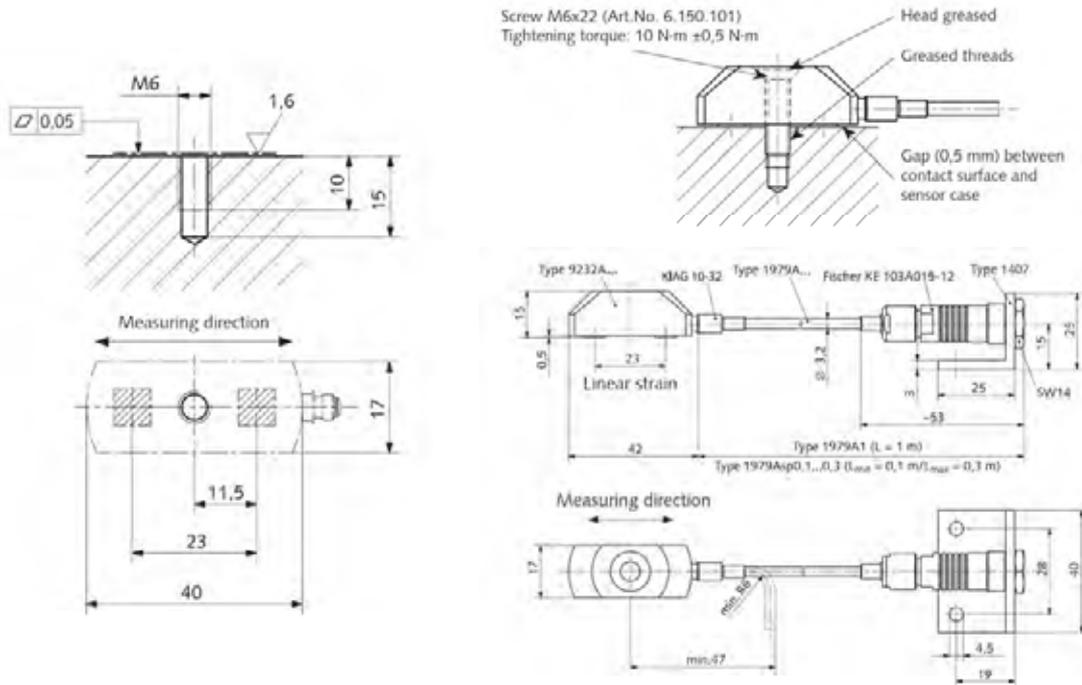


Figura 3.13 Indicazioni per l'installazione del sensore Kistler 9232A.

In alternativa, le celle di carico ed i dinamometri basati su cristalli piezoelettrici [Bernhard 2002] sono raccomandati per applicazioni industriali, grazie alla loro notevoli caratteristiche in termini di sensibilità, rigidità, accuratezza, robustezza, praticità, flessibilità, etc., come illustrato nel seguito.

Esistono diverse tipologie di dinamometri basati su cristalli piezoelettrici: celle di carico, dinamometri piattaforma, dinamometri rotanti.

Le celle di carico elementari sono tipicamente monoassiali (ovvero in grado di misurare una sola componente di forza di compressione/trazione lungo l'asse della cella o in direzione di taglio tangenziale) o triassiali (in grado di misurare le tre componenti ortogonali della forza risultante).



Figura 3.14 Celle di carico piezoelettriche monoassiali trazione-compressione già precaricate (Kistler 93XXB), con range da $\pm 2.5\text{kN}$ a $\pm 120\text{kN}$.

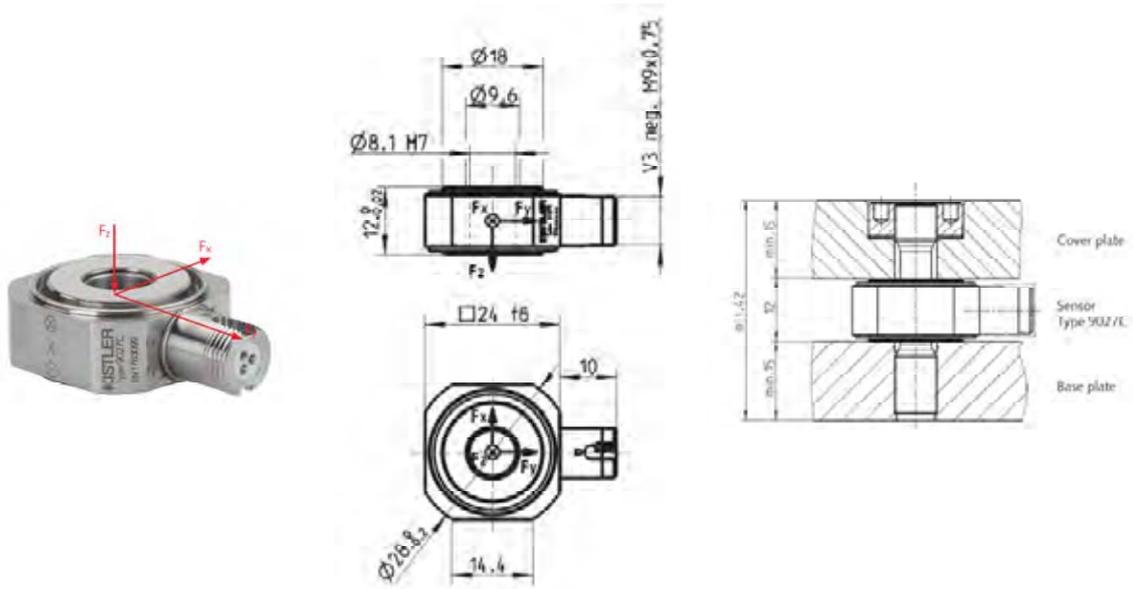


Figura 3.15 Cella di carico piezoelettrica triassiale non precaricata Kistler 9027C (range $\pm 4\text{kN}$).

Le celle di carico elementari possono essere combinate tra loro in vari modi per realizzare dei dinamometri più complessi, quali i dinamometri piattaforma.

Un esempio di dinamometro piattaforma piezoelettrico interposto tra pezzo e struttura di fissaggio del pezzo è mostrato in Figura 3.8. Tale configurazione consente di misurare le forze agenti sul pezzo durante la lavorazione, permettendo la rilevazione della rottura utensile e delle vibrazioni anomale. Inoltre, date le ottime caratteristiche dello strumento, è verosimile riuscire a ricavare una stima indiretta dell'usura. Lo strumento è in grado di rilevare le collisioni tra utensile e pezzo, ma con conseguente probabile danneggiamento dello strumento. Ciò lo rende poco adatto per applicazioni industriali, a causa dell'elevato costo.

Un altro esempio di dinamometro piattaforma è mostrato in Figura 3.16.



Figura 3.16. Dinamometro piattaforma Kistler 9121 per misura forze di taglio in tornitura, compatibile con montaggio della struttura utensile-portautensile su torretta girevole di un tornio CN.

Ad ogni modo, è in generale preferibile progettare attrezzature portautensili o portapezzo speciali in cui sono inserite celle di carico elementari scelte ad hoc. Infatti, l'installazione di pesanti attrezzature sopra dinamometri piattaforma commerciali già esistenti riduce fortemente le prestazioni dinamiche degli strumenti.

Un esempio di dinamometro rotante piezoelettrico per applicazioni di fresatura e foratura è mostrato in Figura 3.5. Tale strumento misura le componenti della forza di taglio risultante e la coppia di taglio scambiate tra utensile e pezzo durante il processo, ed è formato da una parte rotorica solidale all'utensile rotante ed una parte statorica solidale all'incastellatura del mandrino. L'alimentazione della parte rotorica e la comunicazione dei dati è gestita tramite telemetria. Sebbene questo tipo di dinamometro fornisca delle prestazioni interessanti, non è purtroppo idoneo per applicazioni industriali in quanto il suo elevato costo ed il fatto di poter essere danneggiato dalle collisioni lo rende poco attraente. Inoltre, non è facilmente compatibile con il cambio utensile, e tende ad indebolire il sistema portautensile ed a limitarne i parametri di funzionamento.

Pertanto, l'applicazione di dinamometri rotanti in ambito industriale (e specialmente in Micra) è sconsigliata.

In sintesi, per le lavorazioni con utensile rotante quali fresatura, foratura e rettifica si consiglia di usare:

- *un accelerometro triassiale piezoelettrico montato sull'incastellatura del mandrino principale;*
- *un sensore di emissione acustiche, uno o più accelerometri piezoelettrici, sensori di deformazione superficiale, ed eventualmente una o più celle di carico piezoelettriche elementari sull'attrezzatura portapezzo.*

Nel caso di lavorazioni con utensile stazionario, come la tornitura, si consiglia di usare

- *un sensore di emissione acustiche, un accelerometro piezoelettrico triassiale, uno o più sensori di deformazione superficiale, ed eventualmente una o più celle di carico piezoelettriche elementari da integrare nella struttura portautensile o nella torretta girevole, curando la scelta della collocazione, dei cablaggi, della trasmissione del segnale, al fine di non interferire con il cambio utensile.*

3.5 METODOLOGIE PER LA PROGETTAZIONE E PER LA VERIFICA DI ATTREZZATURE STRUMENTATE

3.5.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

La scelta e la relativa progettazione di un'attrezzatura si basa su di un'analisi accurata delle superfici del pezzo e delle lavorazioni da effettuare in ogni sua fase e sottofase. L'analisi deve tenere in considerazione la precisione dimensionale da rispettare e le rispettive tolleranze, al fine di individuare le superfici o gli enti geometrici attraverso il quale sia possibile riferire il pezzo nello spazio di lavoro della macchina e di fissarlo in posizione stabile e senza deformazioni durante la lavorazione [Santochi 2000]. Non sempre è possibile utilizzare queste superfici appena citate come fissaggio. Nell'eventualità non ci siano, bisognerà prevedere delle borchie, alette, orecchiette o altri elementi simili adatti a tale scopo.

Al fine di una corretta progettazione delle attrezzature, è importante ricordare che la posizione di un corpo rigido nello spazio è esprimibile attraverso sei parametri indipendenti, ovvero sei gradi di libertà, tre traslazioni e tre rotazioni. Il principio consiste nell'eliminare questi sei gradi di libertà con il minimo numero indispensabile di punti di contatto tra pezzo ed attrezzatura. In altri

termini, il numero, le posizioni e le direzioni lungo le quali si realizzano i vincoli devono essere tali da bloccare completamente il pezzo durante la lavorazione [Boyle 2011].

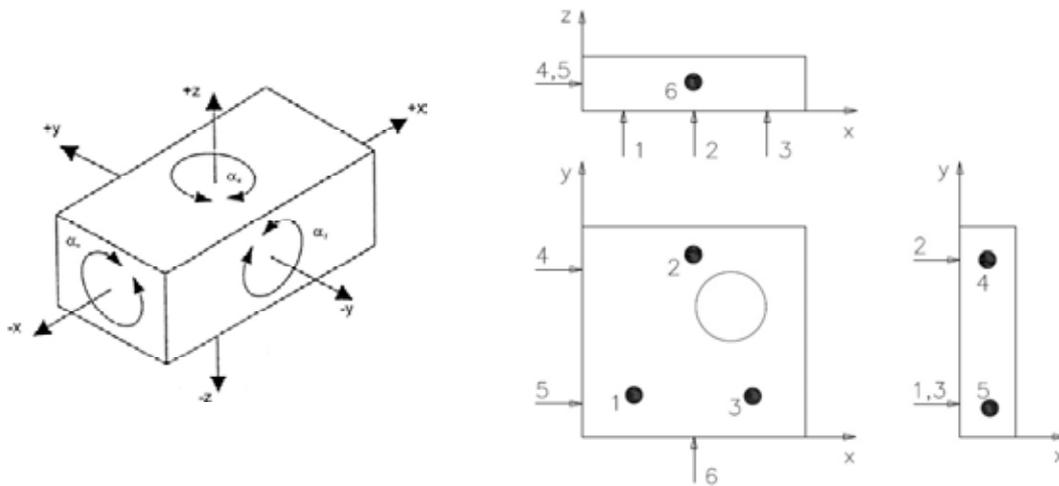


Figura 3.17. Gradi di libertà di un corpo rigido, che è necessario bloccare attraverso l'azione degli elementi dell'attrezzatura (sx), e principio del posizionamento isostatico tramite 6 punti (dx) [Santochi 2000].

Il fissaggio isostatico potrebbe essere realizzato tramite 6 punti, vedi Figura 3.18. I tre punti d'appoggio 1, 2 e 3 toglierebbero al pezzo tre gradi di libertà lasciando il pezzo libero di assumere qualunque posizione sul piano di appoggio. Con l'aggiunta dei punti 4 e 5 la rotazione sul piano (x,y) sarebbe vincolata, assieme alla traslazione lungo l'asse x. Infine, la traslazione lungo l'asse y verrebbe impedita dal punto di contatto 6 [Santochi 2000].

Si noti che qui si è implicitamente assunto che il vincolo agisca sia in un verso che nell'altro. Nella realtà, sarà necessario aggiungere altri punti di contatto (per i quali è impedita la compenetrazione attrezzatura-pezzo ma non il distacco) per impedire rotazioni e traslazioni sia in un verso che nell'altro, a meno che le direzioni delle forze di taglio siano sempre unilaterali, come per esempio nel caso della forza assiale in foratura. Si noti inoltre come nella pratica i punti di contatto siano sostituiti da superfici con estensione finita, che dev'essere sufficientemente ampia per evitare deformazioni locali indesiderate e danni alla superficie del pezzo.

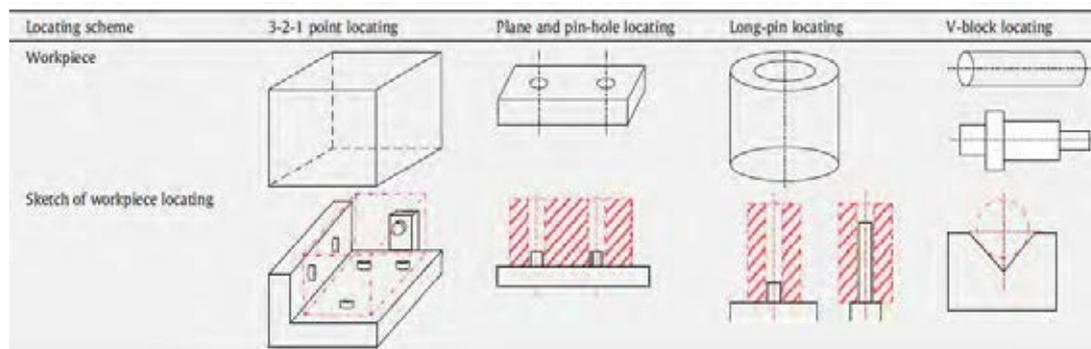


Figura 3.18. Modi di posizionamento usuali per pezzi di forma geometrica specificata [Peng 2011].

Fatta questa premessa, si ricordano le seguenti definizioni:

Superfici di riferimento: sono le superfici del pezzo dove sono localizzati i 6 punti, che entrano cioè in contatto con gli elementi dell'attrezzatura che materializzano i punti di contatto. Devono essere abbastanza ampie in modo tale da poter garantire un appoggio sicuro e devono, per quanto possibile, coincidere con i riferimenti di quotatura. Le superfici di riferimento per una data sottofase vengono solitamente realizzate alla macchina utensile nelle sottofasi o fasi precedenti.

Superfici di partenza: sono superfici del grezzo o semi lavorato di partenza che svolgono la funzione di superfici di riferimento, in genere durante la prima sotto-fase, destinata a realizzare le superfici di riferimento vere e proprie. Se per esempio si intende lavorare al tornio pezzi di forma assialsimmetrica, una superficie di partenza è solitamente la superficie cilindrica esterna del grezzo o della barra. Se il semilavorato è ottenuto da lavorazioni poco precise come l'ossitaglio o il taglio alla sega, è necessario effettuare delle operazioni preliminari sul semilavorato per ottenere superfici di partenza adatte allo scopo.

Superfici di appoggio: sono quelle attraverso le quali si scaricano le sollecitazioni generate dalle forze di taglio. Vengono scelte in modo da evitare deformazioni del pezzo durante le lavorazioni e possono coincidere con le superfici di riferimento. I punti di appoggio devono essere posizionati su superfici già lavorate, ove possibile, comprendere il centro di gravità del pezzo ed essere posizionati il più lontano possibile fra di loro per garantire la sua stabilità [Kaya 2006].

Superfici di bloccaggio: sono quelle su cui agiscono i dispositivi di bloccaggio dell'attrezzatura, che hanno lo scopo di impedire il movimento del componente da lavorare, obbligandolo a rimanere in contatto con le superfici di riferimento. In alcuni casi, queste superfici possono coincidere con quelle di riferimento.

3.5.2 ATTREZZATURE SENSORIZZATE

Verranno ora delineate le principali fasi per una corretta progettazione e verifica di attrezzature di staffaggio pezzo (o utensile) sensorizzate, idonee all'applicazione in ambienti produttivi come quello riscontrato in Micra. Verranno analizzate le caratteristiche che ogni tipo di attrezzatura dovrà avere a seconda del tipo di elementi, della forma e delle caratteristiche del semilavorato di partenza, e delle tolleranze geometriche e dimensionali che dovrà rispettare. La progettazione di un'attrezzatura di staffaggio può essere decomposta in diverse fasi, come ben descritto recentemente da Hunter et al. [Hunter 2006]. Tuttavia, le fasi enucleate, valide in particolare per attrezzature convenzionali, vanno ampliate ed adeguate al caso di attrezzature strumentate, molto più complesso, data la presenza di sensori integrati nella struttura. I diagrammi di flusso rappresentato in Figura 3.19 evidenzia l'aumento di complessità delle procedure progettuali.

Facendo ora riferimento al caso della fresatura, di particolare importanza ed interesse per Micra, l'attrezzatura strumentata comprenderebbe:

- uno o più sensori di deformazione superficiale (estensimetri convenzionali o piezo), atti a stimare indirettamente le forze di taglio; tali sensori andrebbero collocati, in linea di principio, nei punti dell'attrezzatura che subiscono le massime deformazioni superficiali a seguito delle forze di taglio. Tali punti possono essere individuati grazie all'analisi statica eseguita con software agli elementi finiti (FEM).
- Uno o più accelerometri piezoelettrici, da collocare nei punti che presentano gli spostamenti più accentuati, derivanti dalle vibrazioni che scaturiscono dal processo di taglio. Tali punti andrebbero determinati dall'analisi dinamica FEM del sistema attrezzatura-pezzo. Si noti che in generale tali punti sono diversi dai punti a maggior deformazione superficiale.

- Un sensore di emissioni acustiche ultrasoniche, installato sull'attrezzatura, il più vicino possibile alla zona di taglio.

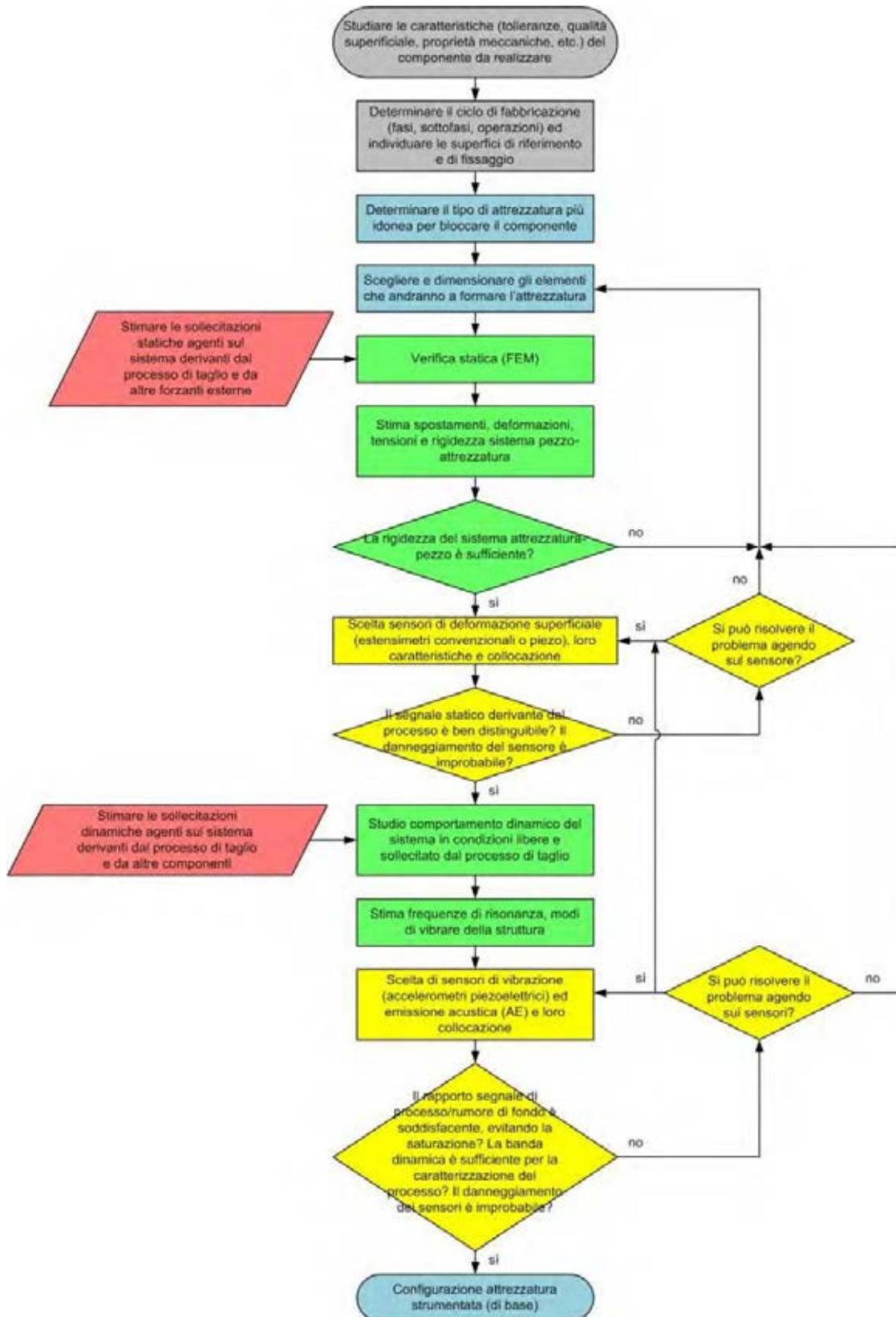


Figura 3.19 Diagramma di flusso per la progettazione di un attrezzatura strumentata (configurazione di base senza celle di carico)

Come evidenziato dal diagramma di Figura 3.19, il dimensionamento delle varie parti che costituiscono l'attrezzatura e la scelta e collocazione dei sensori è tutt'altro che banale, in quanto si devono soddisfare requisiti contrastanti.

Infatti, al fine di garantire il rispetto delle tolleranze dimensionali, di forma e la qualità superficiale del pezzo lavorato, è necessario conferire al sistema attrezzatura-pezzo un'elevata rigidità. Tuttavia, è anche richiesto con un certo grado di deformabilità alla struttura per consentire la rilevazione delle forze di taglio e delle vibrazioni di processo da parte dei sensori installati. In presenza di un'eccessiva rigidità, non si otterrebbe un buon rapporto tra le sollecitazioni (o vibrazioni) dovute al processo ed il rumore ambientale di fondo. Non da ultimo, è importante anche curare la salvaguardia dell'integrità dei sensori nelle condizioni operative più disparate, comprendendo possibilmente le collisioni tra utensile e pezzo o tra utensile ed attrezzatura.

La configurazione di base fin qui illustrata dovrebbe essere in grado di rilevare efficacemente vibrazioni anomale (chatter), rottura utensile e collisioni, che sono i fenomeni più gravi ed energetici.

La stima indiretta dell'usura utensile, tuttavia, è assai più delicata e difficile, in quanto il degrado dell'utensile è un fenomeno progressivo e lento, che potrebbe non influire in modo significativo sui segnali sensoriali oppure non essere facilmente distinguibile dal rumore di fondo.

3.5.3 CASO STUDIO TEORICO

Per illustrare la metodologia proposta, si farà riferimento ad un caso studio ispirato dalle tipologie di pezzi lavorati in Micra. L'attrezzatura di fissaggio da progettare deve contenere uno spezzone di profilo alare estruso, rappresentato in Figura 3.20. Si assume che la dimensione trasversale dell'estruso di alluminio sia nell'intervallo 100-250 mm, e la lunghezza dell'estruso sia proporzionale alla sua larghezza.

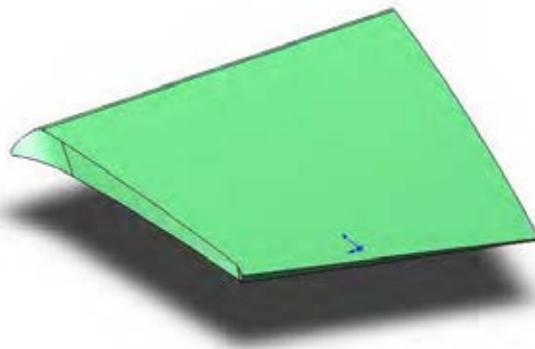


Figura 3.20 Modello grafico 3D della pala di un ventilatore centrifugo considerata come caso studio

Se si suppone di dover fissare pezzi di forma simile ma dimensioni diverse sulla medesima attrezzatura, quest'ultima dovrà modulare, in modo da renderla compatibile con i diversi formati d'interesse. Si è pensato quindi ad un sistema componibile, con delle dime estraibili e sostituibili a seconda del modello di pala che si lavorerà. Al fine di ridurre i tempi passivi associati al montaggio pezzo, si potrebbe immaginare che l'attrezzatura sia semi-automatica, ovvero munita di attuatori ad hoc per il bloccaggio del pezzo.

Tra i diversi sistemi di fissaggio, quello a staffa sembra essere il migliore, in quanto consente di bloccare il componente in modo sicuro e rigido, considerando che devono essere eseguite delle lavorazioni di fresatura su tre dei quattro lati della pala.

3.5.4 DIMENSIONAMENTO DI MASSIMA DEI COMPONENTI

Il dimensionamento della staffa viene eseguito tenendo in considerazione gli sforzi agenti su di essa. Per il dimensionamento di massima si potrebbero considerare le forze massime ottenibili dalla macchina utensile (per esempio, fresatrice CN a tre assi, con numero massimo di giri del mandrino 6000 rpm e potenza nominale 7.5kW) in condizioni prossime a quelle operative. Supponendo di eseguire la fresatura con una fresa di diametro 16 mm, sarà necessario assumere $n=6000$ rpm per raggiungere velocità di taglio adeguate alla lavorazione. In tali condizioni, il mandrino erogherebbe una coppia pari circa a 10Nm, che corrisponderebbe ad una forza tangenziale pari a 1060 N circa, ovvero

$$F_{c,max} \approx \frac{60 \cdot 10^3 P_n}{v_c} = \frac{60 \cdot 10^6 P_n}{\pi D n} 1060 \text{ N} \quad (3.1)$$

Se il coefficiente d'attrito all'interfaccia pezzo-staffa è pari a $\mu=0.1$, la forza che la staffa deve esercitare dovrà essere

$$F_{staffa} \approx \frac{F_{c,max}}{\mu} = 10600 \text{ N} \quad (3.2)$$

Questo dato ci permette di dimensionare la staffa ed il cinematismo a monte di essa, compreso l'attuatore (che potrebbe essere un cilindro pneumatico per automazioni).

Dopo aver scelto materiali, forma e dimensioni dei vari componenti meccanici costituenti l'attrezzatura, è opportuno eseguire verifiche statiche analitiche o facendo uso di softwares agli elementi finiti (FE) per valutare la resistenza di tali componenti alle forze di serraggio previste, che possono essere considerevoli.

Per esempio, volendo verificare la resistenza meccanica della staffa, si andrà ad imporre un vincolo di cerniera sul foro del perno trasversale da diametro 12 mm. In questo modo il perno funge proprio da cerniera e permette il movimento rotatorio della staffa, ma non la traslazione sui tre assi. Questo sistema funziona con il principio di una leva semplice con fulcro al centro e deve presentare un ulteriore vincolo per eliminare il grado di libertà della rotazione attorno al fulcro. Questo vincolo è imposto sulla base di appoggio della staffa con il pezzo ovvero sulla superficie rettangolare. Fatto ciò si può impostare il carico che agisce sulla superficie cilindrica su cui agisce la forza scambiata tra il grano di registro e la staffa. Questa forza deriva dalla spinta del cilindro pneumatico che comanda il serraggio della staffa sul pezzo.

Successivamente, dopo aver stimato le massime forzanti esterne (componenti statiche) agenti sul pezzo e sull'attrezzatura durante il processo, è opportuno eseguire altri calcoli statici al fine di valutare la rigidità del sistema, e per individuare possibili posizioni dei sensori.

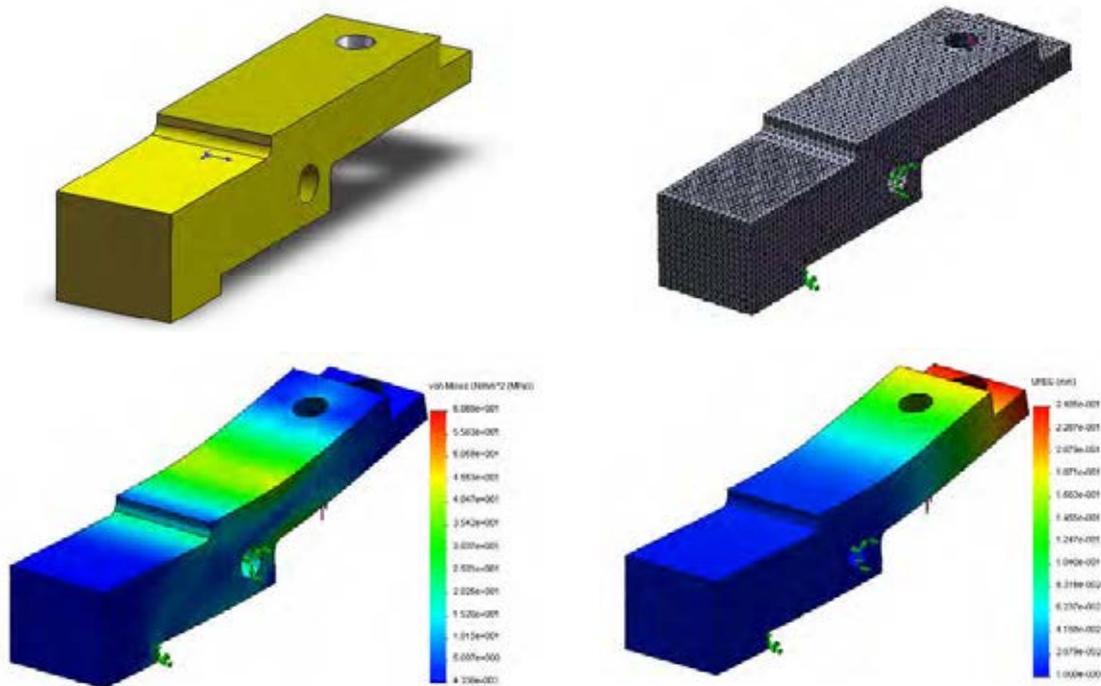


Figura 3.21 Modello 3D della staffa (in alto a sx), meshatura (alto a dx), distribuzione delle sollecitazioni equivalenti di Von Mises (in basso a sx) ed degli spostamenti risultanti (in basso a dx) a seguito dell'applicazione delle forze di serraggio.

3.5.5 STIMA DELLE FORZE DI TAGLIO

Il rispetto delle tolleranze dimensionali e di forma assegnate a disegno dipende dalla rigidità del pezzo nel punto istantaneo di contatto con l'utensile e dall'entità delle forze di taglio. Pertanto, la stima anche approssimata delle forze di taglio durante l'intera lavorazione è d'importanza cruciale. Viene ora considerata il tipo di pala più esile e flessibile tra quelle compatibili con gli intervalli specificati inizialmente (caso più critico).

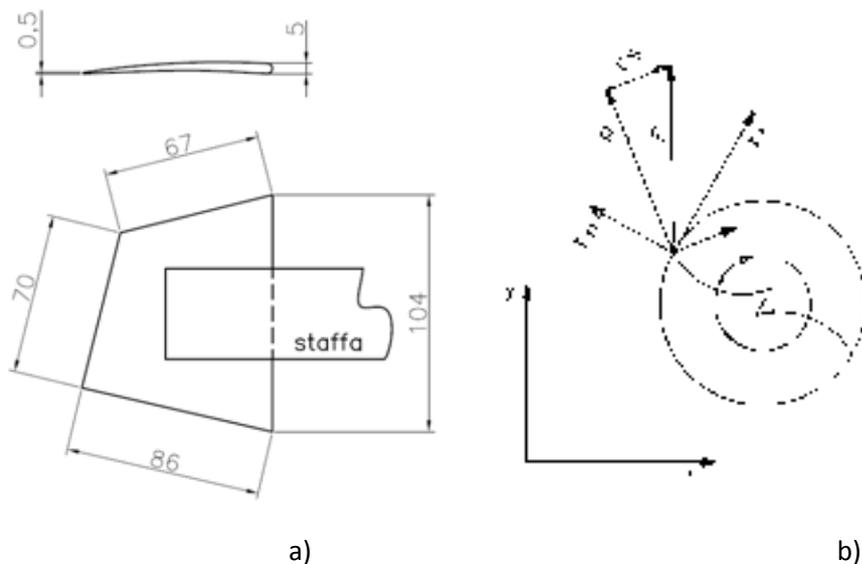


Figura 3.22. a) Vista in pianta e laterale della paletta, b) vista assiale della fresa, rappresentazione delle forze di taglio agenti su di un dente durante la fresatura.

Il percorso di taglio della pala, inizia dal bordo inferiore di lunghezza 86 mm, prosegue per verso il secondo bordo, quello di sinistra, di lunghezza 70 mm ed infine esegue il taglio finale seguendo il terzo bordo, ovvero quello superiore di lunghezza pari a 67 mm.

Le forze agenti durante il processo di fresatura della pala sono rappresentate nella Figura 3.22 b), tra cui si distinguono la forza di taglio principale F_t (o F_c in direzione tangenziale) e la componente normale F_n .

Per stimare la componente principale si può utilizzare la seguente relazione

$$F_t = k_s A \quad (3.3)$$

dove A è la sezione indeformata del truciolo. Facendo riferimento per semplicità a frese a candela con angolo d'elica molto piccolo o nullo, la sezione del truciolo è data da

$$A = h a_p \quad (3.4)$$

essendo h lo spessore istantaneo del truciolo, dipendente dalla posizione angolare della fresa e dall'avanzamento al dente f_z , mentre a_p è la profondità di passata.

La forza normale si può stimare a partire dalla relazione

$$F_n \propto F_t, \quad F_n \approx 0.7 F_t \quad (3.5)$$

Tabella 3.4 Parametri di taglio e proprietà meccaniche del materiale lavorato: intervalli di riferimento

Descrizione	Parametro	Intervallo di riferimento
Pressione di taglio [MPa]	k_s	500-1200 (alluminio)
Avanzamento [mm/(dente•giro)]	f_z	0.08-0.25
Profondità di passata [mm]	a_p	0.1-5
Velocità di taglio [m/min]	v_c	300-2000

La pressione di taglio k_s è una costante di proporzionalità che dipende principalmente dal materiale del pezzo, dalla geometria dell'utensile ed anche, in minor misura, dai parametri di taglio, anche se in prima approssimazione si può assumere costante.

In via cautelativa, si possono considerare gli estremi superiori dei parametri di taglio per il calcolo delle forze di taglio. Le condizioni peggiori si possono inoltre immaginare applicate sul bordo di attacco della pala, dove in effetti la profondità di passata è massima, mentre le forze tenderanno a diminuire proseguendo la lavorazione dove lo spessore della pala è minore.

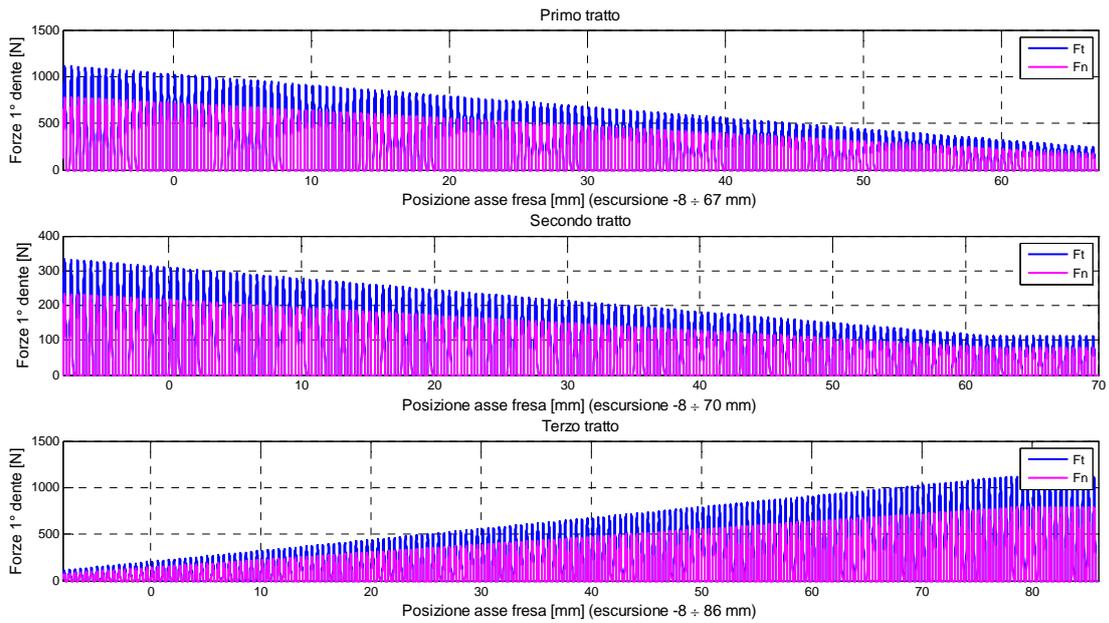


Figura 3.23. Distribuzione delle forze di taglio normali e tangenziali sui tre lati di taglio del profilo.

Per poter determinare le forze da applicare al modello ed eseguire l'analisi FEM occorre determinare la distribuzione delle forze proiettate nel riferimento (X,Y,Z) non rotante solidale con il pezzo, vedi Figura 3.24. Sarà quindi possibile anche identificare il punto di applicazione della forza massima, che risulta più critico per il mantenimento della posizione del pezzo nell'attrezzatura.

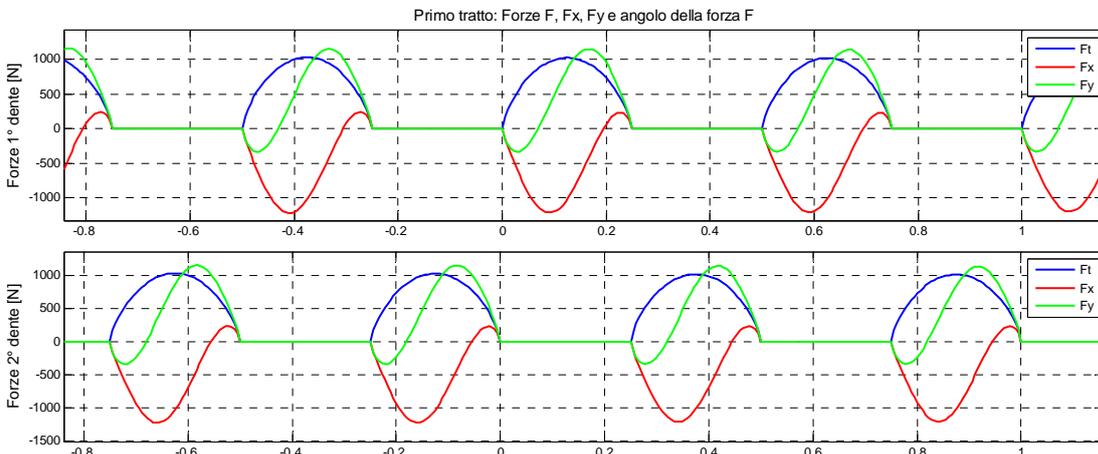


Figura 3.24. Andamento delle componenti F_t , F_x , F_y in funzione della posizione di taglio

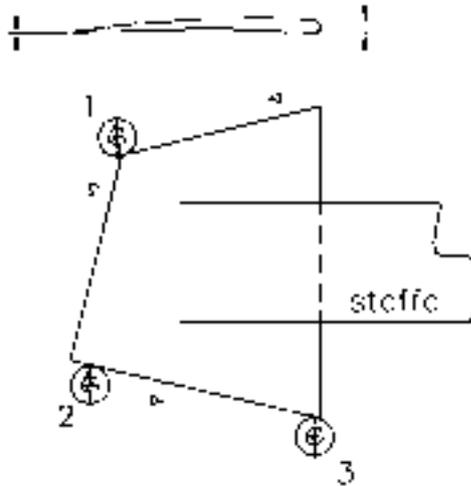


Figura 3.25. Rappresentazione dei tre punti in cui si esegue il confronto delle forze.

Tabella 3.5. Forze di taglio massime nei tre punti ispezionati

Punto	F_x [N]	F_y [N]
1	-142	270
2	252	-184
3	-857	875

La situazione più critica che presenta le forze più elevate risulta pertanto essere nel punto di sperimentazione 3 (ed analogamente nel punto opposto, ove lo spessore della pala è pure massimo).

Lo spettro in frequenza del segnale mette in evidenza armoniche in corrispondenza ai multipli interi della frequenza di rotazione della fresa

$$f_{T,k} = k \frac{n}{60} [\text{Hz}], \quad k \in \mathbb{N} \quad (3.6)$$

ovvero in corrispondenza ai multipli della frequenza di passaggio del dente

$$f_{\tau,h} = h \frac{z_t n}{60} [\text{Hz}], \quad h \in \mathbb{N} \quad (3.7)$$

essendo z_t il numero di denti della fresa, nell'ipotesi siano equispaziati angularmente ed in assenza di errore di run-out. Dall'analisi degli spettri si nota come il contributo armonico sia importante fino a circa 2 kHz nel caso attuale. Pertanto, volendo stimare in modo accurato le forze di taglio dinamiche, la risposta in frequenza del sensore (installato nell'attrezzatura) dovrà essere sufficientemente piatta fino a circa tale valore. In generale comunque, la banda in frequenza richiesta può essere calcolata dalla formula

$$f_B = \frac{m}{60\pi} \frac{v_c z_t}{D} [\text{kHz}], \quad m \in \mathbb{N} \quad (3.8)$$

ove m è il numero di armoniche che vogliamo riuscire a misurare in modo accurato mentre v_c è la velocità di taglio richiesta dall'applicazione.

3.5.6 ANALISI FEM STATICA

I componenti indispensabili e tenuti in considerazione per il calcolo FEM risultano pertanto quelli indicati in seguito.

I componenti che costituiscono l'attrezzatura nel modello semplificato sono:

1. Staffa;
2. grano M12*30 UNI 3245 : 198;
3. modello della pala;
4. dima d'appoggio;
5. corpo;
6. cuneo vertical;
7. vite Tcei M12*70 classe 10.9 UNI 5931;
8. spina cilindrica d12*100 in acciaio temprato UNI EN ISO 873;
9. basamento;
10. tassello .

Il cuneo orizzontale è nascosto all'interno del corpo, così come la seconda vite M12*70, contrapposta a quella in figura. Per brevità vengono qui omessi tutti i dettagli relativi alle fasi di semplificazione delle forme, della scelta delle condizioni di contatto, dei vincoli relativi tra i componenti, dei materiali, etc. Per i calcoli preliminari sono stati utilizzati elementi tetraedrici a 4 nodi, per quelle finali elementi tetraedrici a 10 nodi.

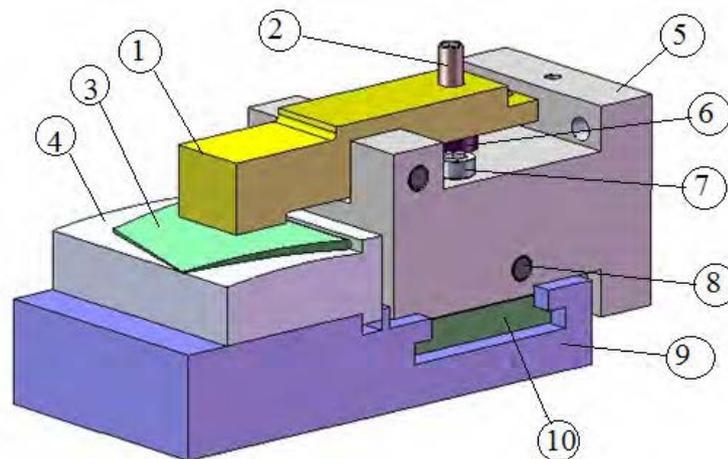


Figura 3.26. Complessivo del modello semplificato per l'analisi FEM

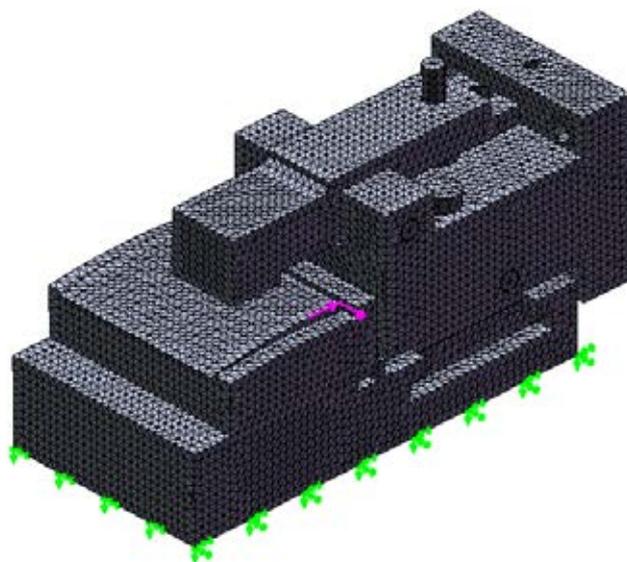


Figura 3.27. Fase di mesh del complessivo in cui si nota il vincolo e le forze applicate. Dimensione media della mesh 4,5mm, circa 215000 elementi.

In Figura 3.28 si nota la distribuzione della tensione secondo Von Mises. Dall'analisi effettuata si nota che i componenti: corpo, cuneo verticale, spine cilindriche, tassello, realizzati in C45 presentano delle tensioni notevolmente inferiori a quella di snervamento, che è pari a 510 [MPa].

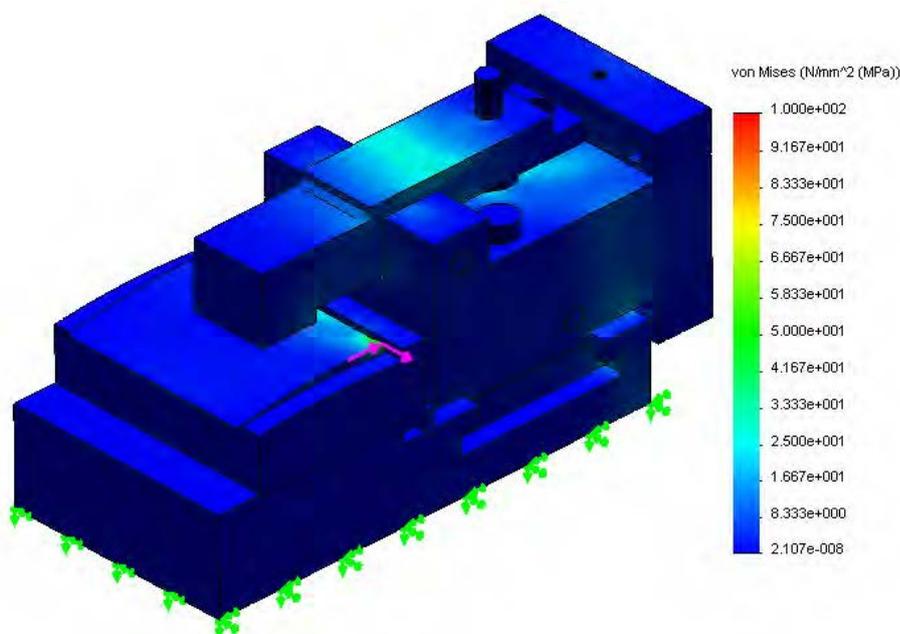


Figura 3.28. Distribuzione tensione equivalente secondo Von Mises.

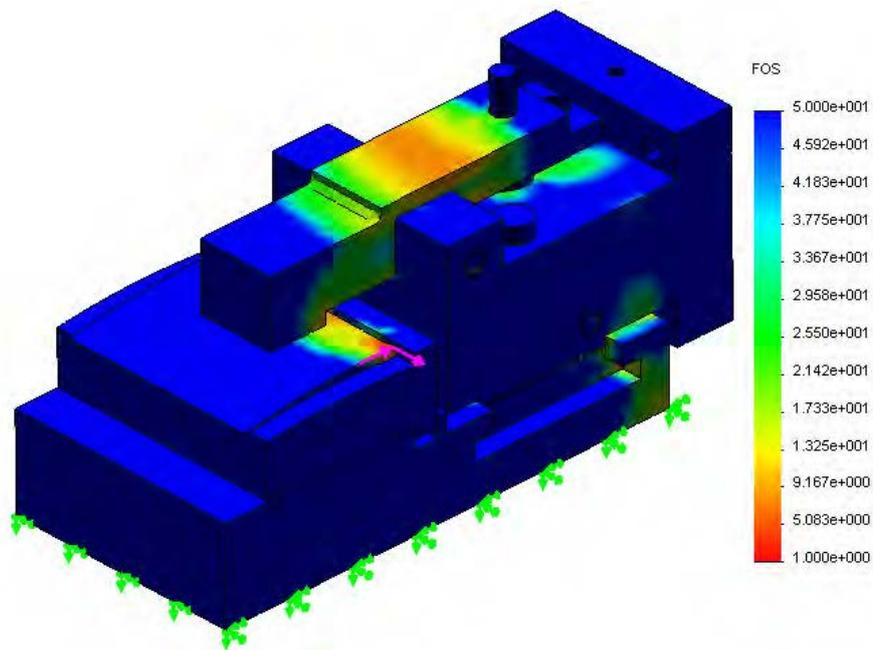


Fig.3.29 Distribuzione coefficiente di sicurezza della struttura.

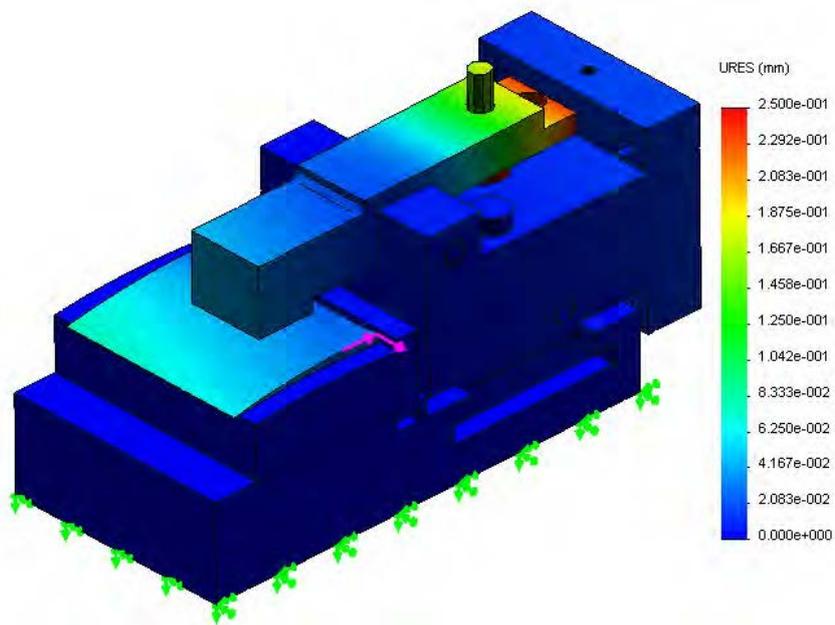


Figura 3.30. Spostamento della struttura.

La staffa come si può notare in Figura 3.30 si deforma sotto la spinta del cuneo verticale e va a comprimere la pala deformandola anch'essa, costringendola ad adattarsi perfettamente alla base d'appoggio della dima. Questo staffaggio comporta uno spostamento della pala in direzione z pari a 0.08 mm necessari al corretto appoggio e perfetto contatto della pala. La

deformazione dovuta alle forze di taglio nel punto di contatto più critico è intorno a 0.02 mm ovvero una distorsione minima, considerando che la forza applicata è sovrastimata.

Per quanto riguarda l'applicazione del sensore di emissione acustica, la staffa o le zone laterali del basamento ove poggia la pala rappresentano delle buone soluzioni.

Per quanto riguarda l'applicazione di sensori di deformazione superficiale, bisogna stare attenti a non farsi ingannare dai diagrammi sopra riportati, che sono il risultato dell'azione combinata delle forze di serraggio e delle forze di taglio. E' infatti necessario collocare il sensore ove l'effetto delle forze di taglio sulla deformazione della struttura non sia trascurabile rispetto all'effetto delle forze di serraggio, altrimenti si rischia di non disporre di un sufficiente rapporto segnale/rumore. Tale condizione va esaminata eseguendo varie simulazioni in cui si vadano a separare i diversi contributi, anche se la verifica definitiva non potrà del tutto prescindere da prove dirette sul campo.

3.5.7 ANALISI FEM DINAMICA

L'analisi dinamica consente di determinare le frequenze di risonanza ed i corrispondenti modi di vibrare della struttura, al fine di:

- valutare l'impatto delle sollecitazioni dinamiche di taglio sulle vibrazioni del sistema attrezzatura-pezzo, con conseguenze sull'accuratezza dimensionale e sulla qualità superficiale;
- identificare posizioni favorevoli per la collocazione di eventuali sensori di vibrazione quali accelerometri;
- stimare la banda in frequenza passante per i sensori di vibrazione, di deformazione superficiale e per eventuali celle di carico.

La Figura 3.31 rappresenta la forma modale fondamentale del sistema vincolato alla sua base alla frequenza, la quale corrisponde a 1975 Hz.

Nome del modello: assieme_complessivo_corretto_prova9
Nome studio: dinamico3
Tipo di grafico: Frequenza Deformata1
Forma della modalità : valore 1 = 1975.5 Hz
Scala di deformazione: 0.0431898

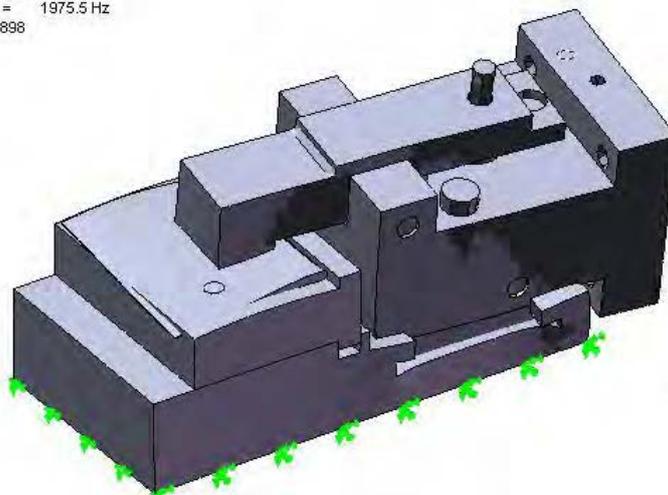


Figura 3.31. Primo modo di vibrare della struttura (forma fondamentale).

Nome del modello: assieme_complessivo_corretto_prova9
Nome studio: dinamico3
Tipo di grafico: Frequenza Deformata3
Forma della modalità : valore 3 = 2982.8 Hz
Scala di deformazione: 0.00154838

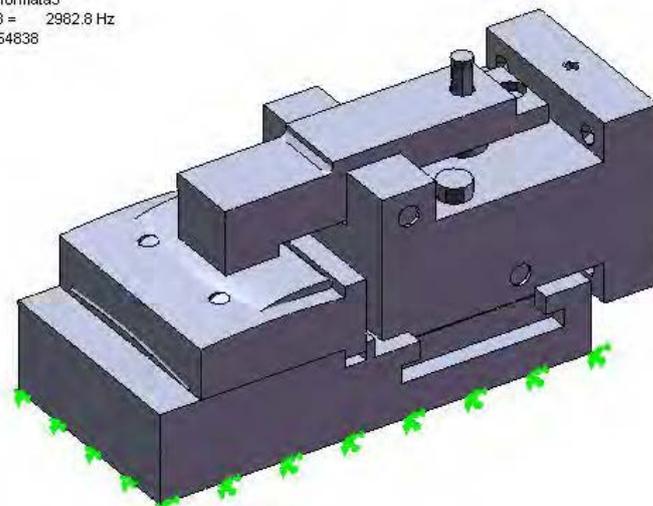


Figura 3.32. Secondo modo di vibrare della struttura.

Nome del modello: assieme_complessivo_corretto_prova9
Nome studio: dinamico3
Tipo di grafico: Frequenza Deformata4
Forma della modalità : valore 4 = 3069.1 Hz
Scala di deformazione: 0.0113517

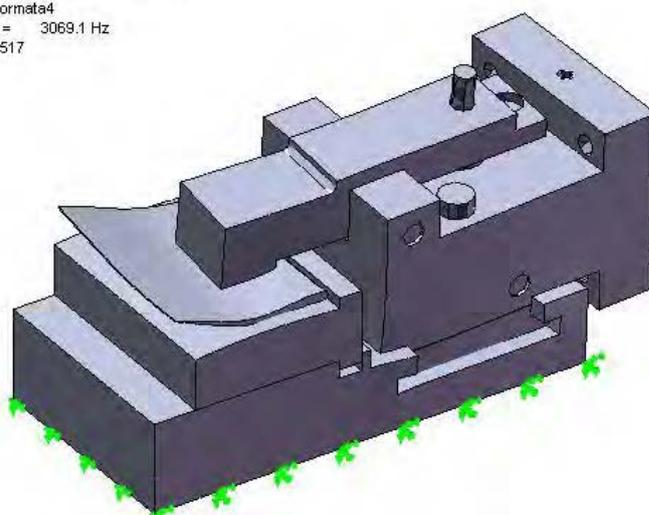


Figura 3.33. Terzo modo di vibrare della struttura.

Nome del modello: assieme_complessivo_corretto_prova9
 Nome studio: dinamico3
 Tipo di grafico: Frequenza Deformata5
 Forma della modalità : valore 5 = 3753.2 Hz
 Scala di deformazione: 0.0222102

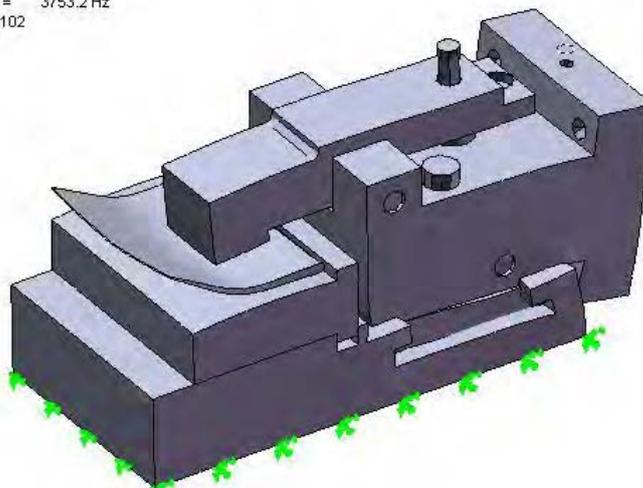


Figura 3.34. Quarto modo di vibrare della struttura.



Figura 3.35. Modi di vibrare del pezzo considerato separatamente.

Tabella 3.6. Modi di vibrazioni del sistema di fissaggio.

Modo di vibrazione	Frequenze di risonanza sistema attrezzatura-pezzo [Hz]	Frequenze di risonanza pezzo considerato separatamente
I modo	1975 Hz	2822
II modo	2490 Hz	3674
III modo	2982 Hz	3971
IV modo	3069 Hz	
V modo	3753 Hz	

Dai modi di vibrazione ottenuti e di conseguenza dalle frequenze a cui si verificano questi modi, si può fare una prima analisi e determinare delle condizioni di taglio che minimizzino le vibrazioni forzate e riducano la probabilità di insorgenza di vibrazioni anomale. Per esempio, è opportuno evitare di applicare un numero di giri tale da eccitare le armoniche del pezzo montato (III, IV e V modo della struttura). Per quanto riguarda la collocazione degli accelerometri,

posizioni favorevoli sembrano essere la parte posteriore della struttura, che è molto sensibili al modo I e V. In alternativa, volendo rilevare meglio le vibrazioni del pezzo, una posizione favorevole potrebbe essere la staffa.

3.5.8 ATTREZZATURE SENSORIZZATE AVANZATE CON CELLE DI CARICO

La misura delle forze/coppie di taglio potrebbe risultare una buona strategia per stimare indirettamente l'usura. Qui possono insorgere varie problematiche:

- usando degli estensimetri per tale scopo, sarebbe necessario indebolire notevolmente la struttura per avere una sufficiente sensibilità nei confronti delle forze di taglio, con conseguente calo delle prestazioni dinamiche e mancato rispetto delle tolleranze di lavorazione.
- bisogna calibrare sperimentalmente il sistema di misura applicando forze di diversa entità ed in diversi punti del pezzo, al fine di stabilire il legame tra input di processo ed output misurato. In alcune configurazioni, la curva di calibrazione potrebbe dipendere dal punto di applicazione della forza, che di solito non è noto.

Migliori prestazioni statiche e dinamiche si ottengono generalmente utilizzando celle di carico piezoelettriche, che vengono integrate nell'attrezzatura in modo che su di esse si scarichi l'intera sollecitazione di taglio. Per il principio di azione-reazione, le celle di carico misurano la forza di taglio risultante, indipendentemente dal suo punto di applicazione. La progettazione di un'attrezzatura avanzata comprendente delle celle di carico è illustrata in Figura 3.36.

In questo caso, bisogna curare in particolare la scelta del tipo di cella (numero di assi misurati, sensibilità, fondo scala, etc.) e la sua collocazione, affinché

- l'attrezzatura non risulti troppo indebolita, e quindi incapace sostenere il pezzo in modo rigido;
- la massa sostenuta dalle celle, comprendente una parte dei sistemi di vincolamento ed il pezzo, non sia molto superiore alla massa del pezzo; questo fatto, unitamente ad una relativamente bassa rigidità, sarebbe responsabile di un pessimo comportamento dinamico del sensore, ovvero di una scarsa banda in frequenza misurabile;
- le celle di carico siano caricate lungo il loro asse e/o siano sottoposte a sforzi di taglio puri, ovvero bisogna evitare che su di esse agiscano momenti flettenti o torcenti significativi, che potrebbero causare disturbi di "cross-talk" (ovvero disturbi incrociati) tra i canali.

E' altresì importante valutare accuratamente l'impatto della nuova configurazione sui sensori individuati nella configurazione base, rimettendo in discussione alcune scelte progettuali all'occorrenza.

3.9 INTERFACCIAMENTO CON IL SISTEMA DI CONTROLLO NUMERICO DELLA MACCHINA UTENSILE

In Figura 3.37 è riportato lo schema concettuale di riferimento per l'applicazione dei sensori e di un sistema esterno di analisi dei dati sensoriali ad una macchina utensile.

Il sistema di analisi dei dati sensoriali elabora i dati provenienti dai sensori, provvede alla visualizzazione delle serie temporali e determina i segnali di retroazione da inviare alla macchina utensile. Sono possibili diverse logiche di elaborazione dei dati sensoriali, le più semplici sono basate sulla determinazione di parametri statistici (ad esempio, media e deviazione standard del segnale) ed applicazione di soglie.

L'interfacciamento del sistema esterno di analisi con il controllo numerico della macchina utensile è l'aspetto critico di questo sistema.

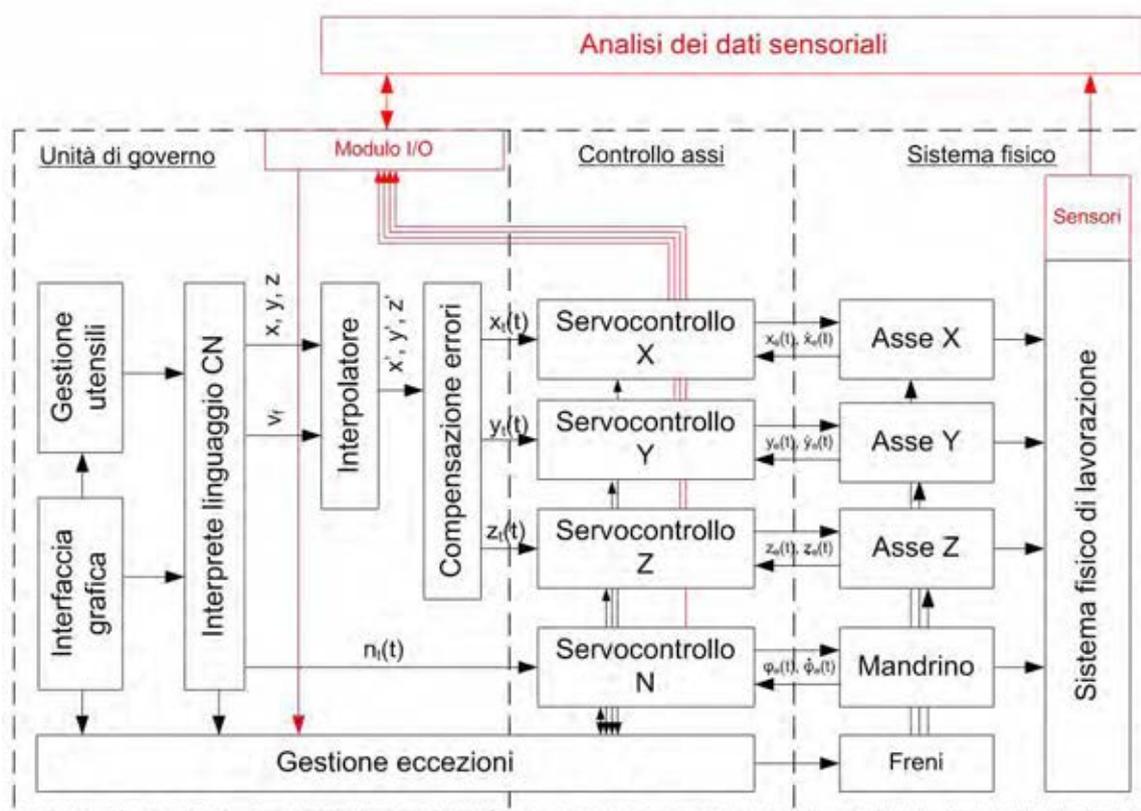


Figura 3.37 Schema logico per l'interfacciamento con la macchina utensile.

A seconda delle funzioni offerte dal controllo numerico vi sono diverse possibilità, come illustrato in Tabella 3.7.

Tabella 3.7. Principali modalità di interfacciamento con la macchina utensile

Tipo di interfacciam.	Input (dal sistema di monitoraggio alla macchina)	Output (dalla macchina verso il sistema di monitoraggio esterno)	Frequenze tipiche [Hz]
Diretto (via SW)	Codici G dedicati attivano la capacità da parte del controllo numerico di acquisire segnali esterni di allarme. La comunicazione può avvenire attraverso rete Ethernet, porte seriali, bus industriali o altro.	Comandi G dedicati attivano l'esportazione da parte del controllo numerico di parametri di lavorazione (nome del file e riga del part program, valori istantanei di posizione, velocità, coppia e/o potenza degli assi, altro).	1-60
Ibrido (via PLC)	N/A	Strumenti di diagnostica/manutenzione prelevano i segnali (posizione, velocità, coppia istantanea) dai PLC che governano assi e mandrini.	60-1000
Indiretto (via HW)	Bypass circuiti <ul style="list-style-type: none"> Allarmi ("fungo" di emergenza) Manopole di regolazione avanzamenti e velocità di rotazione mandrini ("potenziometri") 	Sensori extra (rispetto a quelli già presenti sulla macchina) eseguono misure sugli azionamenti quali ad esempio <ul style="list-style-type: none"> Wattmetri per misure di potenza assorbita dall'asse/mandrino Amperometri per misurare la corrente in ingresso al motore (ovvero la coppia) Righe ottiche o altri trasduttori di posizione e dinamo tachimetriche o altri trasduttori di velocità per misurare lo stato cinematico dell'asse/mandrino 	>1000

Mentre l'opzione di interfacciamento indiretto via Hardware è in linea di principio sempre possibile, si elencano nel seguito alcune soluzioni commerciali messe a disposizione per l'interfacciamento a livello di PLC/PMC o a livello SW.

In Micra, la maggior parte delle macchine utensile CN montano controlli FANUC, HEIDENHAIN, SIEMENS.

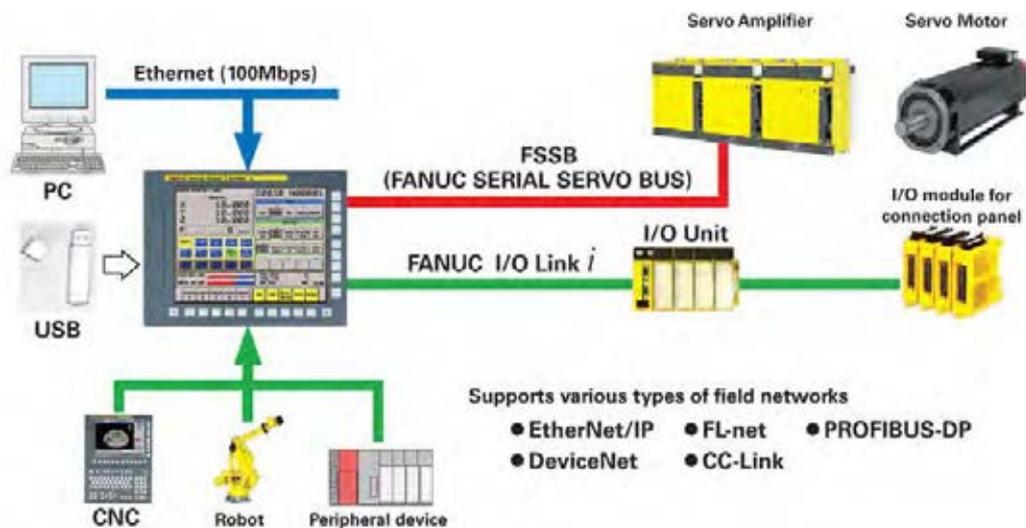


Figura 3.38 Schema di riferimento per comunicazione tramite FANUC I/O Link i.

Per esempio, il controllo FANUC mette a disposizione l'interfaccia con i PLC (o PMC) degli assi/mandrini (modello FANUC I/O Link i, vedi Figura 3.38) che viene utilizzata per scopi di diagnostica, manutenzione e comunicazione. Tale tecnologia permette di comunicare anche con altri dispositivi che siano governati da

controllori FANUC. FANUC mette anche a disposizione funzionalità di dialogo con la macchina utensile tramite ethernet, tuttavia sono principalmente da intendersi per operazioni di upload/download di part programs e per funzionalità di diagnostica di base remotizzate, perlomeno se si considerano le opzioni evidenziate a livello commerciale.

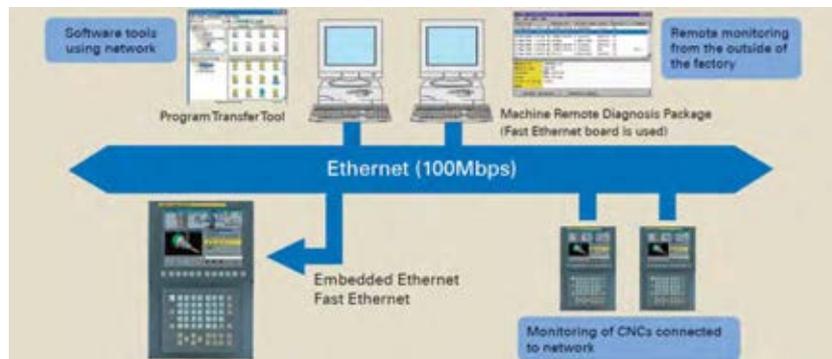


Figura 3.39 Schema di comunicazione tra macchina con controllo FANUC e PC remoti tramite ethernet.

Per quanto concerne i controlli HEIDENHAIN, sono fornite funzioni di base per la comunicazione tramite rete ethernet (gestite tramite il SW TNCremo) che consentono

- il trasferimento di programmi pezzo, tabelle utensili o pallet in entrambe le direzioni
- avviamento della macchina utensile
- esecuzione del backup del disco rigido
- verificare lo stato di funzionamento del macchina.

Riguardo quest'ultima funzione, il materiale divulgativo non è molto preciso. Verosimilmente, sarà necessario richiedere ad HEIDENHAIN delle modifiche personalizzate del software di comunicazione al fine di accedere a dati sensibili in real-time quali i parametri cinematici e gli assorbimenti degli assi e/o dei mandrini, e per inviare alla macchina dei segnali di allarme che possano essere gestiti tramite interfacciamento diretto via SW.

Infine, per quanto riguarda il mondo SIEMENS, esistono diverse possibilità di interfacciamento via SW e con PLC, per esempio tramite la tecnologia SIMATIC ET 200.

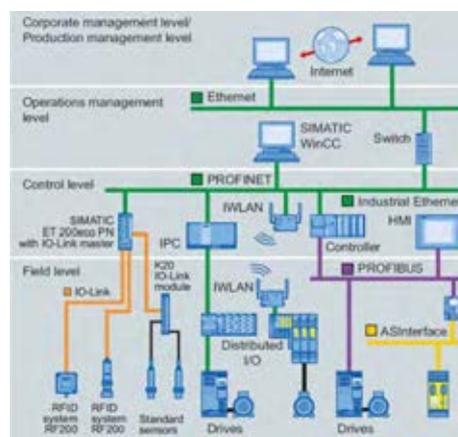


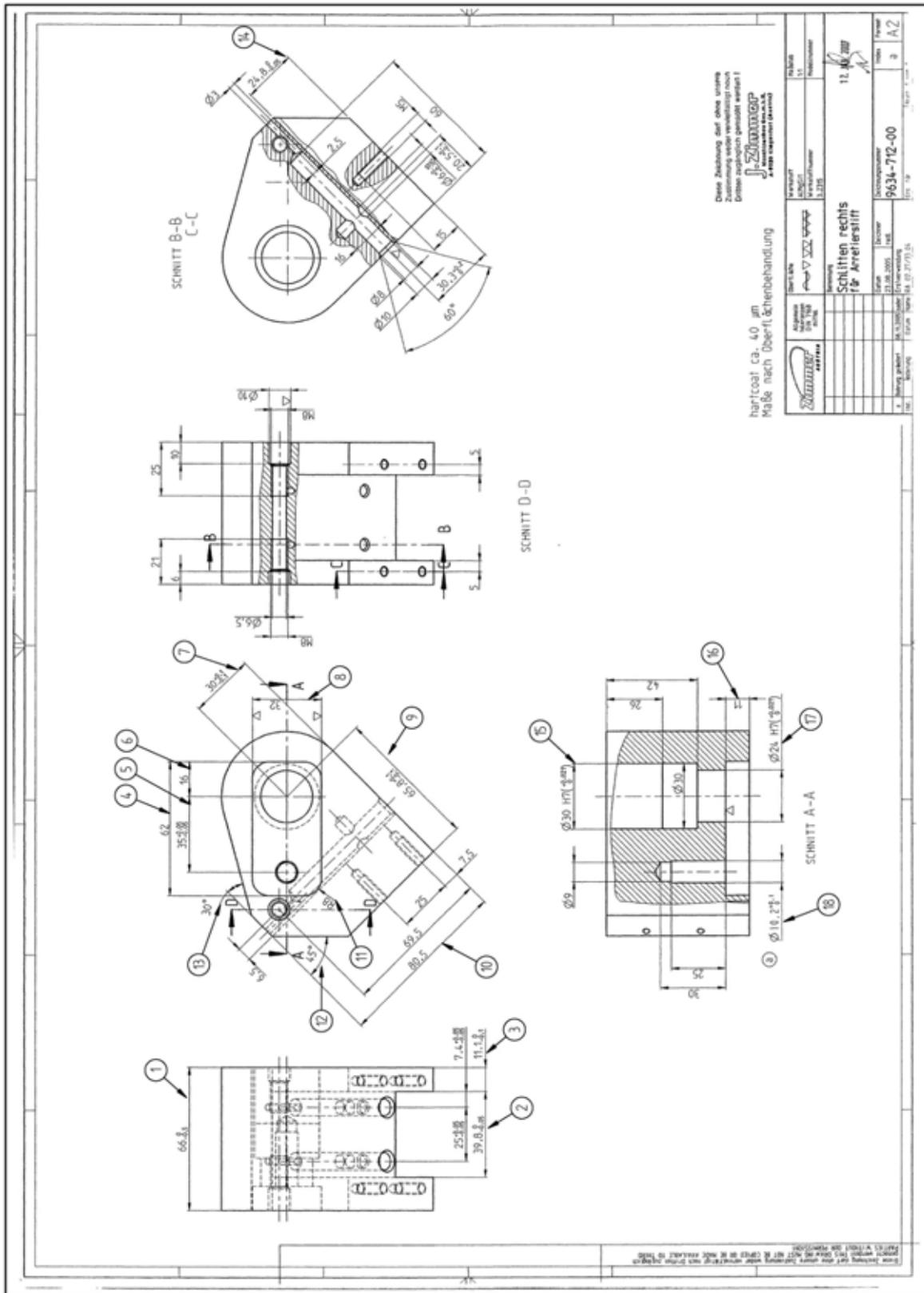
Figura 3.40 Schema di riferimento per le possibilità di comunicazione con dispositivi con controllori SIEMENS.

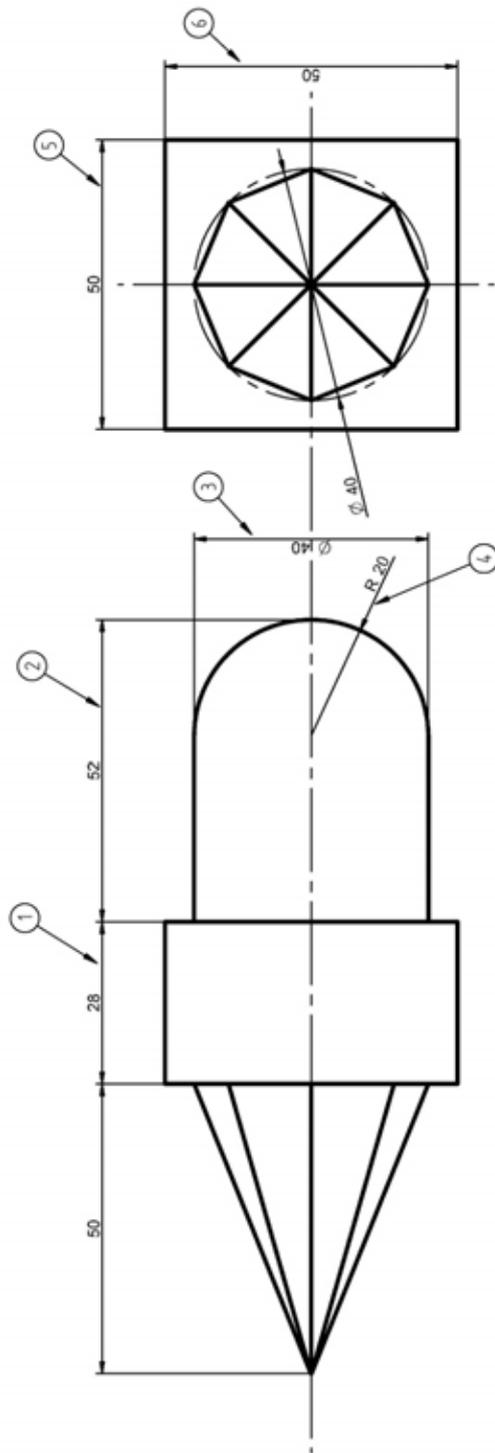
3.10 BIBLIOGRAFIA

- Abele E., Korff D., (2011), *Avoidance of collision-caused spindle damages—Challenges, methods and solutions for high dynamic machine tools*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 (2011) 425–428.
- Abouelatta O, Madl J (2001) *Surface Roughness Prediction Based on Cutting Parameters and Tool Vibration in Turning*. Journal of Materials Processing Technology 118:269–277.
- Aliustaoglu C, Metin Ertunc H, Ocak H (2009) *Tool wear condition monitoring using a sensor fusion model based on fuzzy inference system*. Mechanical Systems and Signal Processing 23 539–546
- Altintas Y, (1992), *Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurement*. J Eng Ind 114:386–392.
- Axinte D, Gindy N (2003) *Tool Condition Monitoring in Broaching*. Wear. 254(3-4):370–382.
- Azouzi R, Guillot M (1997) *On-line Prediction of Surface Finish and Dimensional Deviation in Turning Using Neural Network Based Sensor Fusion*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 37(9):1201–1217.
- Bernhard B., (2002) *Messen mit Kristallen. Grundlagen und Anwendungen der piezoelektrischen Messtechnik*, Moderne Industrie, Landsberg/Lech, ISBN:3-478-93269-6.
- Boyle I., Rong Y., Brown D.C., *A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27 (2011), 1–12
- Byrne G, Dornfeld D, Inasaki I, König W, Teti R (1995) *Tool Condition Monitoring – The Status of Research and Industrial Application*. CIRP Annals 44(2), 541–567
- Byrne G, O'Donnell G (2007) *An Integrated Force Sensor Solution for Process Monitoring of Drilling Operations*. CIRP Annals 56 (01):89–92.
- Girardin F, Remond D, Rigal J (2010) *Tool wear detection in milling-An original approach with a non-dedicated sensor*. Mechanical Systems and Signal Processing 24 1907–1920
- Guo Y, Ammula S (2005) *Real-time AE Monitoring for Surface Damage in Hard Machining*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 45:1622– 1627.
- Haber RE, Jiménez JE, Peres CR, Alique JR (2004) *An investigation of tool-wear monitoring in a high-speed machining process*. Sensors and Actuators A 116 539–545
- Huang SN, Tan KK, Wong YS, De Silva CW, Goh HL, Tan WW (2007) *Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 444–451
- Hunter R., Riosb J., Perez J.M., Vizan A., *A functional approach for the formalization of the fixture design process*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 683–697
- Inasaki I (1998) *Application of Acoustic Emission Sensor for Monitoring Machining Processes*. Ultrasonics 36:273–281.
- Ismail F, Ziaei R (2002) *Chatter suppression in five-axis machining of flexible parts*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 115–122
- Orhan S, Osman Er A, Camuscu N, Aslan E (2007) *Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness*. NDT&E International 40 121–126

- Pritschow G, Bretschneider J, Fritz S, (1999) *Reconstruction of Process Forces within Digital Servodrive Systems*, Production Engineering. Annals of the German Academic Society for Production Engineers 6(1):73–78.
- Jemielniak K, (2001) *Some Aspects of Acoustic Emission Signal Pre-processing*. Journal of Material Processing Technology 109:242–247.
- Jun C, Suh S (1999) *Statistical tool breakage detection schemes based on vibration signals in NC milling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 1733–1746
- Jun M, Ozdoganlar B, DeVor R, Kapoor S, Kirchheim K, Schaffner G (2002) *Evaluation of a Spindle-based Force Sensor for Monitoring and Fault Diagnosis of Machining Operations*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 42:741–751.
- Kalvoda T, Hwang Y. (2010) *A cutter tool monitoring in machining process using Hilbert–Huang transform*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 50 495–501
- Kaya N., *Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms*, Computers in Industry, 57 (2006) 112–120
- Ketteler G, (1999) *Influences on Monitoring Systems which Affect their Reliability*. 2nd Int. Workshop on Intell. Manuf. Syst, Leuven, 769–777.
- Kim H, Ahn J, Kim S, Takata S (2002) *Real Time Drill Wear Estimation Based on Spindle Motor Power*. Journal of Materials Processing Technology 124(3):267– 273.
- Kim J-D, Kim D-S (1997) *Development of a Combined Type Tool Dynamometer with a Piezofilm Accelerometer for an Ultra-Precision Lathe*. Journal of Materials Processing Technology 71:360–366.
- Kistler website: http://www.kistler.com/it_it-it/13_Productfinder/App/Product-Finder.html
- Korkut I, (2003) *A Dynamometer Design and Its Construction for Milling Operation*. Materials and Design 24:631–637.
- Kuljanic E, Sortino M, Totis G (2006) *Application of Wavelet Transform of AE Signal for Tool Condition Monitoring in Face Milling*. 39th CIRP Int. Sem. On Manuf. Systems, Ljubljana, 39–44.
- Kuljanic E, Sortino M, Totis G (2008) *Multisensor Approaches for Chatter Detection in Milling*. Journal of Sound and Vibration 312(4-5):672–693.
- Kuljanic E, Sortino M, Totis G (2009) *Development of an intelligent multisensor chatter detection system in milling*. Mechanical Systems and Signal Processing 23 1704–1718
- Lee JM, Choi DK, Kim J, Chu CN (1995) *Real-time Tool Breakage Detection for NC Milling Process*. CIRP Annals 44(1):59–62.
- Li X, Dong S, Yuan Z (1999) *Discrete Wavelet Transform for Tool Breakage Monitoring*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 39:1935– 1944.
- Mannan MA, Broms S, (1992) *Investigating the Temperature Dependence of Motor Current Measurements Applied to Monitoring and Adaptive Control*. CIRP Annals 41(1):451–454.
- Marinescu I, Axinte D (2008) *A Critical Analysis of Effectiveness of AE Signals to Detect Tool and Workpiece Malfunctions in Milling Operations*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 48(10):1148–1160.
- Mohring H.-C, Litwinski K.M, Gummer O (2010) *Process monitoring with sensory machine tool components*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 383–386

- Peng G., Chen G., Wuc C., Xin H., Jiang Y., *Applying RBR and CBR to develop a VR based integrated system for machining fixture design*, Expert Systems with Applications, 38 (2011) 26–38
- Santochi M., Giusti F., (2000), *Tecnologia Meccanica e Studi di Fabbricazione*, seconda edizione, Ed. Ambrosiana
- Scheffer C., Heyns P.S., (2004) *An industrial tool wear monitoring system for interrupted turning*, Mechanical systems and signal processing, 18, 1219-1242
- Song DY, Otani N, Aoki T, Kamakoshi Y, Ohara Y, Tamaki H (2005) *A New Approach to Cutting State Monitoring in End-mill Machining*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 45:909–921.
- Sortino M., Totis G., Prosperi F., *Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 61 (2012), 58–70
- Stein JL, Wang C-H (1990), *Analysis of Power Monitoring on AC induction drive systems*. Journal of Dynamic System Measurement & Control 112:239–248.
- Suh CS., Khurjekar PP, Yang B (2002) *Characterisation and identification of dynamic instability in milling operation*. Mechanical Systems and Signal Processing 16(5), 853–872
- Teti R, Jemielniak K, O'Donnell G, Dornfeld D (2010) *Advanced monitoring of machining operations*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 717–739
- Woulfe M, (2000) *On the Relationship Between Acoustic Emission and Surface Integrity in Machining*. PhD Thesis, University of College Dublin, Eire.
- Zhou ZD, Chen YP, Fuh JYH, Nee AYC (2000) *Integrated Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Modern Manufacturing Systems*. CIRP Annals 49(1):387–390.





GREZZO		MATERIALE		TRATTAMENTI		RIFERENZE DIS. 3.2 (10)	
DESIGNATO	CONTROLLATO	APPROVATO	MODIFICATO	Sim. e R. non esat.	0.44/0.2	Quota senza tit.	
DATA				FORMATO	A4	SCALA	1:1
N. COGNOME				ORIG.			
FIRMA							
TITOLO Pezzo Benchmark SEM							
COD. CLIENTE				NUM. COMMESSA		NUM. DISEGNO	
						NOME FILE SEM	

APPENDICE B



Order /

Drawing No.
9634-712-00

Part Name
SCHLITTEN RECHTS FUR ARRETIERS

Date
November 15, 2012

Workpiece Ser. No.
001

Operator
DRIUTTI A.

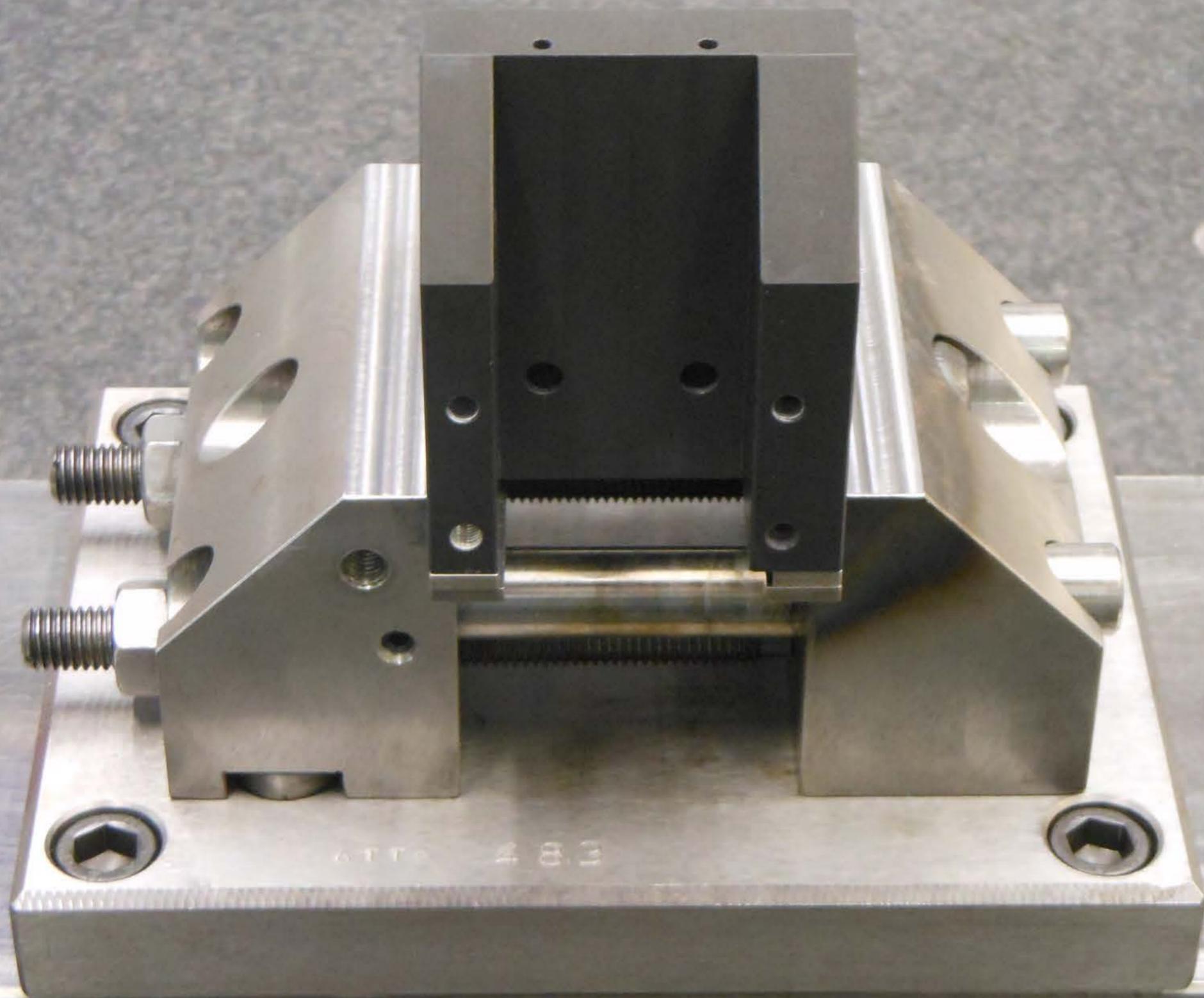
CMM
ACCURA_MASS

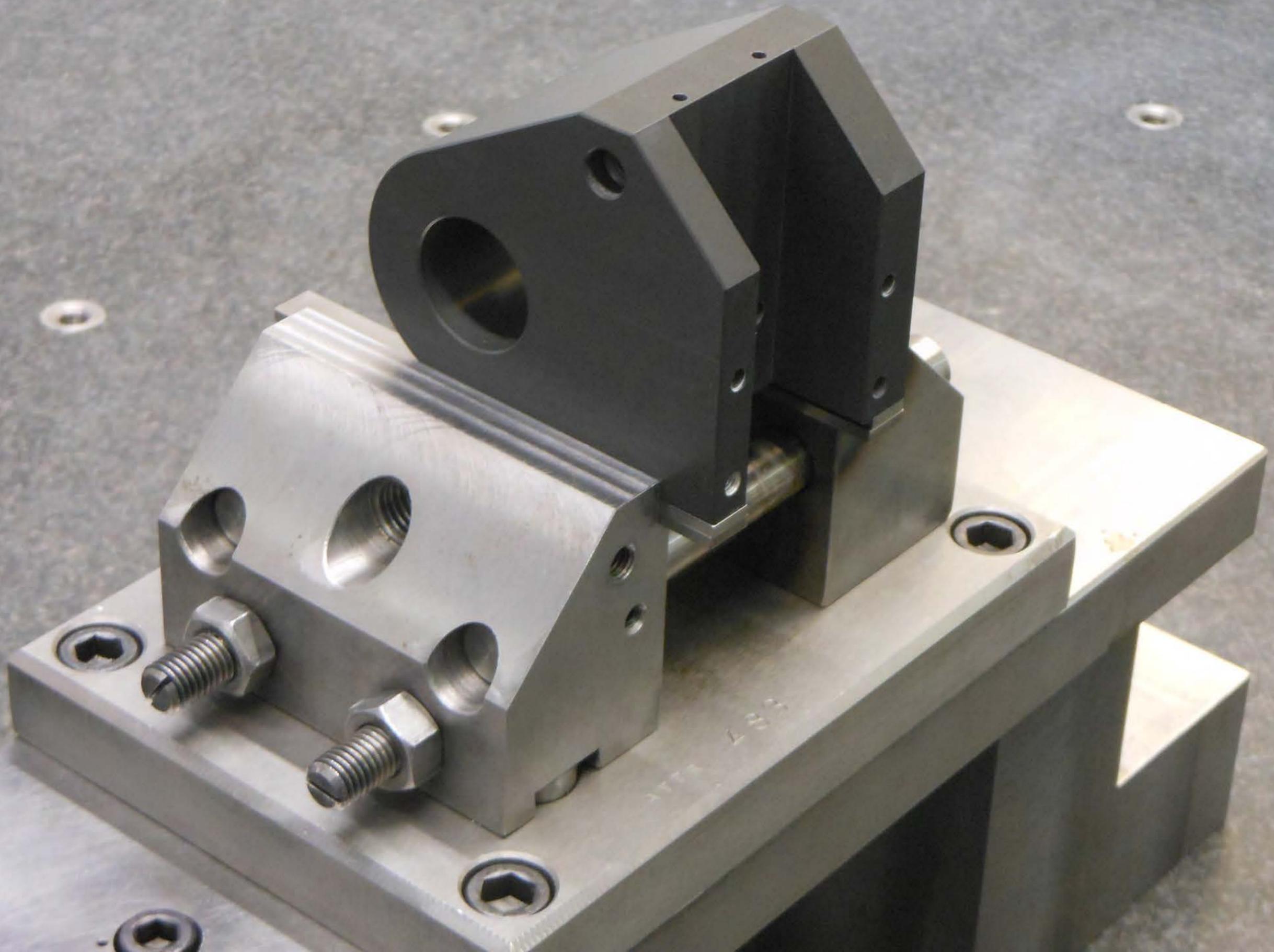
CMM Revision
07/11/2012

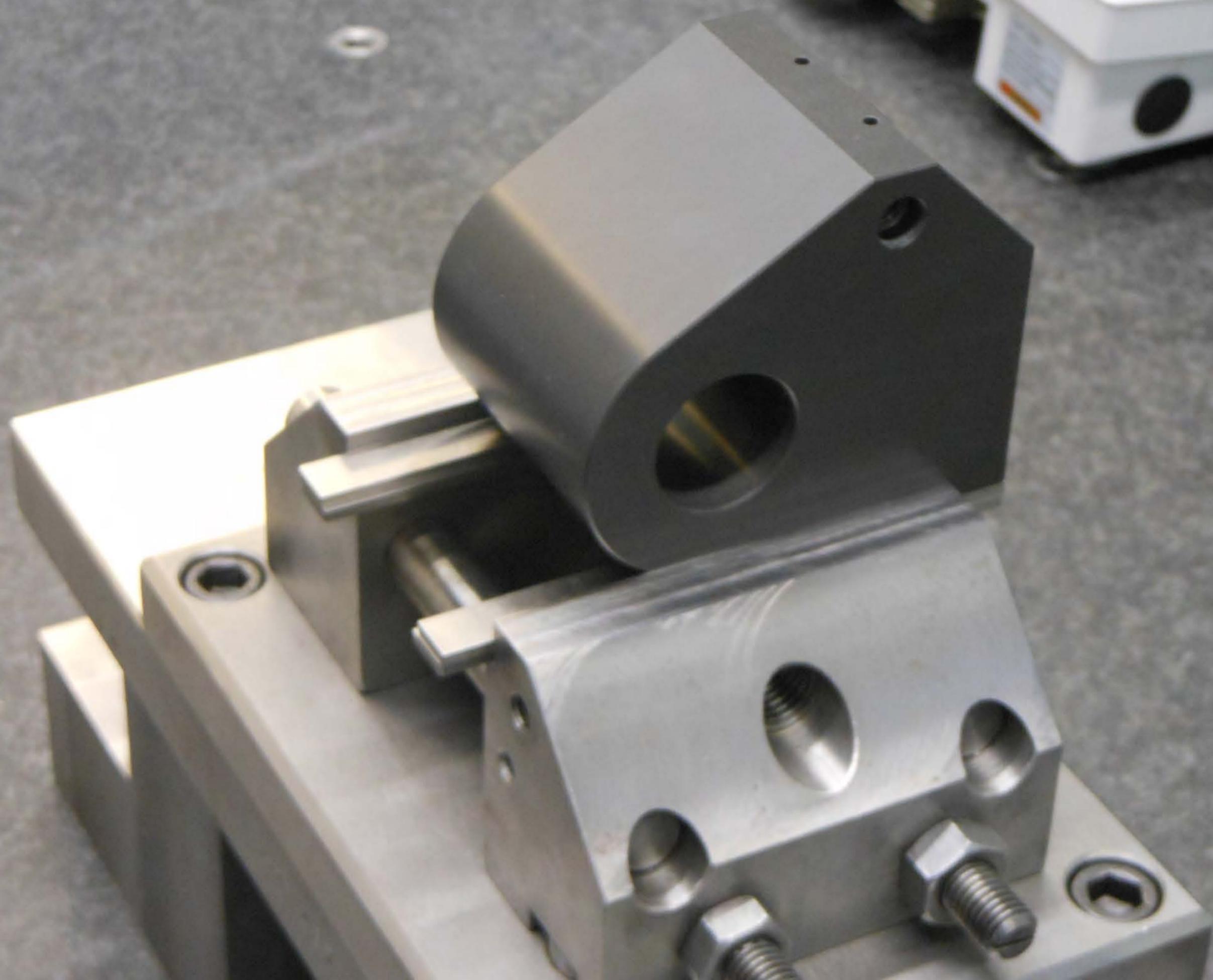
Software
Calypso

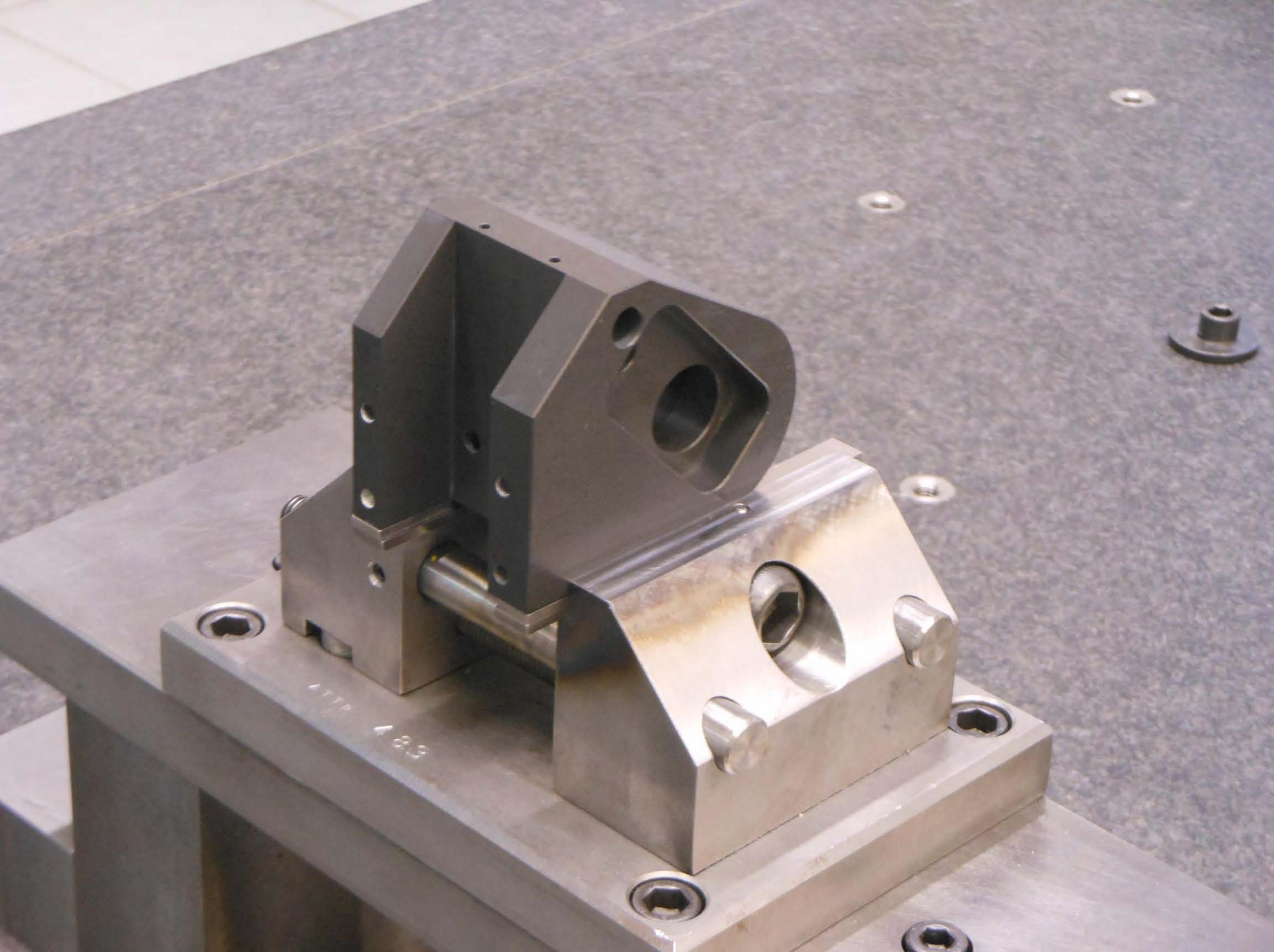
Software Revision
4.10.06.02

	Actual	Nominal	Upper Tol	Lower Tol	Diff	<-- -->
1. Quota 66 0-0.5	65.7557	66.0000	0.0000	-0.5000	-0.2443	-
2. Quota 39.8 0-0.05	39.7999	39.8000	0.0000	-0.0500	-0.0001	----
3_1. Quota 11.1 0-0.1	11.0310	11.1000	0.0000	-0.1000	-0.0690	--
3_2. Quota 15.1 0-0.1	14.9203	15.1000	0.2000	-0.2000	-0.1797	----
4. Quota 62	62.0327	62.0000	0.3000	-0.3000	0.0327	-
5. Quota D30 H7	30.0290	30.0000	0.0210	0.0000	0.0290	0.0080
6. Quota D24 H7	24.0195	24.0000	0.0210	0.0000	0.0195	----
7. Quota D10.2 +0.1+0	10.2906	10.2000	0.1000	0.0000	0.0906	----
8. Quota 32	32.0371	32.0000	0.3000	-0.3000	0.0371	-
9. Quota 65.8 +-0.1	65.7918	65.8000	0.1000	-0.1000	-0.0082	-
10. Quota 30 +-0.1	29.9972	30.0000	0.1000	-0.1000	-0.0028	-
11. Quota 35 +-0.05	34.9889	35.0000	0.0500	-0.0500	-0.0111	-
12. Quota 80.5	80.4772	80.5000	0.3000	-0.3000	-0.0228	-
Quota 25 +-0.05	24.9973	25.0000	0.0500	-0.0500	-0.0027	-
Quota 7.4 +-0.05	7.3821	7.4000	0.0500	-0.0500	-0.0179	--
Quota 24.8 0-0.05	24.7755	24.8000	0.0000	-0.0500	-0.0245	-
Diametro_Circle_D6 +0.10+0.05_1	6.1153	6.0000	0.1000	0.0500	0.1153	0.0153
Diametro_Circle_D6 +0.10+0.05_2	6.1226	6.0000	0.1000	-0.1000	0.1226	0.0226
Quota 20.5 +-0.1_1	20.5052	20.5000	0.1000	-0.1000	0.0052	-
Quota 20.5 +-0.1_2	20.5051	20.5000	0.1000	-0.1000	0.0051	-











Order

/

Drawing No.
WH6 05 11017

Part Name
PEZZO 2

Workpiece Ser. No.
/

Date
December 7, 2012

Operator
DRIUTTI A.

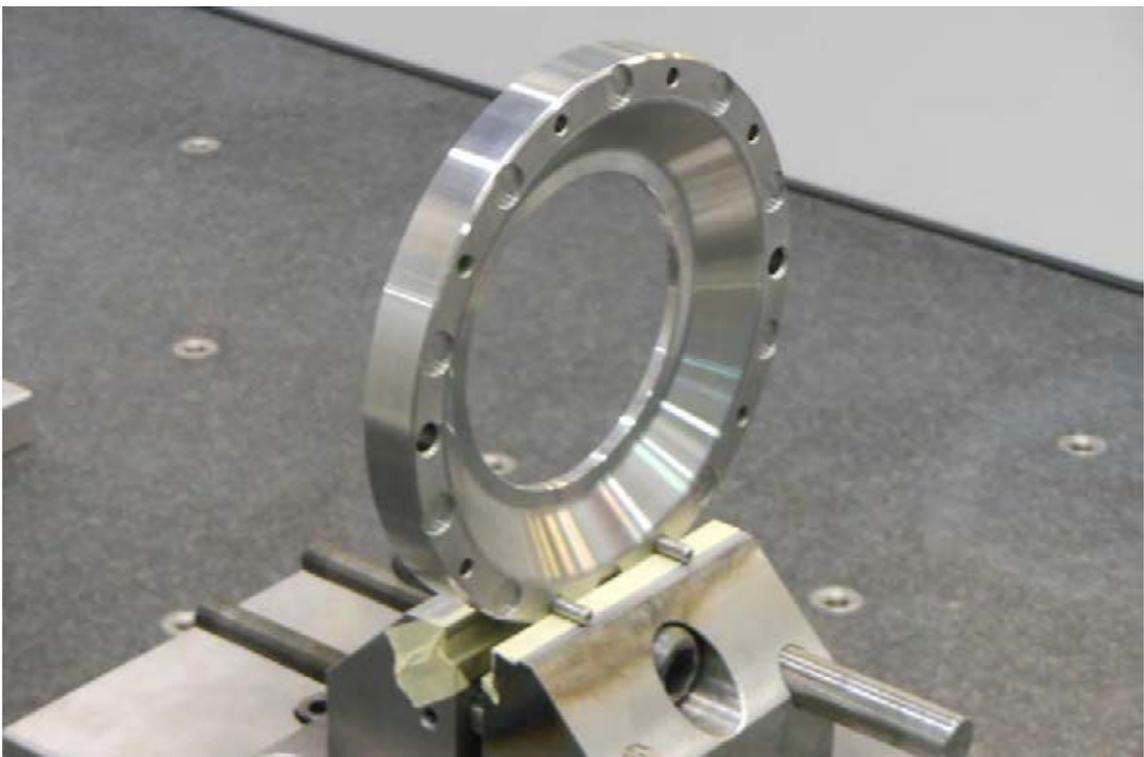
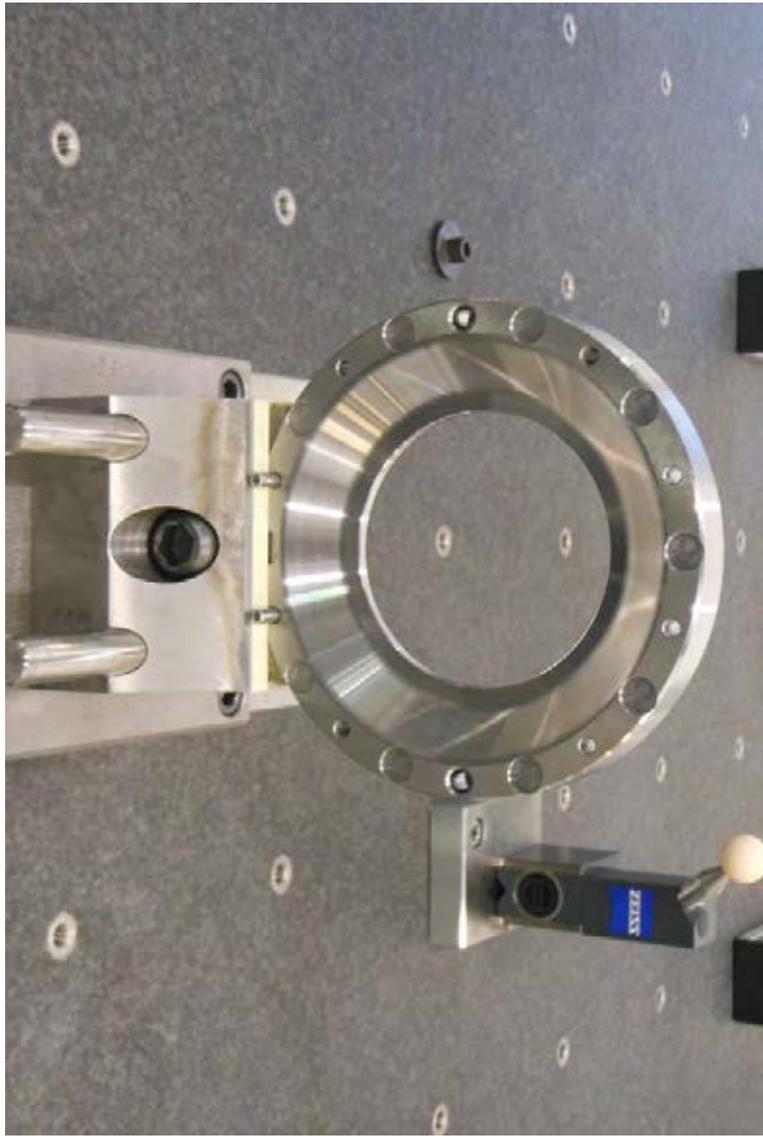
CMM
ACCURA_MASS

Software
Calypso

CMM Revision
07/11/2012

Software Revision
4.10.06.02

Identification	Actual	Nominal	Upper Tol	Lower Tol	Diff	<-- -->
1. Quota 17.7 +-0.1	17.7135	17.7000	0.1000	-0.1000	0.0135	-
2. Quota 4.5 +-0.1	4.4887	4.5000	0.1000	-0.1000	-0.0113	-
3. Quota 164.7 h8	164.6488	164.7000	0.0000	-0.0630	-0.0512	---
4a. Quota 152 +0.1-0_Fori D8.2	151.9802	152.0000	0.1000	0.0000	-0.0198	-0.0198
4b. Quota 152 +0.1-01_Fori D5	152.0233	152.0000	0.1000	0.0000	0.0233	---
5. Quota 102.73 +-0.1	102.9520	102.7300	0.1000	-0.1000	0.2220	0.1220
6. Quota 92 +0.1-0	92.0723	92.0000	0.1500	-0.1500	0.0723	--
7. Quota 8.2	8.2129	8.2000	0.1000	-0.1000	0.0129	-
8. Quota 12	11.9881	12.0000	0.1000	-0.1000	-0.0119	-





Order

/

Drawing No.
WH6 10 11016

Part Name
PEZZO 3

Workpiece Ser. No.

/

Date
December 7, 2012

Operator
DRIUTTI A.

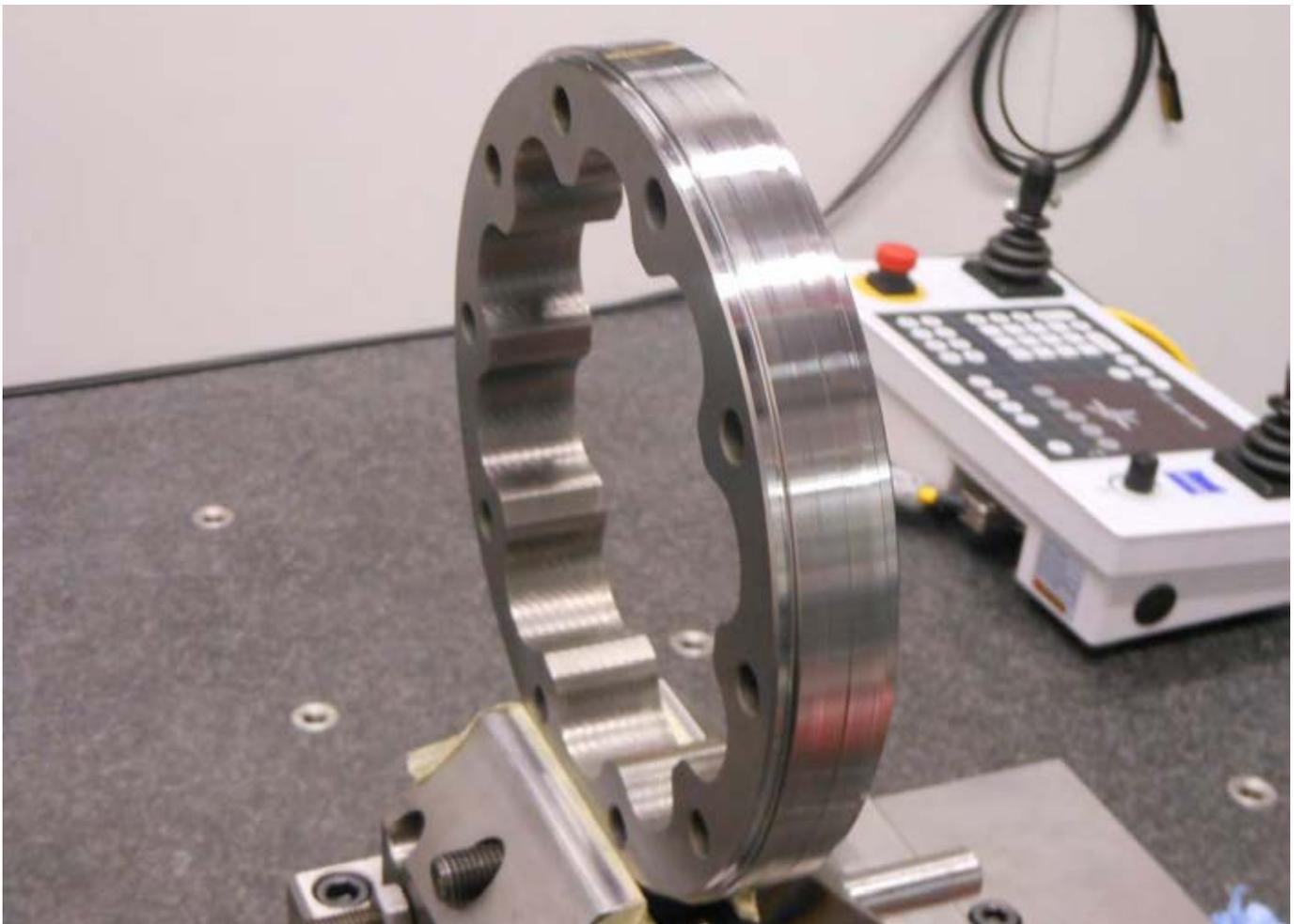
CMM
ACCURA_MASS

Software
Calypso

CMM Revision
07/11/2012

Software Revision
4.10.06.02

Identification	Actual	Nominal	Upper Tol	Lower Tol	Diff	<-- -->
1. Quota 165.671	118.2803	165.6712	0.0500	-0.0500	-47.3909	-47.3409
2. Quota 33	33.1974	33.0000	0.0200	0.0000	0.1974	0.1774
3. Quota 22.8	23.4609	22.8000	0.1000	-0.1000	0.6609	0.5609
4. Quota 16	12.3424	16.0000	0.1000	0.0000	-3.6576	-3.6576
5. Quota 237	237.4743	237.0000	0.2000	-0.2000	0.4743	0.2743
6. Quota 232	232.6041	232.0000	0.0000	-0.0290	0.6041	0.6041
7. Quota 205	204.7763	205.0000	0.2000	-0.2000	-0.2237	-0.0237



Order /

Drawing No. /

Part Name
PEZZO BENCHMARK

Date
December 10, 2012

CMM
ACCURA_MASS

CMM Revision
07/11/2012

Workpiece Ser. No.
PZ 4 COMPENSATO

Operator
DRIUTTI A.

Software
Calypso

Software Revision
4.10.06.02

Identification	Actual	Nominal	Upper Tol	Lower Tol	Diff	<-- -->
----------------	--------	---------	-----------	-----------	------	---------

Sfera

■ s1 Posizione asse	24.0868	24.0000	0.2000	-0.2000	0.0868	--
■ s2 Posizione asse	22.0202	22.0000	0.2000	-0.2000	0.0202	-
■ s3 Raggio teorico	15.0239	15.0000	0.2000	-0.2000	0.0239	-
■ s4 Raggio raccordo	5.0813	5.0000	0.1000	-0.1000	0.0813	---
■ s5 Profilo	0.1541	0.0000			0.1541	

Parte inclinata

■ i1 Posizione lato	5.0534	5.0000	0.1000	-0.1000	0.0534	---
■ i2 Posizione lato	17.2269	17.0000	0.2000	-0.2000	0.2269	0.0269
■ i3 Larghezza	20.0510	20.0000	0.2000	-0.2000	0.0510	--
■ i4 Altezza	10.0078	10.0000	0.2000	-0.2000	0.0078	-
■ i5 Angolo lato inclinato	45.0094	45.0000	0.1000	-0.1000	0.0094	-
■ i6 Larghezza base superiore	1.9019	2.0000	0.1000	-0.1000	-0.0981	----
■ i7 Raggio raccordo	4.0060	5.0000	0.1000	-0.1000	-0.9940	-0.8940
■ i8 Profilo	0.1826	0.0000			0.1826	

Base

■ b1 Altezza	9.9962	10.0000	0.2000	-0.2000	-0.0038	-
■ b2 Profilo	0.1627	0.0000			0.1627	

Tasca

■ t1 Posizione lato	44.1688	44.0000	0.3000	-0.3000	0.1688	---
■ t2 Posizione lato	2.0841	2.0000	0.1000	-0.1000	0.0841	---
■ t3 Larghezza	24.9339	25.0000	0.2000	-0.2000	-0.0661	--
■ t4 Lunghezza	50.0273	50.0000	0.3000	-0.3000	0.0273	-

Fori

■ f1 Posizione centro	7.9791	8.0000	0.2000	-0.2000	-0.0209	-
■ f2 Posizione centro	12.4488	12.5000	0.2000	-0.2000	-0.0512	--
■ f3 Posizione centro	7.9722	8.0000	0.2000	-0.2000	-0.0278	-
■ f4 Diametro	10.0266	10.0000	0.2000	-0.2000	0.0266	-
■ f5 Diametro	10.0238	10.0000	0.2000	-0.2000	0.0238	-
■ f6 Profondità	15.4888	15.0000	0.2000	-0.2000	0.4888	0.2888

Riferimento

Order
Pezzo Benchmark 1

Drawing No.
/

Operator
DRIUTTI A.

Date
December 10, 2012



Identification	Actual	Nominal	Upper Tol	Lower Tol	Diff	
 r1 Posizione	21.2535	23.0000	0.2000	-0.2000	-1.7465	-1.5465
 r2 Posizione	4.0216	4.0000	0.1000	-0.1000	0.0216	-
 r3 Altezza	5.0203	5.0000	0.1000	-0.1000	0.0203	-
 r4 Profilo	0.0327	0.0000			0.0327	



Calypso
4.10.06.02

Carl Zeiss

Date
Order

December 10, 2012
/

Part Number
PZ 4 COMPENSA...

CMM Type
ACCURA_MASS

Drawing No.
/

Department:

Operator

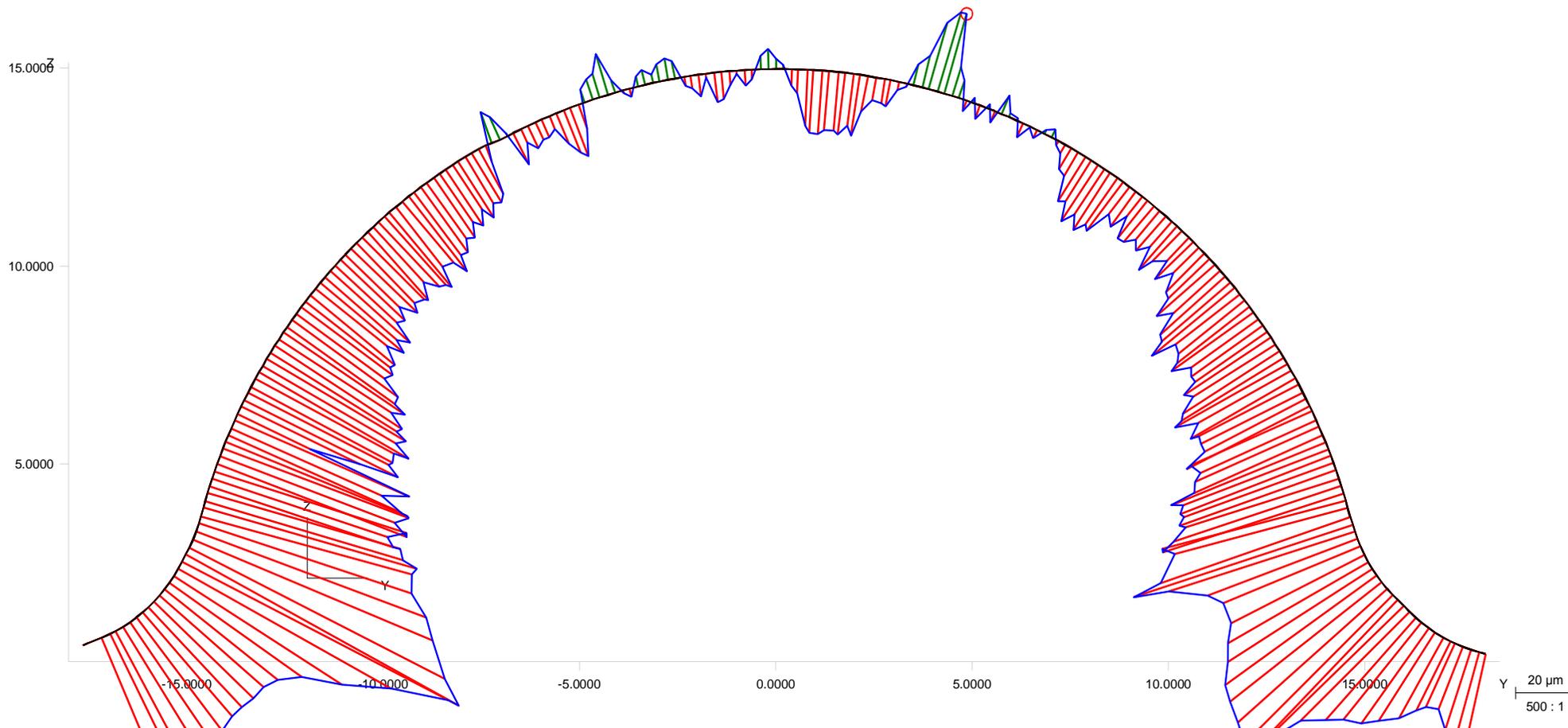
Master

Meas. Plan Name

Pezzo Benchmark 1

Signature:

1: s5 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rotation	X	Y	Z
1	s5 Profilo	0.0400	0.1541	248	-999.0000	999.0000	248	-0.1266	105	0.0274	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000



Calypso
4.10.06.02

Carl Zeiss

Date
Order

December 10, 2012
/

Part Number
PZ 4 COMPENSA...

CMM Type
ACCURA_MASS

Drawing No.
/

Department:

Operator

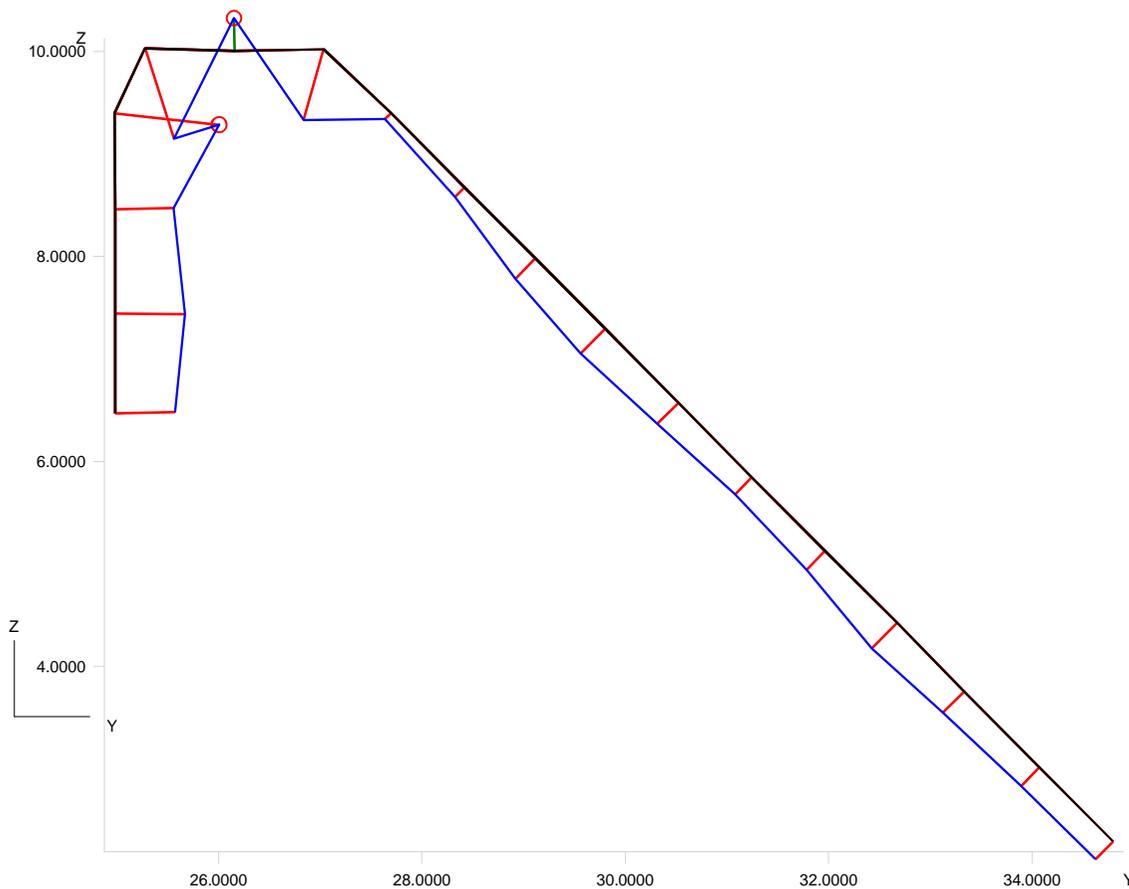
Master

Meas. Plan Name

Pezzo Benchmark 1

Signature:

1: i8 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]		X	Y	Z
1	i8 Profilo	0.0671	0.1826	18	-999.0000	999.0000	15	-0.1395	13	0.0431	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000



Calypso
4.10.06.02

Carl Zeiss

Date
Order

December 10, 2012
/

Part Number
PZ 4 COMPENSA...

CMM Type
ACCURA_MASS

Drawing No.
/

Department:

Operator

Master

Meas. Plan Name

Pezzo Benchmark 1

Signature:

1: b2 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]		X	Y	Z
1	b2 Profilo	0.0930	0.1627	1376	-999.0000	999.0000	587	-0.1627	984	-0.0185	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000



Calypso
4.10.06.02

Carl Zeiss

Date
Order

December 10, 2012
/

Part Number
PZ 4 COMPENSA...

CMM Type
ACCURA_MASS

Drawing No.
/

Department:

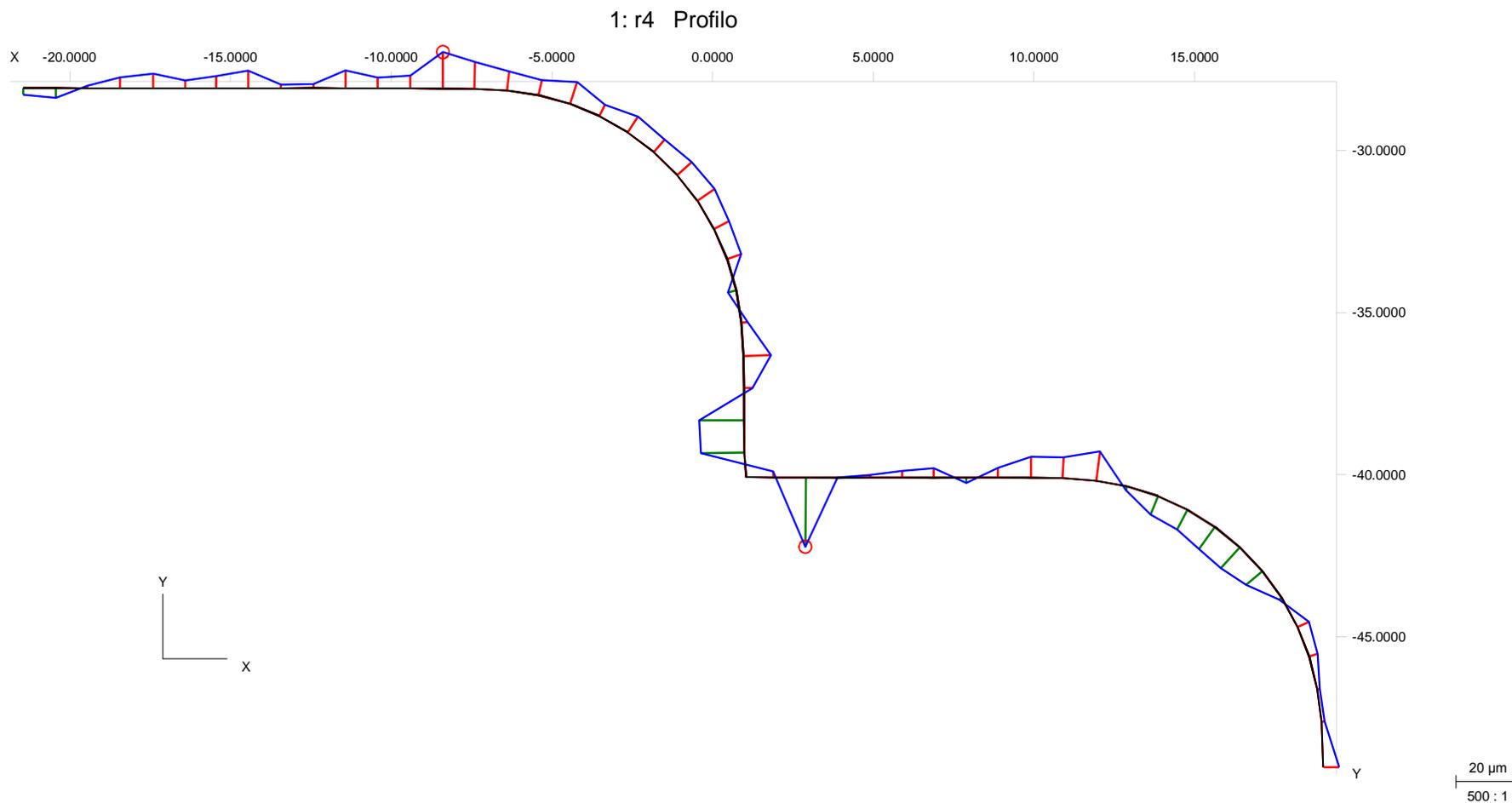
Operator

Master

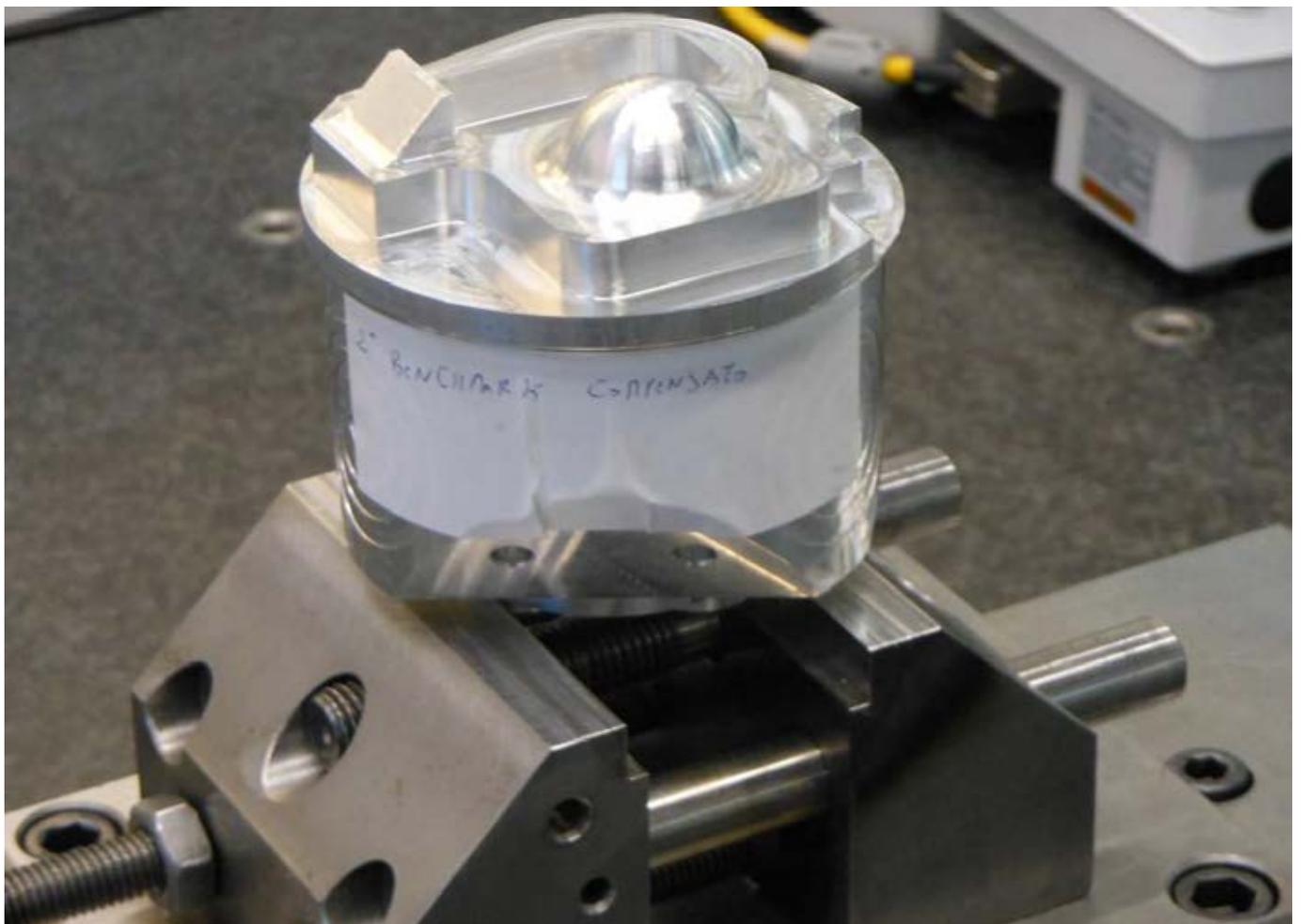
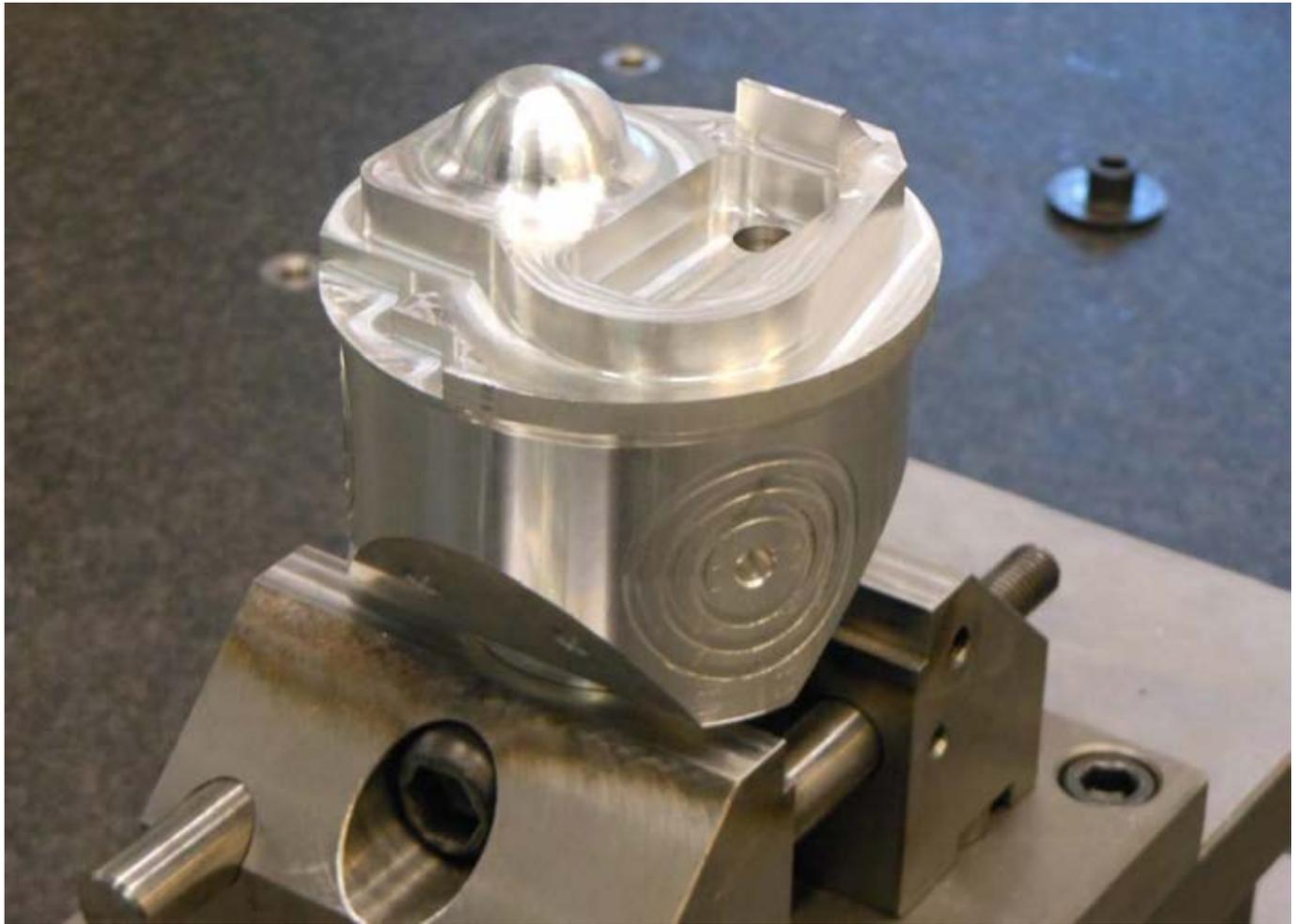
Meas. Plan Name

Pezzo Benchmark 1

Signature:



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rotation	X	Y	Z
1	r4 Profilo	0.0063	0.0327	54	-999.0000	999.0000	41	-0.0113	22	0.0214	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000



Order /

Drawing No. /

Part Name
PEZZO BENCHMARK

Date
December 10, 2012

CMM
ACCURA_MASS

CMM Revision
07/11/2012

Workpiece Ser. No.
PZ 4

Operator
DRIUTTI A.

Software
Calypso

Software Revision
4.10.06.02

Identification	Actual	Nominal	Upper Tol	Lower Tol	Diff	<-- -->
----------------	--------	---------	-----------	-----------	------	---------

Sfera

s1 Posizione asse	24.1842	24.0000	0.2000	-0.2000	0.1842	----
s2 Posizione asse	22.1204	22.0000	0.2000	-0.2000	0.1204	---
s3 Raggio teorico	15.0987	15.0000	0.2000	-0.2000	0.0987	--
s4 Raggio raccordo	4.8443	5.0000	0.1000	-0.1000	-0.1557	-0.0557
s5 Profilo	0.0215	0.0000			0.0215	

Parte inclinata

i1 Posizione lato	5.0462	5.0000	0.1000	-0.1000	0.0462	--
i2 Posizione lato	17.4039	17.0000	0.2000	-0.2000	0.4039	0.2039
i3 Larghezza	20.2249	20.0000	0.2000	-0.2000	0.2249	0.0249
i4 Altezza	10.0003	10.0000	0.2000	-0.2000	0.0003	-
i5 Angolo lato inclinato	45.0360	45.0000	0.1000	-0.1000	0.0360	--
i6 Larghezza base superiore	2.0782	2.0000	0.1000	-0.1000	0.0782	----
i7 Raggio raccordo	7.8155	5.0000	0.1000	-0.1000	2.8155	2.7155
i8 Profilo	0.1036	0.0000			0.1036	

Base

b1 Altezza	10.0012	10.0000	0.2000	-0.2000	0.0012	-
b2 Profilo	0.0354	0.0000			0.0354	

Tasca

t1 Posizione lato	44.3573	44.0000	0.3000	-0.3000	0.3573	0.0573
t2 Posizione lato	2.2844	2.0000	0.1000	-0.1000	0.2844	0.1844
t3 Larghezza	24.7409	25.0000	0.2000	-0.2000	-0.2591	-0.0591
t4 Lunghezza	49.8262	50.0000	0.3000	-0.3000	-0.1738	---

Fori

f1 Posizione centro	7.9043	8.0000	0.2000	-0.2000	-0.0957	--
f2 Posizione centro	12.3573	12.5000	0.2000	-0.2000	-0.1427	---
f3 Posizione centro	7.8679	8.0000	0.2000	-0.2000	-0.1321	---
f4 Diametro	10.0226	10.0000	0.2000	-0.2000	0.0226	-
f5 Diametro	10.0227	10.0000	0.2000	-0.2000	0.0227	-
f6 Profondità	15.4737	15.0000	0.2000	-0.2000	0.4737	0.2737

Riferimento

Order
Pezzo Benchmark 1

Drawing No.
/

Operator
DRIUTTI A.

Date
December 10, 2012



Identification	Actual	Nominal	Upper Tol	Lower Tol	Diff	
r1 Posizione	21.3986	23.0000	0.2000	-0.2000	-1.6014	-1.4014
r2 Posizione	3.9302	4.0000	0.1000	-0.1000	-0.0698	---
r3 Altezza	5.0150	5.0000	0.1000	-0.1000	0.0150	-
r4 Profilo	0.0377	0.0000			0.0377	



Calypso
4.10.06.02

Carl Zeiss

Date
Order

December 10, 2012
/

Part Number
PZ 4

CMM Type
ACCURA_MASS

Drawing No.
/

Department:

Operator

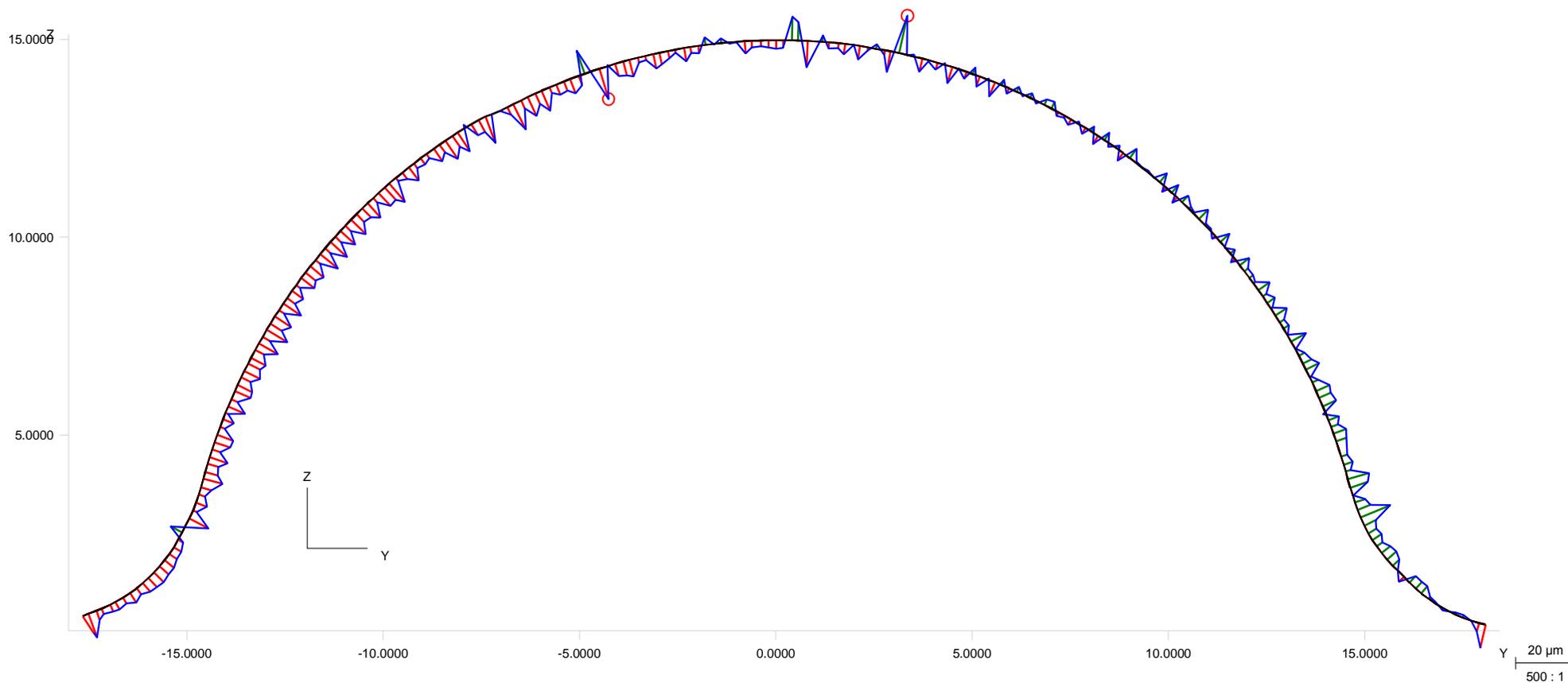
Master

Meas. Plan Name

Pezzo Benchmark 1

Signature:

1: s5 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rotation	X	Y	Z
1	s5 Profilo	0.0040	0.0232	247	-999.0000	999.0000	148	-0.0105	110	0.0127	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000



Calypso
4.10.06.02

Carl Zeiss

Date
Order

December 10, 2012
/

Part Number
PZ 4

CMM Type
ACCURA_MASS

Drawing No.
/

Department:

Operator

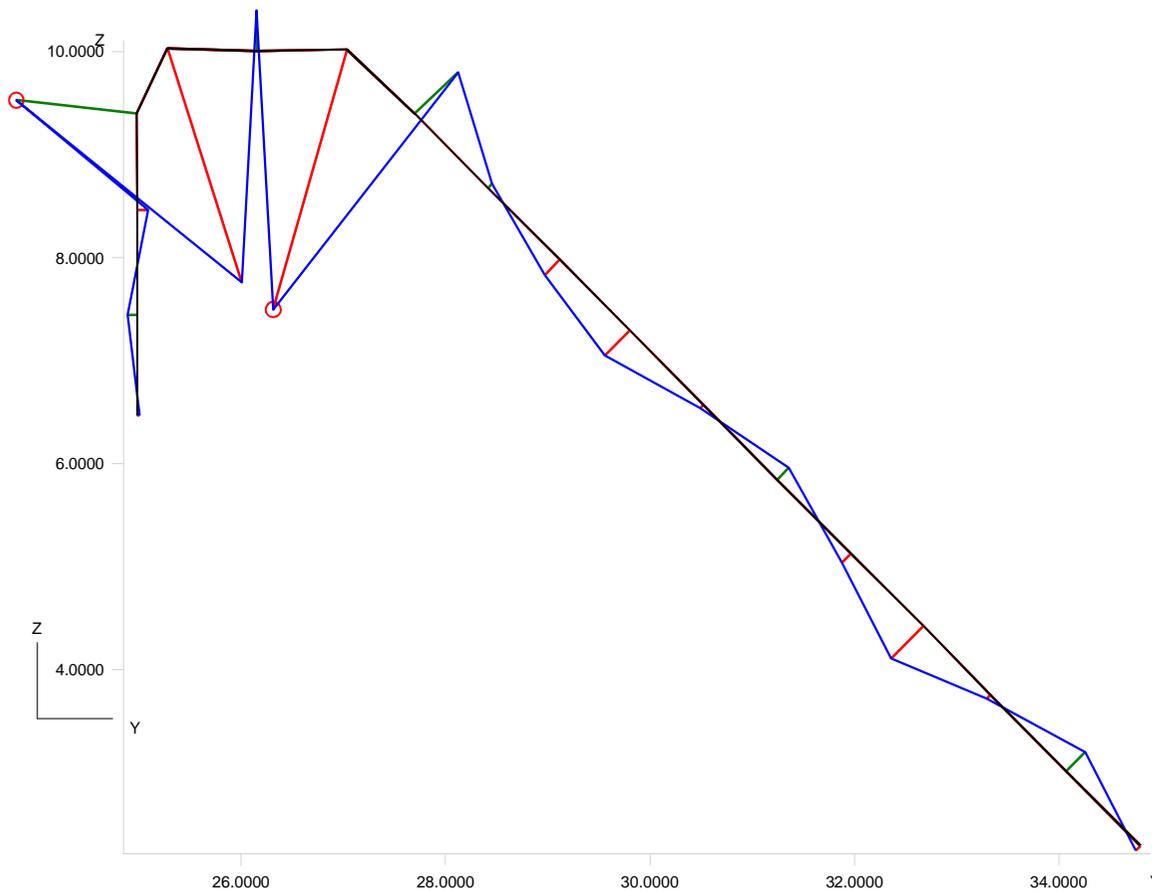
Master

Meas. Plan Name

Pezzo Benchmark 1

Signature:

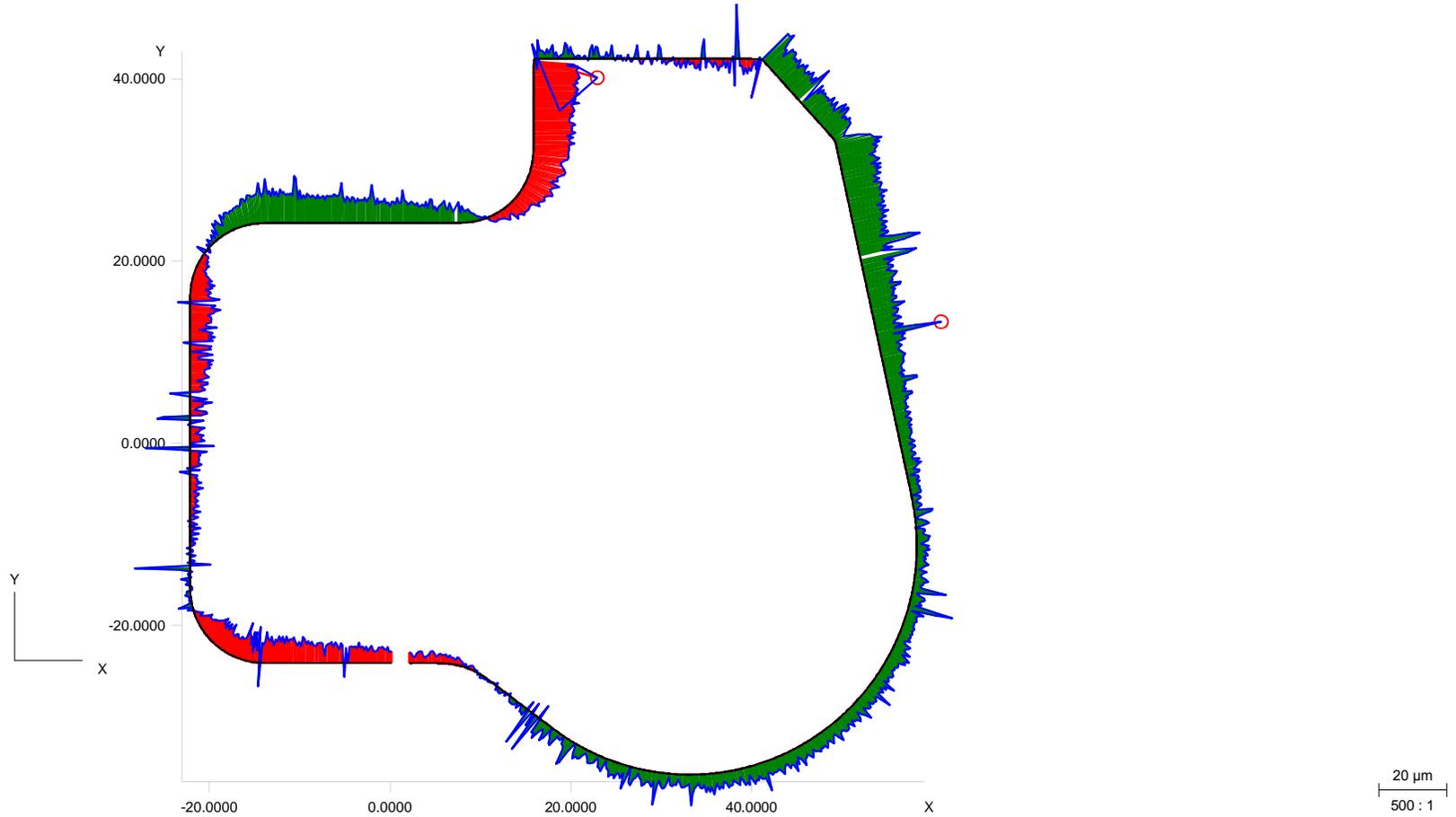
1: i8 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]		X	Y	Z
1	i8 Profilo	0.0247	0.1032	18	-999.0000	999.0000	12	-0.0711	15	0.0321	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000

	Calypso 4.10.06.02	Carl Zeiss	Date Order	December 10, 2012 /
Part Number PZ 4	CMM Type ACCURA_MASS	Drawing No. /	Department:	
Meas. Plan Name	Pezzo Benchmark 1		Operator	Master
			Signature:	

1: b2 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]		X	Y	Z
1	b2 Profilo	0.0059	0.0386	1364	-999.0000	999.0000	580	-0.0194	876	0.0193	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000



Calypso
4.10.06.02

Carl Zeiss

Date
Order

December 10, 2012
/

Part Number
PZ 4

CMM Type
ACCURA_MASS

Drawing No.
/

Department:

Operator

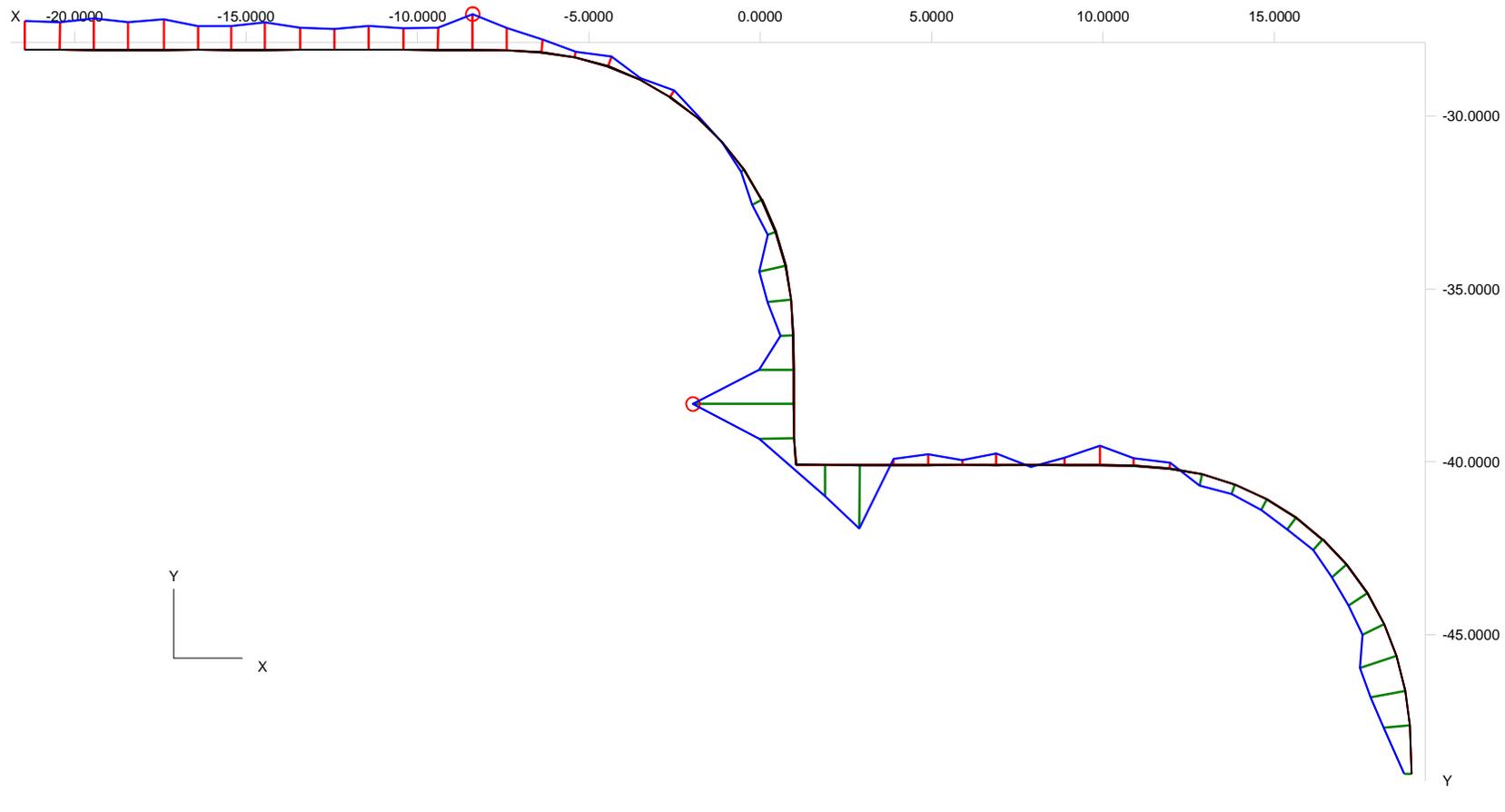
Master

Meas. Plan Name

Pezzo Benchmark 1

Signature:

1: r4 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rotation	X	Y	Z
1	r4 Profilo	0.0076	0.0399	54	-999.0000	999.0000	41	-0.0104	25	0.0295	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000



Calypso
4.10.06.02

Carl Zeiss

Date
Order

December 10, 2012
/

Part Number
PZ 4

CMM Type
ACCURA_MASS

Drawing No.
/

Department:

Operator

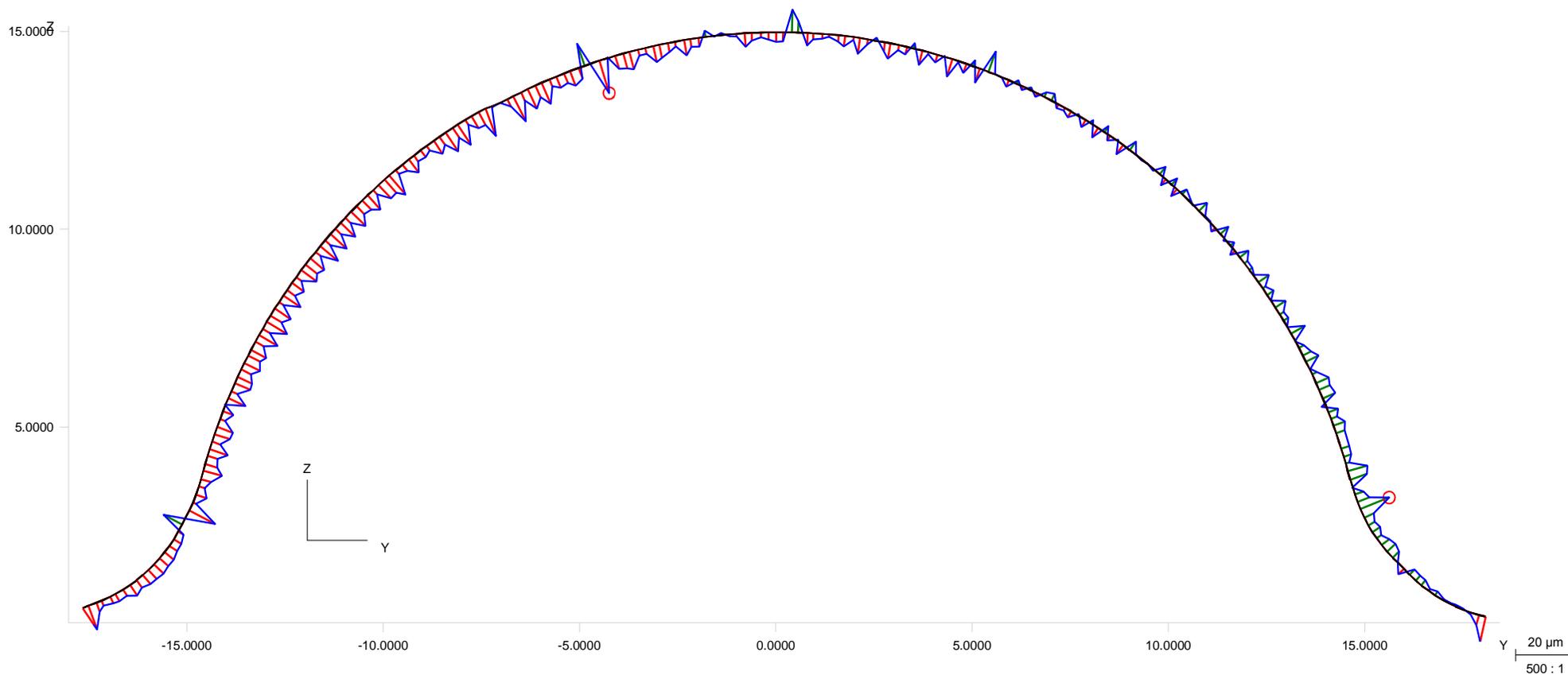
Master

Meas. Plan Name

Pezzo Benchmark 1

Signature:

1: s5 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rotation	X	Y	Z
1	s5 Profilo	0.0040	0.0215	248	-999.0000	999.0000	149	-0.0112	22	0.0103	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000



Calypso
4.10.06.02

Carl Zeiss

Date
Order

December 10, 2012
/

Part Number
PZ 4

CMM Type
ACCURA_MASS

Drawing No.
/

Department:

Operator

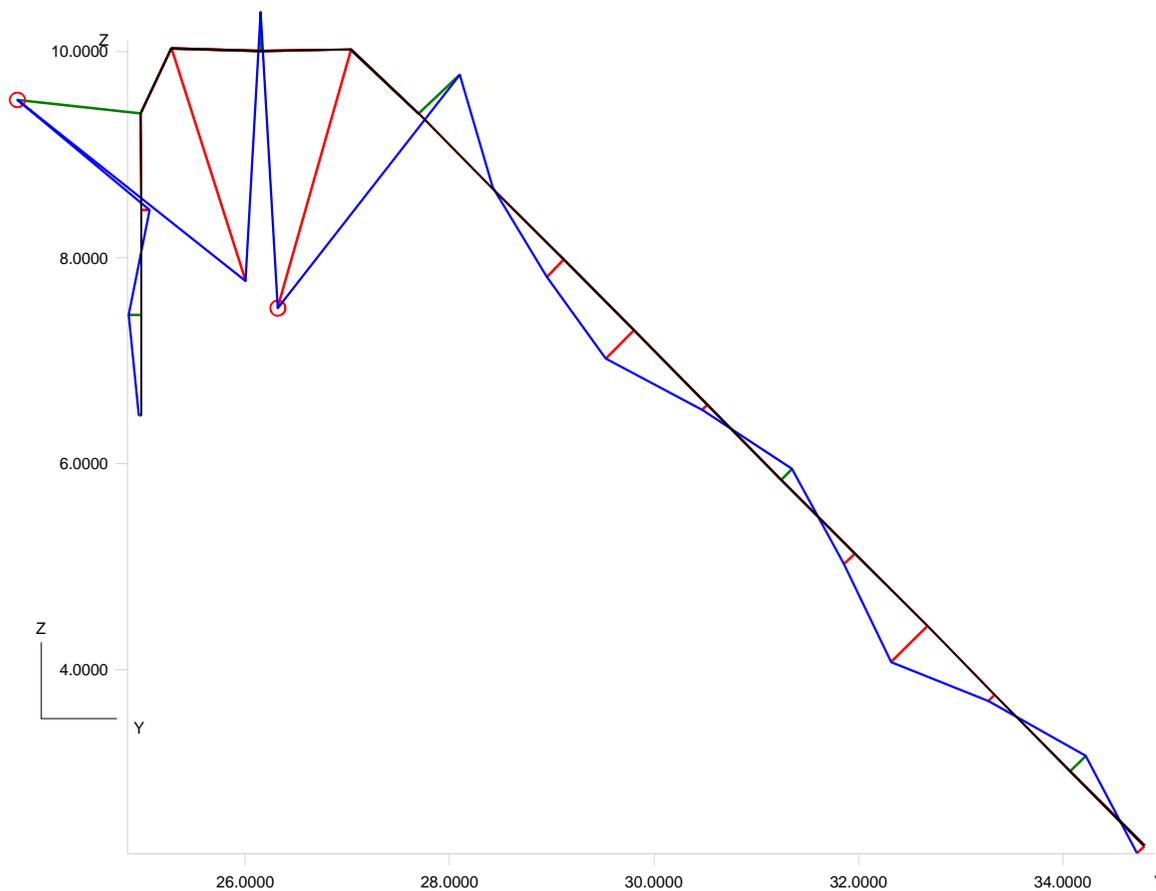
Master

Meas. Plan Name

Pezzo Benchmark 1

Signature:

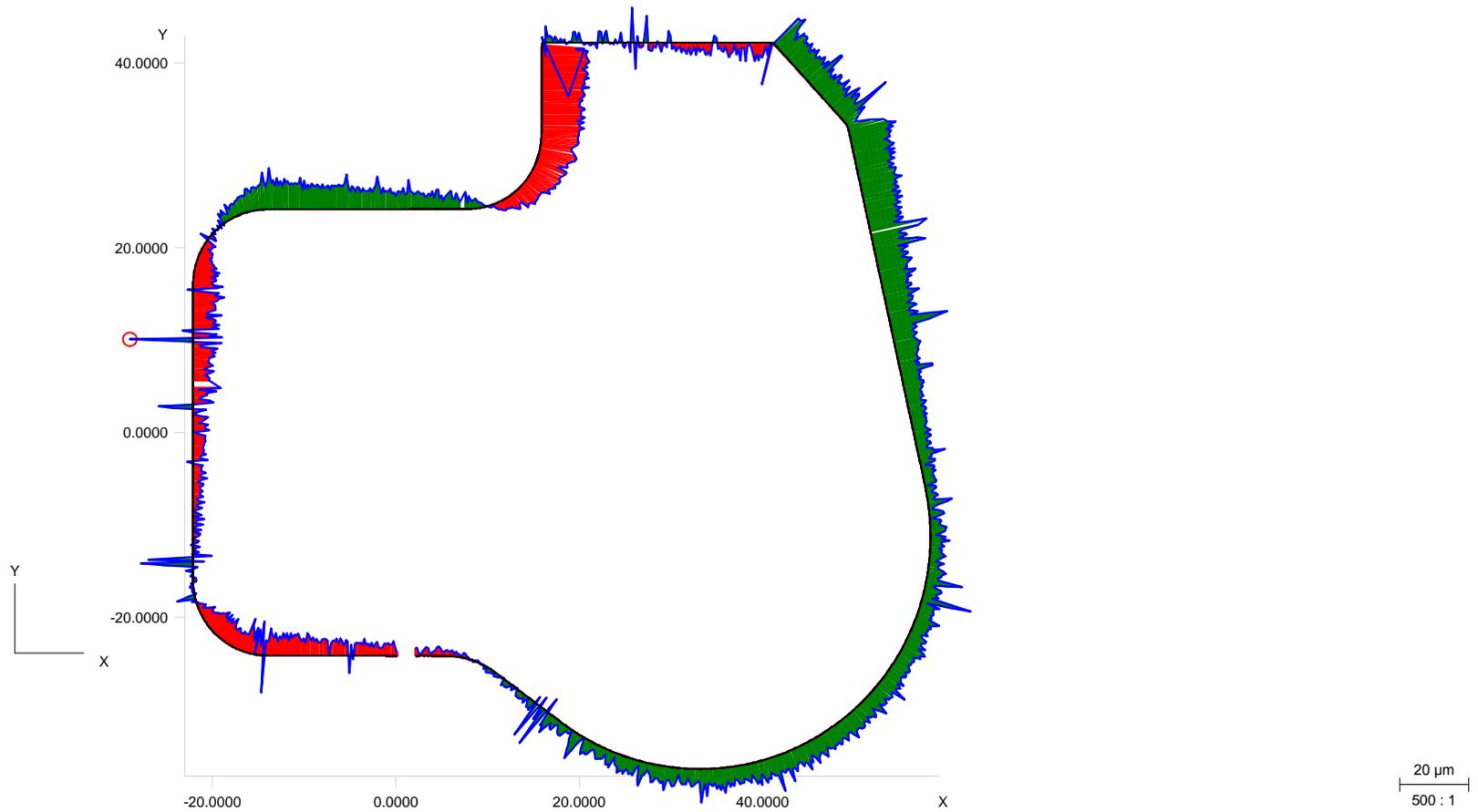
1: i8 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]		X	Y	Z
1	i8 Profilo	0.0247	0.1036	18	-999.0000	999.0000	12	-0.0707	15	0.0329	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000

	Calypso 4.10.06.02	Carl Zeiss	Date Order	December 10, 2012 /
Part Number PZ 4	CMM Type ACCURA_MASS	Drawing No. /	Department:	
Meas. Plan Name	Pezzo Benchmark 1		Operator	Master
			Signature:	

1: b2 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]		X	Y	Z
1	b2 Profilo	0.0059	0.0354	1364	-999.0000	999.0000	579	-0.0171	264	0.0184	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000



Calypso
4.10.06.02

Carl Zeiss

Date
Order

December 10, 2012
/

Part Number
PZ 4

CMM Type
ACCURA_MASS

Drawing No.
/

Department:

Operator

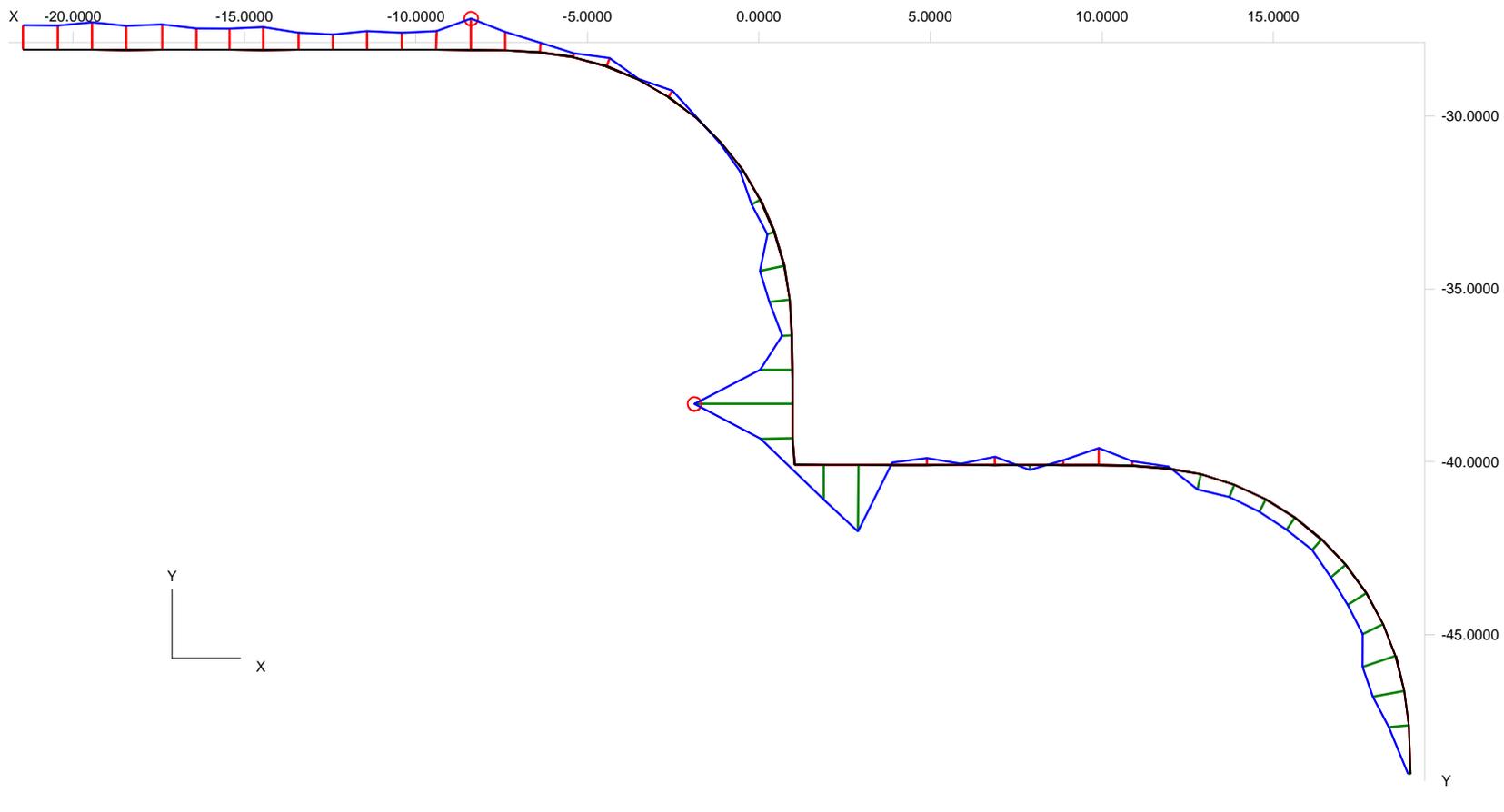
Master

Meas. Plan Name

Pezzo Benchmark 1

Signature:

1: r4 Profilo



No	Identifier	Sigma [mm]	Form [mm]	Number of Points	Lower Tol. [mm]	Upper Tol. [mm]	MinInd	Min Dev. [mm]	MaxInd	Max Dev. [mm]	Best Fit	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rotation	X	Y	Z
1	r4 Profilo	0.0071	0.0377	54	-999.0000	999.0000	41	-0.0091	25	0.0286	Translation	0.0000	0.0000	0.0000	Rotation	0.0000	0.0000	0.0000



Order

/

Drawing No.

/

Part Name
PZ 5

Date
December 10, 2012

CMM
ACCURA_MASS

CMM Revision
07/11/2012

Workpiece Ser. No.

/

Operator
DRIUTTI A.

Software
Calypso

Software Revision
4.10.06.02

Identification	Actual	Nominal	Upper Tol	Lower Tol	Diff	<-- -->
1. Quota 28	27.8857	28.0000	0.2000	-0.2000	-0.1143	---
2. Quota 52	51.8443	52.0000	0.3000	-0.3000	-0.1557	---
3. Quota 40	40.3696	40.0000	0.3000	-0.3000	0.3696	0.0696
4. Quota 20	19.9485	20.0000	0.2000	-0.2000	-0.0515	--
5. Quota 50	50.2601	50.0000	0.3000	-0.3000	0.2601	----
6. Quota 50	50.2735	50.2657	0.3000	-0.3000	0.0078	-

