POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea

MACCHINA UTENSILE PER SKIVING: Sviluppo e collaudo algoritmo di controllo CNC





Relatore:

Chiar.mo Prof. Massimo Sorli

Correlatore:

Chiar.mo Prof. Carlo Rosso

Candidato: Pierluca Mandorino



Indice

Indice

In	trodu	ızione	3
1	Fam	ar S.r.l	5
	1.1	Informazioni su Famar S.r.l	5
	1.2	Il prodotto di Famar S.r.l	5
	1.3	Fasi di produzione	7
	1.4	Organizzazione del lavoro e delle persone	8
2	Rea	lizzazione dentature	9
	2.1	Realizzazione dentature per asportazione di truciolo	9
		2.1.1 Lavorazione con taglio diretto per formatura	9
		2.1.2 Lavorazione per taglio indiretto o per inviluppo	11
	2.2	Finitura delle ruote dentate	14
	2.3	Il Power Skiving	15
		2.3.1 La struttura dello Skiving	17
		2.3.2 La cinematica dello <i>Skiving</i>	19
		2.3.3 Vantaggi e svantaggi	20
3	TAN	NDEM 415 Z RAM	25
	3.1	Gli assi macchina	25
	3.2	La composizione della macchina	25
	3.3	Gruppo basamento	28
	3.4	Gruppo paratia intermedia	29
	3.5	Gruppo asse X	30
	3.6	Gruppo testa	31
	3.7	Gruppo ripari asse X	32
	3.8	Gruppo asse Z	33
	3.9	Scelta mandrino principale	35
	3.10	Gruppo asse Y	36
	3.11	Gruppo unità di Skiving	36
	3.12	Gruppo ripari asse Y	37
		Gruppo ripari	38
		Grupppo armadi elettrici e centralina idraulica	39
		Modellazione 3D	30

Indice

	3.17 3.18	Mandrino utensile Skiving	41 47 49 52
4		Pezzo da lavorare	57 59 60 62 65 66 69 69 73 74 76 76 81 82
		4.5.2.9Coordinata di lavorazione dell'asse Z4.5.2.10Lavorazioni di taglio4.5.2.11Valutazione errori di processo4.5.2.12Test algoritmo su SinuTrain	84 86 88 89
5	5.1	razione dentatura e test su macchina Misurazione dentatura 5.1.1 Profilo del dente 5.1.2 Angolo d'elica della dentatura 5.1.3 Passo della dentatura 5.1.4 Run-out radiale 6.1.5 Misurazione circonferenze Test con pezzo in Teflon	96 98 99 100 101
	5.3 5.4	Cest con pezzo in acciaio	102 113
6	Mod 6.1 6.2 6.3 6.4	Ellazione controllo asse V Equazioni modello matematico	117 117 119 121 125
Aı	ppen	ce: Report misurazione dentatura	135
\mathbf{El}	enco	lelle figure	163

	Indice
Elenco delle tabelle	167
Bibliografia	169

Sommario

Il lavoro di Tesi "Macchina utensile per Skiving: sviluppo e collaudo algoritmo di controllo CNC" è stato svolto in Famar S.r.l ed ha come obiettivo principale la progettazione di una macchina utensile che, sulla base di un programma CNC, sia in grado di realizzare dentature mediante la tecnologia di Skiving. In accordo con la letteratura, è stato dapprima studiato il procedimento di taglio mediante Skiving e, sulla base di tale studio, è stata effettuata la modellazione di alcuni componenti caratteristici per la realizzazione del layout macchina. Il contributo principale di questo lavoro è stato lo sviluppo di un codice CNC per la movimentazione e gestione degli assi macchina durante le operazioni di realizzazione della dentatura. Il programma è stato testato inizialmente su Teflon, in modo tale da limitare i danni dovuti ad eventuali errori di programmazione, e poi sul materiale effettivo da lavorare. L'ottimizzazione dei parametri di taglio del processo, al fine di rispettare le tolleranze prescritte dal cliente, è stata realizzata mediante test sperimentali condotti sulla macchina dopo la validazione del codice CNC. Il collaudo della macchina utensile con la realizzazione di 50 pezzi in serie e l'accettazione del processo produttivo hanno confermato lo scopo preposto dal lavoro. In conclusione, è stato realizzato un modello semplificato del sistema meccanico relativo ad un asse della macchina in modo tale da prevedere il comportamento di alcune grandezze fisiche in gioco. I risultati del modello, sono stati confrontati con i dati sperimentali per valutarne l'accuratezza.

This work, called "Skiving machine: development and testing of CNC algorithm control" has been carried out in Famar S.r.l and its first goal has been the design of a machine tool to realize gears using Skiving technology. According to the literature, it has been studied the cutting process and it has been developed and modelled some of main components of machine. Writing CNC code is the core of this work, to supervise the movement and speed of machine axes. The part program has been, firstly, tested on a Teflon workpiece to possibly prevent and correct programming mistakes and after its validation on an iron workpiece. The next step it has been the optimization of the cutting parameters in order to meet the tolerances by experimental tests. The realization of 50 workpieces has evaluated the mechanical process, achieving the goal of the Thesis. At the end, it has been developed an axis mathematical model of the system in order to compare the analytic results with the experimental ones. The model, also, could be useful for estimating the behaviour of the mechanical system.

Introduzione

In questo lavoro di Tesi, svolto in Famar S.r.l, si è studiata la tecnologia di realizzazione delle dentature mediante *Skiving*, con lo scopo finale di realizzare una macchina utensile.

Al giorno d'oggi, i componenti meccanici dentati rappresentano un elemento fondamentale per la progettazione meccanica a causa delle ottime caratteristiche meccaniche e fisiche che presentano in fase di trasmissione del moto. Un meccanismo dentato può essere classificato in maniera differente a seconda delle caratteristiche geometriche, delle dimensioni e, sopratutto, a seconda della sua applicazione. L'utilizzo sempre più frequente di accoppiamenti dentati ha reso necessaria la crescita, lo sviluppo e l'ottimizzazione dei processi tecnologici atti alla loro realizzazione. Da sempre, si pone una particolare attenzione ai tempi di realizzazione delle dentature che, a causa della loro geometria complessa, impattano negativamente su tutto il processo meccanico volto alla loro realizzazione.

La tecnologia di *Skiving*, a differenza delle altre, ha il vantaggio di essere un processo di taglio continuo ed è in grado di realizzare una qualsiasi entità periodica. Infatti, la forma del profilo generata sul pezzo in lavorazione deriva da uno studio di cinematica 3D effettuato sul profilo del tagliente. In particolare, l'abbattimento del tempo ciclo e il suo setup caratteristico, presentano notevoli vantaggi nella realizzazione di dentature sia interne sia esterne. Lo studio teorico del processo ha portato poi alla progettazione e modellazione dei principali elementi che compongono l'unità di *Skiving*.

Il fine principale del lavoro di Tesi è stato quello di scrivere un codice CNC per la movimentazione e gestione degli assi macchina. Infatti, è stato redatto un algoritmo di controllo parametrico per la realizzazione di dentature. La programmazione CNC è stata seguita da una fase di validazione dell'algoritmo suddivisa in tre step: inizialmente il codice è stato testato su un simulatore per correggere i più importanti errori di implementazione e, in una fase successiva, è stato testato direttamente sulla macchina utilizzando dapprima un componente in Teflon e, per finire, un componente in acciaio.

Successivamente sono state effettuate delle prove sperimentali al fine di ottimizzare il processo di taglio e i parametri della lavorazione in funzione delle tolleranze richieste sulla dentatura. Ogni pezzo realizzato è stato misurato secondo la norma DIN 3962 e sono state apportate le modifiche necessarie volte all'ottimizzazione delle dimensioni e, sopratutto, del profilo del dente.

Inoltre, in funzione di alcuni dati sperimentali ricavati dalla macchina utensile, è stato realizzato un modello numerico semplificato per la simulazione fisica di un asse della macchina utensile. In particolare, è stata valutata l'accuratezza del modello confrontando gli andamenti calcolati con quelli sperimentali. Si è posta particolare

attenzione al confronto della velocità di rotazione, della corrente assorbita dal motore e della coppia motrice generata.

Infine, in fase di accettazione della macchina, è stato effettuato un collaudo con la realizzazione di 50 pezzi in serie per effettuare un calcolo statistico di processo basato sulle tolleranze imposte dal cliente.

Capitolo 1

Famar S.r.l

1.1 Informazioni su Famar S.r.l

Famar S.r.l., nata nel 1973, è un'azienda destinata alla realizzazione delle più innovative macchine utensili richieste oggi dal mercato mondiale nel settore automotive; è in grado, infatti, di offrire la lavorazione di qualsiasi pezzo cilindrico con l'intento di realizzare intere linee di produzione. Per questo, si pone come obiettivo quello di offrire lavorazioni anche su scatole cambio, blocchi e testate motore.

Famar, dopo circa 40 anni di esperienza, collabora direttamente con il cliente al fine di sviluppare il sistema di produzione ottimale per qualsiasi particolare richiesto con un approccio personalizzato. Per questo, dall'ufficio commerciale all'ufficio tecnico, si percorre una strada finalizzata alla ricerca di soluzioni sempre innovative.

1.2 Il prodotto di Famar S.r.l

Famar è un'azienda che eccelle nella fornitura di torni verticali per la produzione di particolari per il settore automotive, camion, trattori, movimento terra, cuscinetti, motoriduttori, giunti petroliferi e pompe.

La macchina di punta dal 1994 è ERGO; nata dalla rivoluzione tecnologica introdotta dal tornio verticale, si è confermata negli anni come una macchina di grande flessibilità, ideale sia per l'azienda di piccole dimensioni sia per la grande industria. Risulta essere talmente versatile da poterla impiegare sia come macchina singola che come parte di una linea di produzione. Inoltre, ERGO è indicata come soluzione migliore per tutti i tipi di lavorazioni meccaniche: della tornitura alla foratura, dalla fresatura alla dentatura, per finire alla rettificatura.

L'esigenza di raddoppiare la potenza della macchina e la sua produttività ha portato allo sviluppo della macchina TANDEM che unisce flessibilità e versatilità di un ERGO con l'aggiunta di una resa maggiore. Fondamentalmente si tratta di due ERGO affiancati, gestiti da un solo controllo in comune.

I modelli ERGO e TANDEM, arricchiti della soluzione INFINITY, hanno la capacità di cambiare l'utensile durante la fase di carico-scarico del pezzo senza fermare la lavorazione, aumentando l'efficienza di circa il 15-20% sul tempo ciclo.

Uno degli ultimi modelli sviluppati risulta essere il SUB. Esso è contraddistinto da una elevatissima compattezza e produttività che, di contro, obbliga la diminuzione delle dimensioni dei pezzi grezzi lavorabili.

Tutti i prodotti precedentemente menzionati sono disponibili in una vasta gamma di dimensioni e capacità di carico in funzione soprattutto degli ingombri dei pezzi che si vogliono lavorare e del livello di produttività e automazione richiesti dalla macchina. Si passa da una macchina SUB160 (in grado di lavorare al massimo diametri pari a 150mm) ad una macchina ERGO1250 (in grado di lavorare diametri fino a 1250mm).

In Famar S.r.l. si trattano, poi, una serie di applicazioni speciali al fine di risolvere su misura i problemi produttivi di tutti i clienti.

In particolare, la struttura di una macchina utensile Famar è sempre la stessa ed è possibile visualizzarla in figura 1.1.

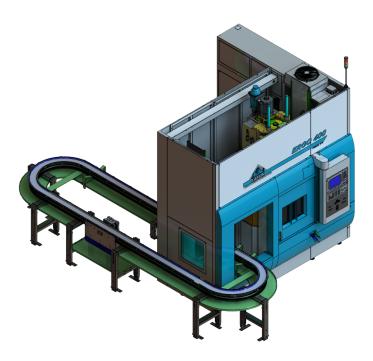


Figura 1.1: Schema macchina ERGO400 di Famar S.r.l.

Il numero degli assi macchina e la loro disposizione nello spazio dipendono principalmente dalla tipologia di lavorazioni che la macchina deve eseguire. In generale, una macchina utensile Famar è composta da due zone che hanno compiti differenti. Come si vede in figura 1.1, da un lato del basamento è posizionata la torretta portautensili per la realizzazione delle lavorazioni meccaniche mentre, al di là di un riparo intermedio vi è la zona di carico-scarico del pezzo. In questo modo, è possibile realizzare un processo altamente automatizzato in modo tale da prevedere, oltre alla lavorazione, anche il prelievo e lo scarico automatico del pezzo grezzo e del pezzo finito. Infatti, come si può osservare dalla figura, il basamento macchina (dal lato della zona di carico-scarico) è attraversato da un trasportatore automatizzato che ha il compito di convogliare verso la macchina, o verso l'esterno, i pezzi in lavorazione. In questo modo si realizza un processo altamente automatizzato anche per la parte relativa al trasporto degli elementi in

lavorazione. Il processo di carico-scarico del trasportatore può essere differentemente affidato ad un operatore oppure, se richiesto, gestito da una cella robotizzata.

La movimentazione durante la lavorazione è affidata ad un CNC che aziona differentemente i motori di ogni singolo asse macchina. Generalmente, per una macchina di tornitura standard, si identifica con la lettera A l'asse relativo alla rotazione dell'utensile, qualora esso fosse motorizzato, mentre con la lettera B l'asse relativo alla rotazione della torretta portautensili per la selezione del tagliente. Il posizionamento del pezzo nelle coordinate spaziali è affidato agli assi X e Z che generano due traslazioni lungo due assi perpendicolari per la definizione del punto di lavorazione. Intorno all'asse C il pezzo viene portato in rotazione in modo tale da generare la velocità di taglio richiesta.

Alcune macchine specifiche prevedono anche l'inserimento dell'asse Y per generare una traslazione trasversale dell'utensile. Questo asse è necessario solo in alcune lavorazioni particolari e, dunque, non è stato pensato per tutte le macchine utensili standard.

1.3 Fasi di produzione

La fase produttiva per la realizzazione di una macchina utensile secondo gli standard seguiti da Famar S.r.l., inizia dalla realizzazione di alcuni particolari che, una volta studiati e progettati in ufficio tecnico, entrano subito in produzione. Famar S.r.l. è dotata di un intero reparto all'interno del quale si effettuano le più semplici lavorazioni meccaniche per ottenere alcuni componenti utili e indispensabili per le fasi successive.

Il cuore della macchina utensile è costituito dal gruppo Testa; questo è composto specialmente dall'elettromandrino che porta in rotazione il pezzo in lavorazione. La principale fase realizzativa, quindi, si basa proprio sull'assemblaggio dell'elettromandrino e del fissaggio dello stesso sulla testa della macchina utensile. Tutti gli elettromandrini Famar sono termostabilizzati sia nella zona cuscinetti sia in prossimità del motore. Per la realizzazione di questa particolare fase, Famar S.r.l. ha un apposito reparto chiamato "Sala Mandrini" all'interno del quale, con temperatura e a umidità controllata, si esegue il montaggio del mandrino. Dopo questa fase di assemblaggio ogni mandrino Famar è sottoposto ad un ciclo di rodaggio in modo tale da monitorare tutte le principali informazioni relative a vibrazioni, temperature e velocità. Successivamente il mandrino è fissato, con opportuni pattini per lo scorrimento, su delle guide longitudinali poste sulla testa. Questo permette un moto di traslazione, tramite una vite a ricircolo di sfere, lungo un asse denominato Z.

In un reparto analogo alla Sala Mandrini vi è la "Sala Torrette", all'interno della quale si procede al montaggio e taratura della torretta portautensili. Essa è direttamente flangiata sul basamento della macchina in modo tale da ottenere una suddivisione omogenea degli sforzi di taglio. Trattandosi di una torretta motorizzata, è provvista di un motore torque il quale fornisce il moto di rotazione agli utensili. Le fasi di montaggio relative alla Testa della macchina utensile e alla torretta portautensili sono completamente scollegate tra loro per questo motivo possono avvenire in parallelo.

In serie, vi è la parte di completamento della macchina utensile dove si procede alla regolazione, su opportune guide standard, della Testa e al fissaggio della Torretta sul basamento. Vengono installati tutti i principali sistemi di sicurezza in modo da garantire massima protezione all'operatore. Il tutto è definito da un insieme non banale di cablaggi elettrici, idraulici e pneumatici governati e gestiti da un opportuno software di elaborazione, controllo e gestione della macchina.

1.4 Organizzazione del lavoro e delle persone

Famar S.r.l. è un'azienda composta da circa 200 dipendenti ed è organizzata in una scala piramidale di tipo gerarchico, strutturata principalmente da uffici e reparti produttivi che fungono da tramite tra la progettazione e la vendita dei prodotti.

All'apice vi è la direzione, all'interno della quale si svolgono i compiti più importanti per il futuro dell'azienda e soprattutto per la gestione e organizzazione di tutti i dipendenti. Gli uffici, invece, hanno il compito di elaborare e sviluppare accuratamente tutte le fasi produttive; sono, inoltre, il punto intermedio tra i poteri decisionali, presi a capo dell'azienda, e la manodopera diretta.

Gli uffici più importanti sono quelli commerciale e acquisti, all'interno dei quali si comunica con clienti e fornitori con lo scopo futuro di inserire l'azienda nel mercato nazionale e internazionale. L'ufficio tecnico ha come obiettivo quello di sviluppare concretamente, sottoforma di disegni e rappresentazioni, tutte le idee e gli studi precedentemente fatti fornendo tutto il materiale necessario per la produzione di ogni componente. Infine, l'ufficio impianti si occupa della progettazione e modellazione degli impianti installati sulla macchina e anche della realizzazione di un software di controllo tale da gestirli.

Al fondo della piramide, vi sono un insieme di reparti all'interno dei quali, operai altamente specializzati, si occupano della realizzazione del prodotto per garantire al cliente un perfetto funzionamento nel tempo.

Tutti gli uffici e i reparti sinora descritti sono seguiti da un responsabile incaricato di controllare e monitorare la correttezza del lavoro svolto.

Capitolo 2

Realizzazione dentature

Il processo tecnologico di realizzazione delle dentature necessita di una serie di operazioni sequenziali che dipendono dal materiale in lavorazione, dalla tipologia di dentatura da realizzare e dalla qualità della dentatura richiesta. Esistono molteplici procedimenti per la fabbricazione di ruote dentate ma, in questo capitolo, si è scelto di analizzare e approfondire quei processi tecnologici caratterizzati dalla lavorazione per asportazione di truciolo.

2.1 Realizzazione dentature per asportazione di truciolo

Come già accennato, le tecnologie di realizzazione delle ruote dentate si classificano in base alla tipologia di trattamento effettuato. Nello specifico, le lavorazioni che prevedono l'asportazione di truciolo per mezzo di macchina utensile, sono:

- lavorazione con taglio diretto per formatura;
- lavorazione per taglio indiretto o per generazione del profilo per inviluppo.

2.1.1 Lavorazione con taglio diretto per formatura

In questo processo tecnologico, la generazione del profilo del dente avviene mediante la replicazione della forma dell'utensile da taglio utilizzato. Risulta chiaro che, riferendosi alle lavorazioni con taglio diretto, la forma del tagliente deve corrispondere esattamente al profilo della cava tra due denti della ruota dentata. Alcuni esempi di lavorazioni per formatura sono riportati di seguito.

Sagomatura, piallatura e scanalatura La sagomatura, la piallatura e la scanalatura sono metodologie di taglio che utilizzano un utensile con un profilo pari a quello della cava da realizzare sul pezzo. È importante osservare che, con queste lavorazioni, la produttività e la qualità dei pezzi lavorati sono molto basse. Infatti, sono dei processi tecnologici utilizzati solo per la generazione di pochi denti in casi particolari di manutenzione o riparazione di una dentatura. Nello specifico, la piallatura e la scanalatura, sono tecnologie che sfruttano la stessa teoria alla base della sagomatura ma vengono utilizzate solo in casi specifici: la piallatura viene impiegata per la realizzazione di dentature con eccessiva lunghezza, mentre la scanalatura per le dentature interne.

Fresatura La realizzazione della dentatura mediante la fresatura può avvenire utilizzando due tipologie di utensili differenti, osservabili in *figura 2.2*. Nel primo caso a sinistra si tratta di un utensile da fresa per formatura, mentre sulla destra è riportato un utensile a disco. La produzione di dentatura mediante l'utilizzo di una fresatura consente di:

- utilizzare utensili in HSS che risultano essere più economici. Talvolta, a seconda delle dimensioni delle dentature da realizzare, è necessario utilizzare utensili con inserti in carburo metallico che presentano delle caratteristiche di resistenza nettamente migliori;
- utilizzare una fresa universale provvista di divisore per la rotazione controllata del pezzo.



Figura 2.1: Utensile da fresa per formatura.

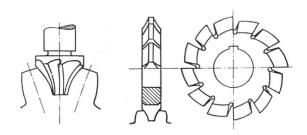


Figura 2.2: Differenti utensili per fresatura.

Il taglio mediante fresatura realizza, sul pezzo grezzo, una cava per volta. È necessario, quindi, tra un taglio e il successivo, una rotazione del pezzo di un angolo pari a $\frac{360^{\circ}}{z}$ dove z è il numero di denti da realizzare.

Questo tipo di tecnologia può essere utilizzata solo per la realizzazione di pochi pezzi in quanto il processo è molto lungo e poco preciso. Infatti, per dentature particolarmente grandi, sono necessarie varie passate di taglio che allungano i tempi di produzione. Inoltre, per realizzare differenti dentature (anche a parità di modulo) sono necessari specifici utensili per ognuna di esse.

Come si osserva in *figura 2.3*, la fresa è provvista di un doppio moto di traslazione, che permette l'avvicinamento al pezzo e di un moto di rotazione per generare la velocità di taglio. Alla fine della corsa di taglio relativa all'intera lunghezza del dente, la fresa si allontana verticalmente dalla posizione di lavoro e il pezzo ruota intorno al proprio asse per il taglio del dente successivo. Lo spostamento della fresa lungo tutta la lunghezza del dente permette un taglio graduale.

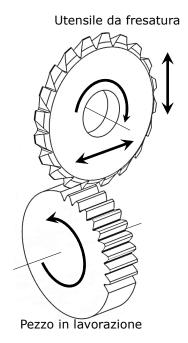


Figura 2.3: Schema fresatura ruote dentate.

Brocciatura La brocciatura è uno tra i più importanti metodi per la realizzazione di dentature mediante formatura, ed è caratterizzata dalla possibilità di utilizzare due tipologie di utensili differenti.

Si può ricorrere ad un utensile conico di sezione equivalente a quella della dentatura che si vuole realizzare e che genera una rimozione graduale del materiale. La fruizione di tale utensile consente di realizzare tutti i denti simultaneamente e fa sì che la brocciatura sia un processo molto veloce. Con l'utensile classico, invece, si effettua il taglio di un solo dente per volta e ciò porta ad un aumento notevole dei tempi di produzione.

Il moto di taglio avviene assialmente alla broccia o al pezzo in lavorazione. Questo antico processo risulta essere molto produttivo ma è diventato al giorno d'oggi obsoleto a causa degli eccessivi costi della strumentazione oltre che del processo stesso.

2.1.2 Lavorazione per taglio indiretto o per inviluppo

I metodi di generazione del profilo dentato per inviluppo sono caratterizzati dalla possibilità di utilizzare un unico utensile per la produzione di un ampio range di dentature che, a parità di modulo e angolo di pressione, differiscono tra loro per il numero di denti. Di conseguenza, sono dei processi di taglio molto economici rispetto ai precedenti e garantiscono un'elevata produttività.

La forma del profilo dell'utensile non coincide con quella del dente, ma è un profilo ad esso coniugato. Nel procedimento di inviluppo il rotolamento tra la primitiva dell'utensile e quella della ruota produce il moto di generazione. Il moto di taglio invece è solitamente affidato all'utensile. Con il taglio indiretto, inoltre, si ha un notevole vantaggio in termini di tempo e di precisione.

Dentatrice Maag Nella dentatrice con utensile lineare (sistema Maag) la ruota rotola su una dentiera rettilinea che ha lunghezza variabile. Il moto di taglio è assegnato all'utensile che si muove con un movimento rettilineo alternato, mentre la ruota possiede il moto di generazione del profilo. Dalla teoria sull'ingranamento delle ruote si evince che l'utensile, essendo rettilineo, ha un dente con profilo trapezoidale tale da generare sulla ruota un dente ad evolvente. In alcune applicazioni particolari, l'utensile è dotato di un solo tagliente.

Essendo l'utensile composto da pochi denti, l'azione di taglio e lo sfregamento continuo si ripercuotono sempre sugli stessi due o tre profili della dentiera. Per questo motivo, la temperatura del coltello aumenta notevolmente creando, per effetto della dilatazione termica, un allungamento che produce notevoli errori geometrici. Per ovviare a questo problema, si potrebbe pensare di muovere gradualmente l'utensile lungo il suo asse longitudinale in modo tale da spostare il tagliente in lavorazione e sostituirlo con quello successivo.

Come si osserva in *figura 2.5*, il procedimento di taglio è analogo alla fresatura ma, in questo caso, la velocità di taglio è generata dalla traslazione verticale dell'utensile. Il taglio, dunque, avviene in maniera graduale, grazie all'ingranamento tra ruota e dentiera.



Figura 2.4: Utensile dentatrice Maag.

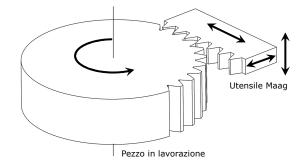


Figura 2.5: Schema taglio con dentatrice Maag.

Con questo sistema si possono realizzare dentature esterne di tipo cilindrico o, inclinando opportunamente il coltello, di tipo elicoidale.

Dentatrice Fellow La dentatrice di tipo Fellow è composta da un utensile circolare e può essere utilizzata sia per la realizzazione di dentature esterne sia per le dentature interne. È un processo che si basa sul cinematismo pignone-ruota in cui l'utensile possiede entrambi i moti di generazione del profilo e di taglio. Il moto di taglio, come nella dentatrice Maag è di tipo rettilineo alternato.

Con questa tecnologia si riducono gli effetti negativi derivanti dall'utilizzo di pochi taglienti (come avviene con la dentatrice Maag) in quanto l'utensile cui ci si riferisce è composto da un numero maggiore di denti. Si ha, quindi, una distribuzione più uniforme degli sforzi di taglio su tutti i taglienti e le sollecitazioni termiche risultano inferiori.

Come si osserva in *figura 2.7*, la ruota e l'utensile hanno un ingranamento continuo dovuto al doppio moto di rotazione; la velocità di taglio, invece, è imposta dalla traslazione verticale dell'utensile lungo tutta la lunghezza del dente da realizzare.

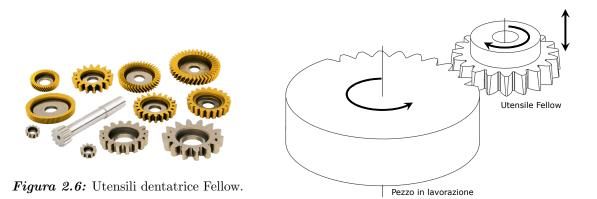


Figura 2.7: Schema taglio con dentatrice Fellow.

Dentatrice a creatore (sistema Pfauter) L'utensile che si adopera in questa tipologia di processo è il creatore. Si tratta di una fresa a vite in cui la dentiera è avvolta ad elica su un rocchetto e il filetto è interrotto da tagli assiali che delimitano i denti.

Questo sistema è molto utilizzato nelle lavorazioni di dentature esterne, in assenza di spallamenti che impediscono la lavorazione sull'intera lunghezza della ruota. È impossibile la realizzazione di dentature interne a causa della geometria richiesta dal sistema. Per la realizzazione di dentature elicoidali, invece, è sufficiente imporre all'utensile un'angolazione pari al valore dell'angolo d'elica che si vuole ottenere.

Anche in questo caso, come già visto in precedenza, l'utensile può essere in HSS oppure, per lavorazioni più importanti, con inserti in carburo metallico. Il moto di avanzamento e il moto di taglio sono entrambi posseduti dal creatore, mentre la ruota è dotata del solo moto di generazione.

In questo caso, il pezzo e l'utensile sono in continua rotazione come un accoppiamento ruota-vite senza fine. Il processo di taglio avviene per tutta la lunghezza del dente tramite la traslazione verticale dell'utensile o del pezzo.



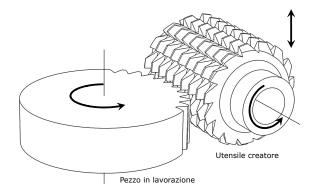


Figura 2.8: Utensile dentatrice a creatore.

 ${\it Figura~2.9:}$ Schema taglio con dentatrice a creatore.

Dentatrice Bilgram e Gleason Altre tecnologie per la realizzazione di ruote dentate sono quelle relative alla dentatrice Bilgram e Gleason. Il primo metodo è un sistema adatto al taglio di ruote dentate coniche a denti dritti e si basa sulla teoria della stozzatura con una traiettoria convergente al centro della ruota conica. Si utilizza un utensile unico che si muove di moto rettilineo alternativo tangente alla generatrice del cono di fondo della ruota in lavorazione.

Il secondo metodo è un'evoluzione della dentatrice Bilgram. Le principali differenze consistono nel fatto che in questo caso si utilizzano due denti e sono contrapposti in modo tale da contornare il profilo del dente da entrambe le parti.

2.2 Finitura delle ruote dentate

Allo scopo di avere buona scorrevolezza dell'ingranaggio, ottime performances e longevità del sistema, è importante che siano rispettate alcune caratteristiche costruttive. Nello specifico, si cerca di ottenere delle dentature:

- che siano il più possibile accurate in termini di dimensioni e forma del profilo;
- che abbiano un'ottima durezza e resistenza alla corrosione sui fianchi dei denti;
- che abbiano un'ottima finitura superficiale.

In riferimento ai primi due punti si cerca di ottimizzare quelli che sono i processi di taglio precedentemente descritti, eliminando o riducendo al minimo eventuali errori in fase di elaborazione del taglio e si tenta di migliorare i risultati derivanti dai trattamenti termici a cui sono sottoposti i semilavorati.

Per ottimizzare la finitura superficiale, invece, si utilizza uno dei seguenti metodi:

 Rasatura o sbarbatura → è in grado di correggere modesti errori di divisione, di angolo d'elica e di profilo dei fianchi. L'utensile ha la forma di una ruota dentata in acciaio super rapido temprato sui cui fianchi sono ricavate delle scanalature a spigolo vivo in grado di asportare sovrametalli dell'ordine di $20-60\mu m$. La rasatura avviene facendo ingranare l'utensile con la ruota che scorre alternativamente con moto longitudinale. L'utensile ha una dentatura elicoidale con un angolo d'elica di circa $10-15^{\circ}$ ed è, quindi, necessario calcolare l'angolo di posizionamento tra i due elementi a seconda della tipologia di ruota da lavorare;

- Rettificatura → sulle dentature sottoposte a trattamento termico di tempra o cementazione, è necessario effettuare una finitura mediante rettificatura. Si utilizzano principalmente delle mole profilate che vengono continuamente ravvivate con un utensile diamantatore. Tale tipo di rettificatura si esegue mediante utensili che ricoprono esattamente il profilo situato tra due denti perciò, questi ultimi, devono essere differenti per ogni tipologia di ruota. Un'ulteriore tipologia di rettificatura è quella per generazione naturale del profilo, che consiste nel lavorare il fianco del dente utilizzando due mole. Il moto di generazione del profilo, pertanto, è affidato unicamente alla ruota;
- Lappatura → la lappatura si esegue facendo ingranare tra di loro due ruote dentate e interponendo tra di esse dell'olio che porta in sospensione del materiale abrasivo finissimo in grado di asportare materiale nell'ordine di 15 − 20µm. La rotazione deve avvenire in entrambi i sensi in modo tale da effettuare la lavorazione su entrambi i lati di ogni dente. Tale procedura è utilizzata per la correzione di minimi errori di geometria dei denti.



Figura 2.10: Utensile finitura per rettificatura.

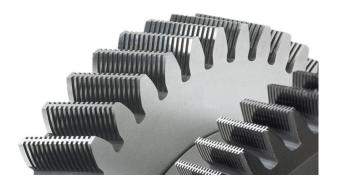


Figura 2.11: Utensile finitura per sbarbatura.

2.3 Il Power Skiving

Il Power Skiving è stato proposto per la prima volta nel 1910 da Wilhelm von Pittler. È un processo di taglio continuo per la lavorazione di ruote o alberi meccanici che presentano elementi caratteristici periodici.

Il Power Skiving può essere descritto come la combinazione tra il processo di taglio per formatura e quello con creatore. Tuttavia, a differenza degli altri due processi, il Power Skiving è in grado di effettuare un taglio continuo, con asportazione di truciolo regolare; risulta essere, quindi, più veloce rispetto al processo di formatura e più flessibile del taglio con creatore.

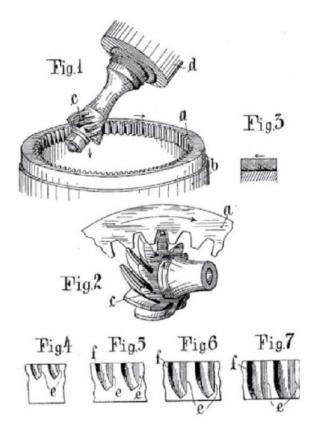


Figura 2.12: Schema funzionamento Power Skiving.

Nei primi anni di sviluppo, il Power Skiving ha messo a dura prova le più importanti imprese di costruzione di macchine utensili in quanto, richiedendo una struttura meccanica notevolmente rigida e degli utensili con elevata resistenza alla corrosione, presentava una sfida difficile da affrontare. Un altro fondamentale problema risultava essere la sincronizzazione degli assi macchina che non poteva essere realizzata unicamente con i classici riduttori meccanici. Dopo i primi anni, sono state portate a termine numerose ricerche in questo ambito che hanno permesso di dominare i limiti iniziali e hanno reso, dunque, questo processo efficiente per la lavorazione di componenti meccanici. [19]

Nel 1960 è stata commercializzata la prima attrezzatura per *Skiving* in aggiunta ad una macchina utensile a creatore. Il Power Skiving è una tecnologia, ancora oggi, in pieno sviluppo e che è alla base di numerose ricerche sperimentali basate su simulazioni FEM del processo. Queste ultime hanno lo scopo di stimare preventivamente, quelle che sono le forze richieste dal processo, le temperature del pezzo in lavorazione e del truciolo e i parametri di processo quali: l'avanzamento assiale, la velocità di rotazione del mandrino, la velocità di taglio e la strategia di lavorazione.

Negli ultimi anni, grazie allo sviluppo delle tecnologie CNC e dei materiali degli utensili, il processo di taglio delle dentature tramite *Skiving* ha gradualmente messo

in mostra i suoi potenziali vantaggi e una grande serie di utensili da taglio sono stati studiati e prodotti dalle più importanti imprese costruttrici. [14]

Si potrebbe considerare il Power Skiving una tra le più evolute tecnologie per la realizzazione di dentature di tipo esterno ed interno. Ci si può occupare, quindi, di dentature interne o esterne con o senza profilo ad evolvente, di dentature elicoidali o dritte, e di scanalature e dentature di forma non unificata. Uno degli aspetti più salienti del Power Skiving risulta essere la sua elevata versatilità di lavorazione. Infatti, uno studio approfondito per la progettazione dell'utensile da taglio [19], ha dimostrato che con tale procedura è possibile generare, sul pezzo in lavorazione, un qualsiasi profilo periodico.

2.3.1 La struttura dello Skiving

La struttura del processo di *Skiving* per la realizzazione di una dentatura interna è rappresentata in *figura 2.13*.

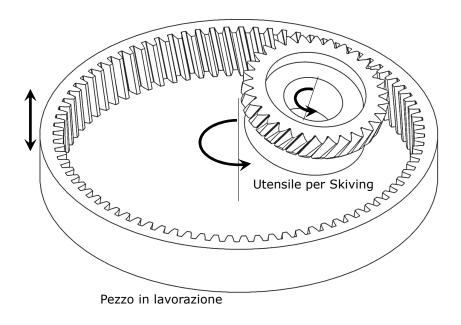


Figura 2.13: Schema struttura Power Skiving.

Il Power Skiving è classificato generalmente in due tipologie differenti:

- Simple type dove il processo di taglio è caratterizzato solo da un angolo Σ di rotazione dell'utensile;
- General type dove, oltre all'angolo Σ , è presente un secondo angolo δ applicato all'utensile intorno all'asse x_1 . Solitamente, l'angolo δ è un angolo utile nella lavorazione con utensili cilindrici perchè permette di incrementare l'angolo di spoglia del tagliente.

Nel taglio per *Skiving*, il pezzo e l'utensile sono dotati di un moto di rotazione intorno al proprio asse. In aggiunta, uno dei due è dotato anche di un moto di traslazione.

Per le caratteristiche delle macchine utensili Famar, è il pezzo che è dotato del moto di avanzamento di traslazione lungo il proprio asse. Come si può notare in figura 2.14, per la definizione del setup del processo sono indispensabili tre parametri Σ , a, L che definiscono rispettivamente l'angolo dell'utensile, la distanza tra i centri e l'offset tra il pezzo e l'utensile.

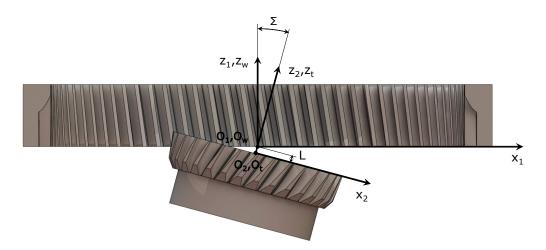


Figura 2.14: Setup di processo in vista frontale.

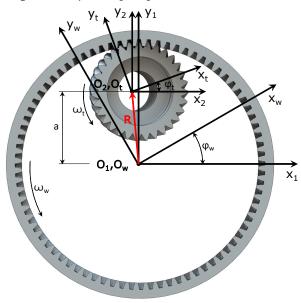


Figura 2.15: Setup di processo in vista superiore.

Per una rappresentazione più chiara, si indicano anche i principali sistemi di riferimento dei corpi. $S_1(x_1, y_1, z_1)$ è il sistema di riferimento fisso riferito al pezzo in lavorazione che, come detto prima, ruota e avanza lungo z_1 . $S_w(x_w, y_w, z_w)$ è il sistema di riferimento rigido con il corpo in rotazione la cui posizione iniziale coincide con S_1 . $S_2(x_2, y_2, z_2)$ è il sistema di riferimento fisso per l'utensile, il quale, quindi, ruota intorno a z_2 . Infine, $S_t(x_t, y_t, z_t)$ è solidamente attaccato all'utensile ed è, inizialmente, coincidente con S_2 .

In *figura 2.16* si può osservare un confronto tra le principali metodologie di realizzazione delle dentature dove emergono anche le velocità imposte all'utensile e al pezzo in lavorazione.

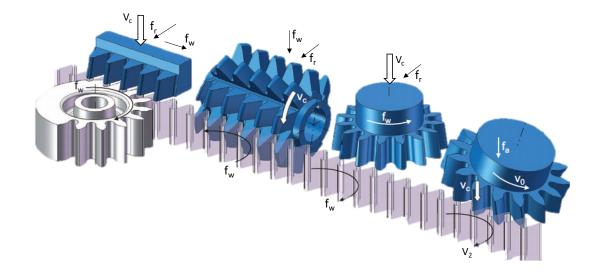


Figura 2.16: Confronto tecnologie di taglio dentature.

2.3.2 La cinematica dello Skiving

Per la definizione della posizione dell'utensile, rispetto ai sistemi di riferimento indicati, si utilizza il vettore posizione riferito a S_1 :

$$R = \begin{bmatrix} -L \cdot \sin \Sigma & a & 0 \end{bmatrix}^T \tag{2.1}$$

Per il calcolo delle due velocità di rotazione, se si indica con ω_t la velocità di rotazione dell'utensile e con f la velocità di avanzamento del pezzo lungo z_1 , la velocità di rotazione del pezzo può essere calcolata come:

$$\omega_w = \frac{z_t}{z_w} \cdot \omega_t + \omega_2 = \frac{z_t}{z_w} \cdot \omega_t + \frac{f}{p}$$

dove si indicano con z_t e z_w rispettivamente il numero di denti dell'utensile e del pezzo. Il secondo termine è relativo solo al caso di realizzazione di dentature elicoidali in quanto con p si indica il parametro d'elica della dentatura calcolato come:

$$p = \frac{p_z}{2\pi}$$

dove p_z corrisponde al passo d'elica riferito al cilindro di riferimento del pezzo calcolato come:

$$p_z = \frac{\pi \cdot d}{tan\beta}$$

con β angolo d'elica del pezzo in lavorazione.

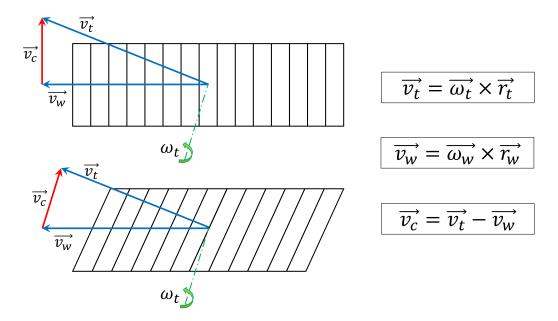


Figura 2.17: Schema velocità di taglio Skiving.

Nella figura 2.17, è possibile osservare le componenti di velocità presenti nel processo di taglio sopra descritto. In particolare, la velocità di taglio è calcolata come differenza tra il vettore di velocità circonferenziale del pezzo e quello dell'utensile.

È molto importante porre attenzione alla valutazione dell'angolo Σ in quanto è dipendente dal valore dell'inclinazione dell'elica del pezzo, e dell'utensile e dalla modalità di accoppiamento dei due. L'angolo di rotazione dell'utensile Σ è, inoltre, funzione della tipologia di dentatura che si vuole realizzare. Il procedimento di calcolo è stato affrontato, più nel dettaglio, nel capitolo 4.

2.3.3 Vantaggi e svantaggi

La tecnologia di Power Skiving, grazie ai suoi notevoli vantaggi di processo, ha subito negli ultimi anni un evoluzione e uno sviluppo tale da diventare una delle principali tecnologie per la realizzazione di dentature.

Uno dei principali aspetti positivi che caratterizza il processo di taglio mediante *Skiving* è la possibilità, come già accennato, di generare una qualsiasi entità periodica. Infatti, con uno studio di cinematica 3D del profilo da realizzare, è possibile modellare, e quindi generare, il profilo del tagliente necessario per quella specifica lavorazione [19]. Questa importante caratteristica di processo rende lo *Skiving* una delle tecnologie più flessibili e versatili ed in grado di effettuare lavorazioni su una grande varietà di pezzi

meccanici: ruote dentate interne e esterne, ruote per trasmissioni con catene, dischi freno, ruote dentate per pompe, alberi-collari scanalati e molto altro.

Il processo, a causa della sua elevata automazione, consente la realizzazione di dentature su lotti medio-grandi. Un altro importante aspetto positivo dello *Skiving* è la possibilità di generare, con un unico utensile, diverse tipologie di ruote dentate vincolate solo dal modulo e dall'angolo di pressione della dentatura. Facendo un confronto con il taglio mediante creatore, lo *Skiving* riduce notevolmente le dimensioni di ingombro necessarie per la lavorazione e presenta una maggiore flessibilità, soprattutto per le lavorazioni interne.

Infatti, a differenza di quasi tutte le altre tecnologie per la realizzazione di dentature, lo *Skiving*, grazie al suo setup caratteristico, permettere di effettuare anche lavorazioni interne con dei vincoli legati solo agli ingombri degli elementi principali. Nonostante ciò, le suddette lavorazioni presentano ancora dei piccoli limiti legati all'evacuazione del truciolo che, a causa della forza centrifuga e delle poche vie di fuga, rimane intrappolato nelle cave della dentatura.

Il consumo di energia legato al processo di Power Skiving, a parità di attrito, risulta essere inferiore rispetto a quello legato al taglio con creatore, a causa del maggior numero di trucioli generati.

Il processo di Power Skiving, però, comporta costi utensili più elevati se confrontati con quelli legati a tecnologie più semplici ma, rispetto a questi, riduce notevolmente i tempi di lavorazione migliorando notevolmente anche le proprietà strutturali della superficie creata.

Il numero delle passate di taglio, se paragonato a quello delle altre tecnologie, è di molto inferiore in quanto, grazie all'elevata rigidezza del sistema, dà la possibilità di effettuare lavorazioni più profonde.

Tra i principali svantaggi dello *Skiving* è importante evidenziare la necessità di uno specifico algoritmo di controllo e sincronizzazione degli assi che complica notevolmente il processo di gestione e controllo della macchina.

Un'altra importante limitazione, deriva dagli ingombri degli elementi in gioco, in particolare dell'utensile in fase di lavorazione di dentature interne. In generale, come si vedrà successivamente, l'utilizzo di un angolo Σ molto grande, a parità di velocità di taglio, riduce la velocità di rotazione richiesta dai mandrini. Ne verrà, quindi, che a causa della difficoltà di mantenere il sincronismo tra gli assi ad alta velocità, l'utilizzo di un ampio angolo Σ risulta favorevole al processo.

L'angolo Σ risulta però limitato generalmente dalla geometria del pezzo in lavorazione e, in alcuni casi, dalla macchina utensile. Infatti, una dentatura interna con un piccolo diametro ed un'elevata larghezza di fascia, non permette un'ampia inclinazione dell'utensile poichè il suo codolo posteriore potrebbe collidere con le superfici laterali del pezzo. Si potrebbe ricorrere all'utilizzo di utensili con codoli di diametri ridotti in modo tale da ridurre gli ingombri e utilizzare un angolo Σ maggiore. Nonostante ciò, però, i vantaggi ottenuti dalla riduzione delle velocità di rotazione con angolo Σ elevato, risulterebbero poco influenti se paragonati alla perdita di rigidezza generata sul sistema. Un buon compromesso per avere velocità ragionevoli in una lavorazione interna sarebbe quello di utilizzare un angolo Σ intorno ai 20° .

Nel caso di dentature esterne, l'angolo d'inclinazione dell'utensile non ha grandi limiti e si può utilizzare un angolo Σ molto elevato fino ad un massimo di 45°.

Un ulteriore fattore negativo, che sicuramente influenza la scelta dell'angolo d'inclinazione, è la necessità di avere un gioco assiale all'inizio e alla fine della dentatura. Infatti, il centro dell'utensile deve eseguire la lavorazione per tutta la lunghezza di fascia e quindi, una parte di esso, sporge assialmente all'inizio e alla fine della dentatura. È un vincolo geometrico che è necessario considerare anche in fase di progettazione dell'elemento meccanico. Questo è un limite che il Power Skiving presenta sia per dentature interne sia per quelle esterne.

Il Power Skiving di contro, rispetto alle altre tecnologie, richiede un gioco assiale minore a causa della sua particolare geometria di lavorazione e può essere valutato come:

$$c = R_t \cdot sin\Sigma$$

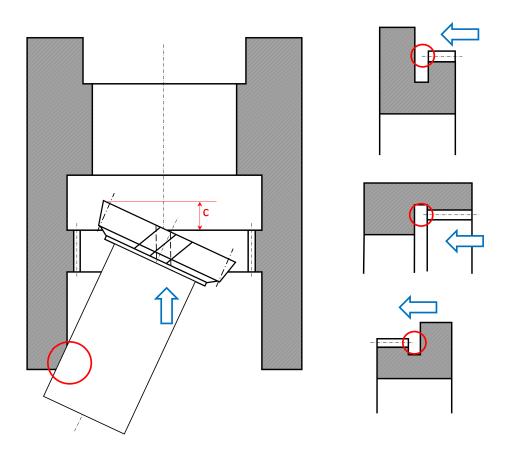


Figura 2.18: Schema svantaggi Skiving.

In figura 2.18 si riportano alcune rappresentazioni che evidenziano le principali problematiche dello *Skiving* in fase di lavorazione di dentature interne o esterne. In particolare, a sinistra, è possibile visualizzare una configurazione di lavorazione interna

in cui il codolo dell'utensile impatta contro il bordo del pezzo a causa della profondità della lavorazione e del piccolo diametro della dentatura. È possibile inoltre osservare il gioco assiale richiesto dalla lavorazione con *Skiving*. A destra si riportano, invece, delle tipologie di pezzo in lavorazione che non rispettano il requisito della extra-corsa assiale, risultando, quindi, impossibili da lavorare. In blu è indicata la direzione di esecuzione del taglio della dentatura.

Capitolo 3

TANDEM 415 Z RAM

Nella stesura di questo capitolo il focus dell'attenzione sarà rivolto alla progettazione della macchina utensile per la realizzazione di dentature tramite *Skiving*.

Sebbene in azienda fosse già stata effettuata la progettazione di una macchina utensile per *Skiving*, il bisogno di caratteristiche geometriche differenti ha reso necessaria una nuova modellazione della macchina.

Nello specifico, la macchina già precedentemente sviluppata era stata pensata per effettuare delle operazioni preliminari di tornitura in modo da preparare il pezzo per la successiva fase di dentatura. Possedeva, quindi, di entrambe le tecnologie relative al taglio di tornitura e allo *Skiving*. L'attività alla quale ho preso parte, invece, si è basata sulla modellazione e realizzazione di una macchina utensile dotata solo dell'unità per *Skiving* e che, a differenza di quella già esistente, fosse in grado di lavorare pezzi di dimensioni maggiori con dentature più importanti.

3.1 Gli assi macchina

La macchina che analizzeremo di seguito è costituita da 6 assi, osservabili in *figura* 3.1.

I movimenti di rotazione del pezzo e dell'utensile avvengono rispettivamente intorno agli assi C e V. Il posizionamento del pezzo secondo le coordinate impostate dal CNC avviene lungo gli assi X e Z rappresentati in figura. Il mandrino utensile, invece, subisce una rotazione intorno all'asse B in modo tale da generare la velocità di taglio necessaria e una traslazione lungo l'asse Y per il posizionamento radiale sul pezzo in lavorazione. I 6 assi macchina sono tutti controllati e gestiti dal CNC che riceve le informazioni di posizione e velocità da opportuni encoder posizionati su di essi.

3.2 La composizione della macchina

La composizione generica di una macchina Famar è stata già trattata nel capitolo 1, con una breve descrizione funzionale degli organi principali. In questo caso, la macchina cui ci si riferisce è un TANDEM 415 Z RAM. Come tutte le macchine Famar, il nome risulta essere univoco e in grado di indentificare una specifica configurazione di macchina. Infatti, si tratta di:

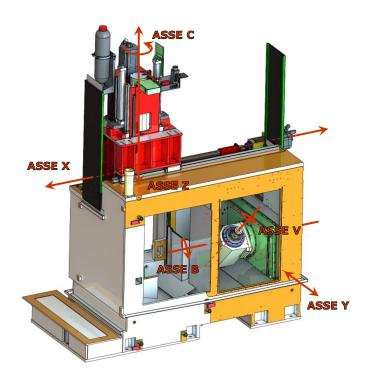
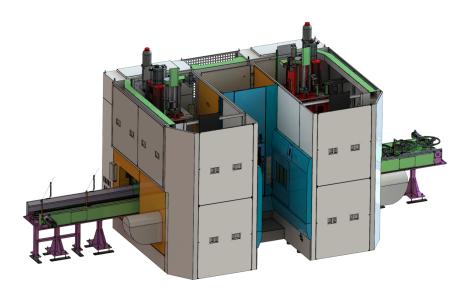


Figura 3.1: Schema assi macchina.

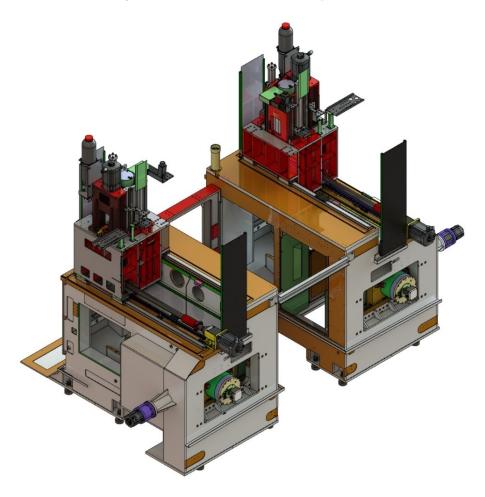
- TANDEM → come già visto nel capitolo 1, si è pensato di utilizzare una macchina tandem in modo tale da raddoppiare la produttività della macchina in funzione delle richieste da parte del cliente;
- 415 → il numero presente nel nome della macchina identifica il mandrino utilizzato. Infatti, il numero corrisponde alle dimensioni massime, in millimetri, che è possibile lavorare;
- Z → la sigla corrisponde, come visto in precedenza, al fatto che la macchina è dotata anche di un asse Y per la movimentazione dell'utensile. Infatti, la macchina standard Famar non possiede il moto di traslazione dell'utensile. In questa macchina, la movimentazione dell'utensile lungo l'asse Y è necessaria in modo tale da effettuare il posizionamento radiale sul pezzo in lavorazione in funzione della profondità di passata individuata;
- RAM → identifica la tipologia di mandrino pezzo utilizzato. Il mandrino RAM risulta essere un'evoluzione del mandrino standard e la sua scelta verrà approfondita successivamente.

Trattandosi di una macchina TANDEM, ogni componente risulta simmetrico rispetto al piano intermedio della macchina in modo tale da raddoppiarne la produttività. Pertanto si procederà con l'analisi di un solo lato della macchina utensile. In figura 3.3, è possibile osservare la composizione della macchina in tutti i suoi elementi principali.

La macchina è composta da un basamento in ghisa fissato sul pavimento da opportuni piedini che limitano le vibrazioni. Sulla parte superiore di esso sono fissate le



 ${\it Figura~3.2:}$ Schema macchina complessivo.



 ${\it Figura~3.3:}$ Schema TANDEM 415 Z RAM senza ripari e senza trasporto.

guide relative all'asse X su cui scorre il gruppo testa del mandrino principale contenuto all'interno del carro. Il mandrino è libero di traslare verticalmente lungo l'asse Z e di ruotare intorno al proprio asse C. Frontalmente, sul basamento, è fissata la guida relativa all'asse Y della macchina in grado di muovere lateralmente l'unita di *Skiving* composta da un mandrino utensile e da una tavola rotante.

Normalmente, una macchina utensile Famar è composta da una zona di lavorazione e una zona di carico-scarico del pezzo. In funzione dei movimenti degli assi macchina, il pezzo viene spostato da una posizione all'altra. In particolare, in figura 3.1, è possibile osservare la zona di lavorazione dove è posizionata l'unità di Skiving e, al di là della paratia intermedia, la zona di carico-scarico. Il mandrino principale, muovendosi lungo l'asse X, si posiziona nella zona di carico-scarico e preleva il pezzo grezzo dal trasportatore. A questo punto, scorrendo lungo il basamento, si posiziona nella zona opposta per effettuare la lavorazione. A fine processo di taglio il mandrino scarica il pezzo finito sul trasportatore e ne preleva il grezzo successivo.

Ogni elemento della macchina verrà trattato più nel dettaglio successivamente in modo tale da descriverne le principali funzioni e le modalità con cui si interfaccia con gli altri componenti.

3.3 Gruppo basamento

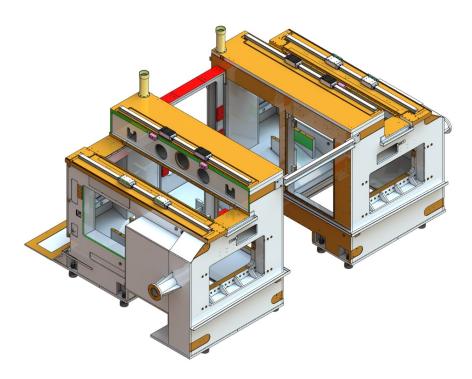


Figura 3.4: Gruppo basamento.

Il gruppo basamento è composto da due basamenti in ghisa montati a specchio. Il basamento è un corpo realizzato per saldatura sul quale vengono effettuate delle lavorazioni di precisione per ottenere tolleranze e quote desiderate sugli elementi di accoppiamento. Il basamento è uno degli elementi più importanti della macchina in quanto è il corpo attraverso il quale si scaricano tutte le vibrazioni derivanti dalle forze di lavorazione. Per questo motivo, in officina, dopo essere stato verniciato, viene riempito internamente di calcestruzzo per aumentarne le caratteristiche di bilanciamento e di smorzamento. Inoltre, è il gruppo di supporto dell'intera macchina in quanto è l'elemento su cui sono fissati tutti gli altri organi principali a partire dal gruppo Testa fino all'unità di *Skiving*, al trasportatore e al gruppo dei ripari della macchina.

I due basamenti presentano un'apertura nella zona laterale che li mette in comunicazione tra loro attraverso il trasporto di carico-scarico del pezzo. Nella parte centrale è presente un supporto che rende solidali i due basamenti e permette il passaggio del trasportatore da un basamento all'altro.

Il "foro rettangolare", realizzato sulla parte frontale, accoglie la slitta dell'asse Y insieme alla testa per *Skiving*. Nella parte posteriore, invece, vi è una piattaforma realizzata in lamiera saldata sul quale vengono disposti gli armadi elettrici e la centralina idraulica della macchina.

Sulla parte superiore sono fissate le guide di scorrimento dell'asse X che consentono la movimentazione del gruppo Testa.

3.4 Gruppo paratia intermedia

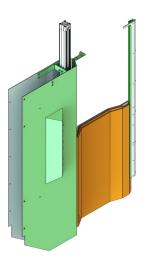


Figura 3.5: Paratia intermedia aperta.

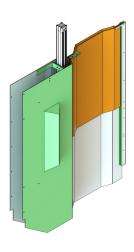


Figura 3.6: Paratia intermedia chiusa.

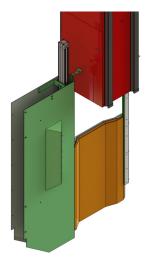


Figura 3.7: Mandrino pezzo che attraversa la paratia intermedia.

Il gruppo della paratia intermedia è composto da una serie di elementi in lamiera che sono stati modellati per ottenere un accoppiamento con le restanti parti della macchina. In particolare, la paratia intermedia viene fissata sui due lati del basamento ed ha il compito di proteggere la zona di carico-scarico da quella di lavorazione. Infatti, la presenza di polvere di truciolo nella zona del trasportatore, potrebbe influenzarne il posizionamento compromettendo le sue principali funzioni. In figura 3.1 è possibile osservare l'applicazione della paratia intermedia nel blocco macchina.

La movimentazione della paratia mobile è affidata ad un cilindro idraulico che, tramite PLC, apre il passaggio al mandrino principale il quale, a sua volta, trasla lungo l'asse X. In questo modo si ha accesso alla zona di carico-scarico della macchina utensile come si può osservare in figura 3.7.

Sulla lamiera verde è posizionata una lampada a LED per illuminare la zona di lavoro.

3.5 Gruppo asse X

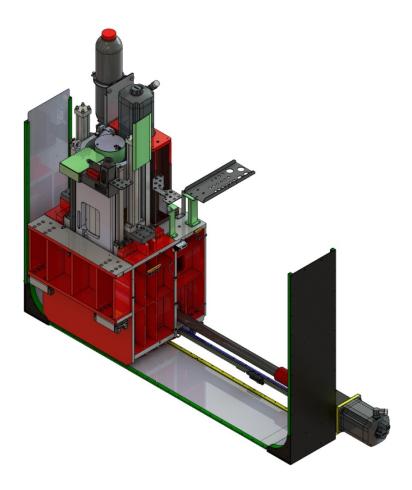


Figura 3.8: Gruppo asse X.

Il gruppo relativo all'asse X, osservabile in *figura 3.8*, è composto principalmente da tre gruppi: Testa, ripari e movimentazione lineare dell'asse.

La movimentazione lungo l'asse X è affidata ad un motore rotativo che, accoppiato ad una vite a ricircolo di sfere, produce il moto di traslazione. Per questa macchina si è utilizzato un motore SIEMENS 1FT7105-5AF71-1DG1 con una vite a ricircolo di sfere dimensionata sulla base della normativa DIN 69051 con le caratteristiche meccaniche riportate in *tabella 3.1*. Il dimensionamento della chiocciola è stato effettuato in funzione dei vincoli imposti dal catalogo del fornitore.

MOTORIZZAZIONE	ASSE X	SIEMENS 1FT7105-5AF71-1DG1		
Tipo madrevite		DIN 69051		
Senso elica		Destro		
Passo vite	p	20 mm		
Accelerazione max	a_{max}	5	$\mathrm{m/s^2}$	
Spinta nominale asse X	S_n	7	kN	
Spinta asse X S3 25%	S_n S3 25%	18,8 kN		
Velocità in rapido	v_r	40	m/min	
Diametro nominale	d_n	63	mm	
Carico dinamico	L_d	10860 daN		
Carico statico	L_s	26770 daN		
Corsa lavoro	c	1250	mm	
Velocità nominale	n	3000	rpm	
Coppia nominale	C_n	28	Nm	

Tabella 3.1: Dati relativi alla motorizzazione dell'asse X.

Al fine di monitorare la cinematica dell'asse X, è presente un encoder lineare EIDE-NHAIN LC 485 ML 1340-689681-22 che, fissato solidalmente al gruppo Testa, scorre sulla riga ottica e consente la lettura, la valutazione e il controllo dell'asse macchina.

Come si vedrà successivamente, il gruppo ripari è utile per proteggere la componentistica meccanica dalla polvere di truciolo che si libera nell'aria durante la lavorazione.

3.6 Gruppo testa

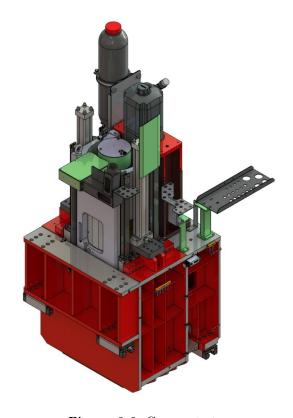


Figura 3.9: Gruppo testa.

Il gruppo Testa, rappresentato in *figura 3.9*, scorre lungo l'asse X della macchina ed è composto principalmente da un carro in ghisa che contiene al suo interno il mandrino per la presa del pezzo in lavorazione; questo è libero di scorrere lungo l'asse Z della macchina all'interno del carro. Il mandrino, inoltre, è sostenuto da un gruppo di bilanciamento idraulico che ha il compito di sorreggerne il peso e fare in modo che esso non venga scaricato unicamente sulla vite a ricircolo dell'asse Z.

Il gruppo testa è posizionato, tramite opportune guide lineari sul basamento della macchina e trasla, attraverso quattro PATTINI A RULLI SLH BOSCH REXROTH 1824-431-2X lungo l'asse X. In *figura 3.9* è anche possibile visualizzare delle staffe di supporto che hanno il compito di reggere i cablaggi idraulici e pneumatici che alimentano la testa e il mandrino principale.

Nella parte inferiore del carro è presente un foro passante realizzato per l'inserimento della vite a ricircolo dell'asse X e per il fissaggio della chiocciola sul gruppo testa.

3.7 Gruppo ripari asse X

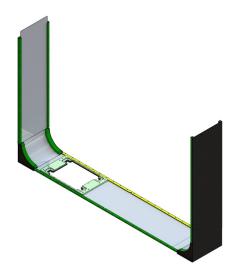


Figura 3.10: Ripari asse X con corsa -625mm.

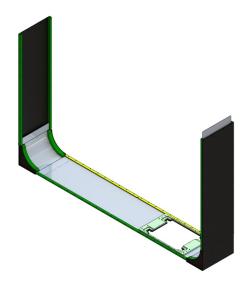


Figura 3.11: Ripari asse X con corsa +625mm.

Per proteggere la componentistica meccanica dai trucioli derivanti dalla lavorazione, è stato progettato un riparo scorrevole lungo l'asse X della macchina. Il riparo è composto da un supporto a C fissato sul basamento, all'interno del quale sono libere di scorrere (insieme al gruppo Testa) due lamiere flessibili. Le lamiere sono fissate sul tamponamento testa e si muovono lungo l'asse X insieme al mandrino principale in modo tale da impedire la fuoriuscita dei trucioli dalla zona superiore del basamento. In figura 3.10~e~3.11 sono riportate le due posizioni limite del riparo scorrevole con corsa rispettivamente di -625mm~e~+625mm. La corsa totale del riparo, di conseguenza, coincide con la corsa totale dell'asse X ed è pari a 1250mm

3.8 Gruppo asse Z

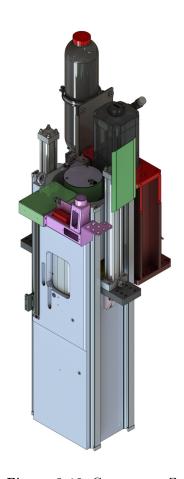


Figura 3.12: Gruppo asse Z.

Il gruppo che identifica l'asse Z è osservabile in *figura 3.12*. È composto dal mandrino principale che ha come compito quello di portare in rotazione il pezzo da lavorare. Il mandrino può scorrere su opportune guide lineari lungo l'asse Z della macchina e, essendo fissato all'interno del carro della Testa, si muove anche lungo l'asse X.

Il moto lungo l'asse Z è gestito da un motore rotatorio SIEMENS 1FT7 105-5AF71-1CH1 che, accoppiato ad una vite a ricircolo di sfere dimensionata secondo la normativa DIN 69051, le cui caratteristiche sono riportate in *tabella 3.2*, che genera un moto di traslazione lineare.

È presente anche un encoder lineare che scorre su di una riga ottica HEIDENHAIN LC485-ML0570 per l'identificazione della posizione lungo l'asse.

Il peso del gruppo mandrino è bilanciato da un gruppo idraulico alimentato da un serbatoio di pressurizzazione, in modo tale da non gravare unicamente sulla vite a ricircolo.

Il mandrino principale è composto da un corpo mandrino in ghisa all'interno del quale sono assemblati tutti gli elementi di movimentazione dell'asse C.

Il motore di rotazione dell'asse C PHASE TK 240-340-008 è inserito all'interno del mandrino ed è alimentato tramite una scatola elettrica fissata sulla facciata superiore

MOTORIZZAZIONE	ASSE Z	SIEMENS 1FT7105-5AF71-1CH1		
Tipo madrevite		DIN 69051		
Senso elica		Destro		
Passo vite	p	20 mm		
Accelerazione max	a_{max}	6	$\mathrm{m/s^2}$	
Spinta nominale asse X	S_n	7	kN	
Spinta asse X S3 25%	S_n S3 25%	18,8 kN		
Velocità in rapido	v_r	60	m/min	
Diametro nominale	d_n	50	mm	
Carico dinamico	L_d	7430 daN		
Carico statico	L_s	15120	daN	
Corsa lavoro	c	530	mm	
Velocità nominale	n	3000 rpm		
Coppia nominale	C_n	28	Nm	

Tabella 3.2: Dati relativi alla motorizzazione dell'asse Z.

del corpo mandrino. Il suo scopo è portare in rotazione un albero meccanico al quale è fissato l'autocentrante e la presa pezzo.

La scatola elettrica, posizionata nella parte superiore, raccoglie i cavi elettrici del motore e consente il collegamento dello stesso con la rete elettrica generale.

Le caratteristiche della motorizzazione relativa all'asse C sono indicate in tabella 3.3.

MOTORIZZAZIONE ASSE C			PHASE TK 240-340-008		
Velocità max	n_{max}	4000	rpm		
Coppia nominale	C_n	823	Nm		
Coppia in S6 40%	$C_n \ S6 \ 40\%$	1302	Nm		
Potenza nominale	P_n	47,5	kW		
Potenza nominale in S6 40%	$P_n \ S6 \ 40\%$	54	kW		
Velocità di ginocchio	n_n	556	rpm		

Tabella 3.3: Dati relativi alla motorizzazione dell'asse C.

3.9 Scelta mandrino principale

Come già accennato in precedenza, la scelta del mandrino principale è ricaduta su un 415 RAM. Le dimensioni del mandrino sono state determinate in funzione delle dimensioni del pezzo da lavorare. Mentre, la scelta di un mandrino RAM è stata guidata da considerazioni più ingegneristiche.

Di seguito sono riportate due figure per il confronto del mandrino standard con la versione evoluta RAM.

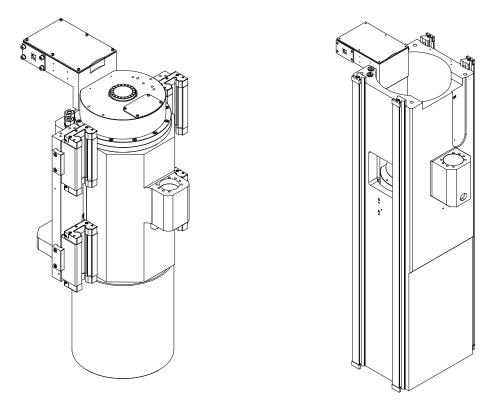


Figura 3.13: Confronto mandrino standard con evoluzione RAM.

Come si osserva dalla figura 3.13, la movimentazione lungo l'asse Z della macchina è differente nelle due tipologie di mandrini. Infatti, per quanto riguarda il mandrino standard (a sinistra), i quattro pattini sono fissati sul corpo mandrino e scorrono su due guide lineari vincolate al carro. Viceversa, nel mandrino RAM (a destra), i pattini sono fissati sul carro (non visibile in figura) e quattro guide sono posizionate sul corpo del mandrino; da qui ne deriva l'esigenza di una forma differente. Di conseguenza, in questo modo, il mandrino risulta essere vincolato differentemente, con un notevole aumento della rigidezza del sistema. Inoltre, è importante osservare che, durante la lavorazione lungo l'asse Z della macchina, il mandrino si muove secondo una traslazione verticale. A questo proposito, nella configurazione di sinistra, la distanza tra il punto di applicazione delle forze di taglio e il supporto (pattino) è costante per ogni coordinata Z; viceversa, nella configurazione di destra, è possibile ottenere una coordinata di taglio tale da avere un braccio delle forze minimo. In questo modo, a parità di forza, il momento applicato al sistema, che deve essere bilanciato dai supporti, è minimo.

In definitiva, quindi, la scelta è ricaduta su un mandrino RAM in quanto, vista la lavorazione di precisione richiesta, e visti gli elevati sforzi derivanti dalla lavorazione, si ritiene opportuno utilizzare una configurazione macchina più rigida per limitare gli errori di processo derivanti dalla componentistica meccanica della macchina.

3.10 Gruppo asse Y

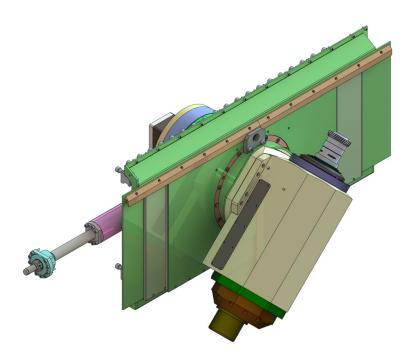


Figura 3.14: Gruppo asse Y.

Il gruppo relativo all'asse Y della macchina è composto principalmente dall'unità di Skiving, dalla motorizzazione dell'asse e dal gruppo ripari. Tutto il gruppo è fissato frontalmente, tramite una slitta al basamento ed ha una corsa di $\pm 240mm$. Anche in questo caso, come per gli altri assi macchina, si utilizza un motore rotativo associato ad una vite a ricircolo di sfere. La movimentazione dell'asse è gestista sempre da un encoder lineare HEIDENHAIN LC 485 ML 520 - 689681-10 in modo tale da monitorare la posizione in funzione del controllo CNC.

3.11 Gruppo unità di Skiving

Il gruppo relativo all'unita di *Skiving* è costituito da un mandrino e da una tavola rotante: il primo porta in rotazione l'utensile secondo le velocità imposte dal controllo, mentre il secondo impone l'angolo Σ all'utensile in modo tale da ottenere la lavorazione meccanica.

La tavola rotante è fissata alla slitta dell'asse Y ed è dotata, come vedremo in seguito, di un meccanismo idraulico per il bloccaggio-sbloccaggio della rotazione. In fase di sbloccaggio è possibile dare, tramite un motore torque, una rotazione alla flangia

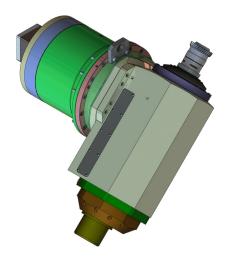


Figura 3.15: Gruppo unità di Skiving.

frontale sulla quale è fissato il mandrino utensile. In questo modo si orienterà l'utensile, con un angolo Σ per ottenere la lavorazione desiderata.

Per la descrizione più dettagliata di questo gruppo si rimanda al paragrafo 3.15.

3.12 Gruppo ripari asse Y

Anche in questo caso, la progettazione di questo gruppo è stata affrontata più nel dettaglio nel capitolo 3.15. Il gruppo in figura 3.16 e 3.17 ha come obiettivo principale quello di proteggere la zona di movimentazione dell'asse Y dalla polvere di truciolo prodotta dalla lavorazione.

È composto da tre blocchi di lamiere che, con un movimento telescopico, si adeguano alla posizione dell'asse dell'unità di *Skiving*. In definitiva, i ripari sono fissati alla slitta dell'asse Y (in arancione) che è movimentata da una vite a ricircolo.

In figura 3.16 e 3.17 è possibile osservare due configurazioni del gruppo ripari.

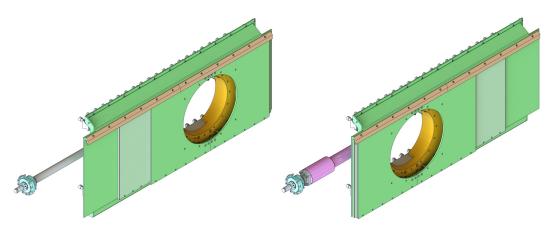


Figura 3.16: Ripari asse Y in configurazione -240mm.

Figura 3.17: Ripari asse Y in configurazione +240mm.

3.13 Gruppo ripari

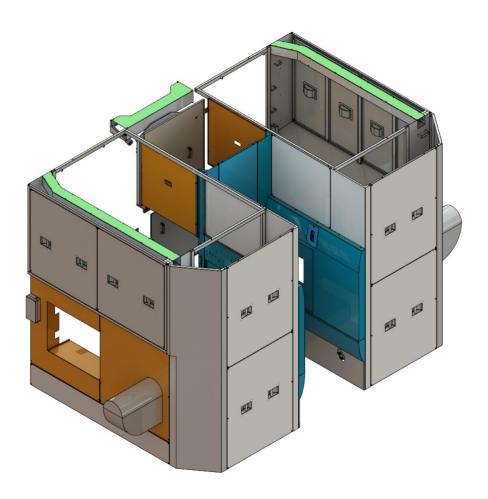


Figura 3.18: Schema ripari macchina.

Il gruppo relativo ai ripari della macchina è osservabile in *figura 3.18* ed ha come obiettivo principale quello di proteggere l'operatore e le persone che si muovono intorno alla macchina. La zona di lavoro non è quindi facilmente accessibile.

Il gruppo è classificato in due blocchi: i ripari fronte operatore e i ripari laterali.

I ripari fronte operatore, in blu, sono composti da un pannello frontale su cui è posizionata l'interfaccia di controllo CNC e da due porte scorrevoli che permettono l'accesso alla zona di lavorazione.

I ripari laterali, invece, proteggono le restanti parti della macchina. Come si osserva in figura, sono costituiti da pannelli rimovibili in caso di guasti o manutenzione della macchina utensile. Il trasportatore attraversa tutta la macchina e, dal momento che entra in contatto diretto con l'operatore, deve necessariamente scorrere fuori dai ripari; pertanto è presente un'apertura rettangolare sul fianco della macchina.

Importante osservare che tutte le zone accessibili dei ripari, porte frontali e posteriori, sono messe in sicurezza da opportuni blocchi porta elettromeccanici che, con mac-

china in funzione, ne impediscono l'apertura. Infatti, l'apertura dei ripari o l'accesso alla zona di lavorazione sono permessi solo con la macchina arrestata o in emergenza.

3.14 Grupppo armadi elettrici e centralina idraulica

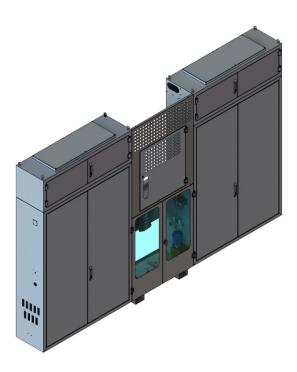


Figura 3.19: Gruppo armadi elettrici e centralina idraulica.

Gli armadi elettrici e la centralina idraulica sono posizionati sul retro della macchina e sono fissati anch'essi al basamento. In generale, si prevede un armadio elettrico per ogni singola macchina utensile. In questo caso, trattandosi di una macchina tandem con doppia unità di lavorazione, sono necessari due. La centralina idraulica è unica ed è stata dimensionata in modo tale da soddisfare il fabbisogno di entrambe le unità di lavorazione. Sul fondo degli armadi elettrici sono posizionati dei condizionatori che hanno il compito di refrigerarli per mantenere la componentistica elettrica a temperature non troppo elevate.

3.15 Modellazione 3D

Per quanto riguarda la modellazione 3D, ci si è concentranti in particolare sull'unità di *Skiving* in quanto tutti i restanti componenti utilizzati per la composizione della macchina corrispondono agli standard Famar. In particolare, si è partiti dall'unità per *Skiving* progettata nella macchina precedente, alla quale sono state apportate alcune modifiche progettuali in modo tale da migliorare le prestazioni della macchina e aumentarne la potenza di taglio per la realizzazione di dentature con modulo maggiore.

Conoscendo le caratteristiche del pezzo da realizzare, è stato semplice individuare il mandrino principale idoneo alle lavorazioni richieste. Infatti, ogni mandrino Famar è selezionato in funzione agli ingombri e alla massa del pezzo da lavorare. In generale si ha infatti che:

Modelli TANDEM	200	215	260	315	400	415
ϕ lavorabile (mm)	150	150	250	250	400	400
ϕ autocentrante (mm)	170	170	260	260	400	400
Naso mandrino ISO 702-1	5	6	6	8	8	11
Velocità di rotazione (rpm)	6500	4800	5300	5000	4000	4000
Potenza max (kW)	30	30	30	48	61,7	54
Coppia max (Nm)	198	198	196	384	724	1302

Tabella 3.4: Dati di identificazione mandrini Famar.

In base alla richiesta del cliente è quindi stato selezionato un mandrino 415 RAM le cui caratteristiche sono già state affrontate precedentemente.

Per poter semplificare il processo di sincronizzazione degli assi di rotazione, dell'utensile e del pezzo, si è pensato di utilizzare, per quanto riguarda l'asse V, lo stesso motore selezionato per l'asse C. In questo modo, il processo di sincronizzazione delle due velocità di rotazione risulta essere più preciso e le caratteristiche dinamiche nel tempo dei due motori risultano identiche. Sulla base di questa scelta, quindi, è stata necessaria una modellazione dell'unità di *Skiving* che fosse adeguata alle scelte progettuali effettuate in fase di impostazione della macchina. Inoltre, per la movimentazione dell'unità di *Skiving* lungo l'asse Y, è stata sviluppata anche una slitta lineare che verrà esaminata nel dettaglio successivamente.

L'unità di *Skiving*, come visto in precedenza è composta da una tavola rotante che, ruotando intorno all'asse B, impone l'angolo di inclinazione del mandrino utensile. Il mandrino utensile, intorno all'asse V, impone il moto di rotazione all'utensile per *Skiving*.

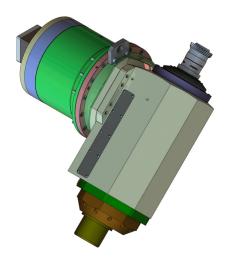
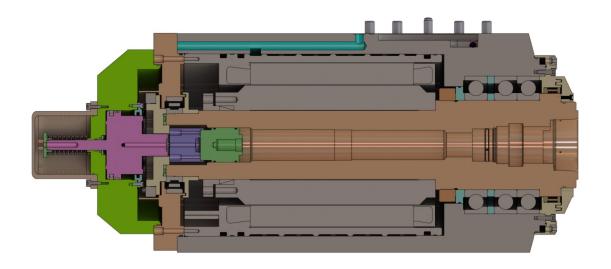


Figura 3.20: Gruppo unità di Skiving.

La modellazione dei due elementi è stata effettuata in maniera distinta, ma ponendo una particolare attenzione alla flangia frontale della tavola e al corpo del mandrino utensile in modo tale da potersi interfacciare correttamente.

3.16 Mandrino utensile Skiving



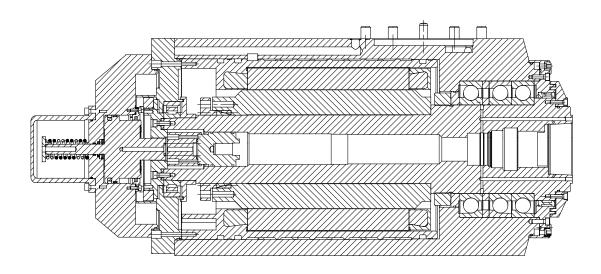


Figura 3.21: Vista in sezione mandrino utensile.

Il mandrino utensile è rappresentato nella vista in sezione in figura 3.21. È composto da un albero meccanico cavo supportato da una serie di cuscinetti e, messo in rotazione da un motore elettrico, impone il moto di taglio all'utensile per Skiving. Come si può osservare in figura 3.21, l'albero meccanico e il motore elettrico sono contenuti in un corpo mandrino in ghisa e sono protetti inferiormente da un coperchio.

Il motore selezionato per questa unità, come già accennato in precedenza, coincide con quello scelto per il mandrino principale ed è del tipo PHASE TK 240-240-04 le cui caratteristiche sono riportate in tabella 3.5. Il motore porta in rotazione l'albero sul quale è posizionato l'utensile per Skiving. Come si osserva in figura, il rotore magnetico viene fissato con interferenza sull'albero mentre lo statore è posizionato con gioco all'interno del corpo mandrino ed è fissato inferiormente su una flangia forata. Tra lo statore e il corpo mandrino sono presenti dei canali all'interno dei quali scorre un liquido refrigerante per il raffreddamento del motore. Il posizionamento del rotore viene effettuato a caldo preriscaldando opportunamente l'unità rotorica. Si utilizza poi un calettatore per correggere eventuali errori di centraggio dell'albero meccanico derivanti dal calettamento con interferenza.

MOTORIZZAZIONE ASSE V			PHASE TK 240-240-004		
Velocità max	n_{max}	4500	rpm		
Coppia nominale	C_n	143	Nm		
Coppia in S6 40%	$C_n \ S6 \ 40\%$	202	Nm		
Potenza nominale	P_n	35,3	kW		
Potenza nominale in S6 40%	$P_n \ S6 \ 40\%$	42	kW		
Velocità di ginocchio	n_n	2438	rpm		

Tabella 3.5: Dati relativi alla motorizzazione dell'asse V.

I cuscinetti sono stati selezionati in base all'applicazione dell'elemento meccanico. Infatti, sono stati selezionati, nella zona più vicina all'utensile, una serie di cuscinetti obliqui a sfere con disposizione ad "O" della classe FAG B7026 E-T-P4S-TUM in modo tale da reggere i principali sforzi radiali e assiali derivanti dalla lavorazione. Le forze assiali di spinta generate dalla lavorazione di taglio sono supportate principalmente da una coppia di cuscinetti montati in tandem che, vista la disposizione, è in grado di reggere le azioni dirette verso il basso. Il pacco di cuscinetti superiore è chiuso da una ghiera in modo tale da gestire il precarico assiale sulle sfere. Nella parte inferiore, l'albero è sorretto da un cuscinetto a rulli puramente radiale della serie FAG N1018 KM1-SP. Data la tipologia di cuscinetto, si osservi che si tratta di un cuscinetto con rullo non bloccato sulla pista esterna in modo tale da compensare eventuali deformazioni termiche in fase di lavorazione. In questo caso il cuscinetto, a pista interna conica, viene calettato con forzamento su di un distanziale calibrato, in modo tale da generare il corretto precarico sulla sede conica dell'albero.

L'anello esterno del cuscinetto, come si osserva in figura 3.22, viene posizionato opportunamente mediante il serraggio delle viti relative alla flangia di chiusura inferiore mentre, per quanto riguarda l'anello interno, questo è fissato da una flangia sulla quale si posiziona la ruota fonica dell'encoder HEIDENHAIN ERM 2480-D-120-D-150-88 per il monitoraggio della posizione angolare del mandrino.

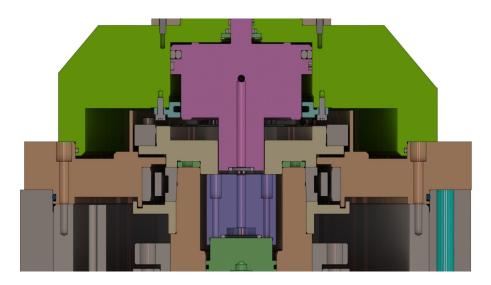


Figura 3.22: Dettaglio cuscinetto a rulli nel mandrino utensile.

Poichè la lavorazione viene effettuata con l'utensile rivolto verso l'alto, è stato effettuato lo studio di un sistema per evitare l'inserimento della polvere di truciolo all'interno del corpo mandrino utensile. Infatti, eventuale truciolo all'interno degli elementi sottoposti ad uno scorrimento di precisione, potrebbe compromettere il corretto funzionamento di tutto il mandrino. Come si osserva in figura 3.23, un distributore di bronzo è posizionato tra flangia e albero. In particolare, è stato pensato un accoppiamento di interferenza con la flangia e con gioco nei confronti dell'albero che deve essere libero di ruotare. Il distributore è dotato di una serie di piccoli fori radiali che consentono il passaggio di un flusso pressurizzato d'aria il quale, attraversando il corpo mandrino e la flangia, si mette in comunicazione con il distributore stesso. A questo punto, il flusso d'aria è costretto ad attraversare i fori radiali e, essendo presente una luce tra albero e distributore, a fuoriuscire dalla parte superiore del mandrino attraverso il labirinto generato dalle due flange di chiusura. È stato opportuno modellare un labirinto come in figura 3.23 in quanto, a causa della configurazione di lavorazione, il truciolo è spinto dalla gravità a depositarsi sulla flangia superiore del mandrino utensile.

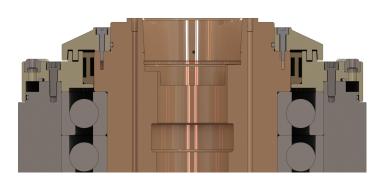


Figura 3.23: Dettaglio costruttivo distributore aria.



Figura 3.24: Distributore in bronzo.

L'utensile adoperato è caratterizzato da un attacco unificato HSK100 che impone la modellazione dell'albero. A questo proposito, seguendo la normativa DIN 69893, è stato dimensionato e modellato l'albero meccanico come riportato in figura 3.25.

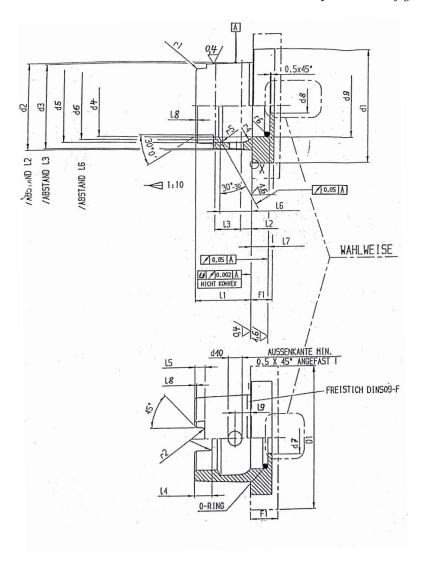


Figura 3.25: Modellazione attacco HSK da DIN 69893.

In definitiva, esistono due differenti tipologie di attacchi unificati che si differenziano dalla forma del cono di accoppiamento. In un caso, parlando di attacco SK, il portautensile è un corpo pieno a forma tronco-conica; viceversa, nell'attacco HSK, il portautensile mantiene sempre la forma tronco-conica, ma risulta essere cavo. In figura 3.26 e 3.27 è possibile osservare i due attacchi unificati.

Le differenze tra i due sistemi sono sostanziali:

• ATTACCO SK → la forza centrifuga generata dalla rotazione ad alta velocità dei due elementi genera una deformazione circonferenziale solo sul corpo cavo del mandrino. A questo proposito, non producendo lo stesso effetto sul portautensile, si ha una riduzione della superficie di contatto con conseguente diminuzione delle forze di trasmissione. Si ha, quindi, una perdita di contatto che viene subito

recuperata dalla molla in trazione del sistema di bloccaggio, con conseguente leggero spostamento del tagliente. La perdita di contatto genera anche delle forze variabili nel tempo che potrebbero essere causa di leggere vibrazioni;

• ATTACCO HSK → in questo caso la forza centrifuga genera lo stesso effetto di deformazione sia sul portautensile che sul mandrino. In questo modo, quindi, non si ha una riduzione della superficie di contatto e di conseguenza non si produce nessun errore di posizionamento dell'utensile. La forza radiale di trasmissione, in questo sistema, è garantita dalla pinza di afferraggio dell'utensile. Inoltre, l'attacco HSK, ha lunghezze minori rispetto a quelle dell'attacco SK, risultando notevolmente più rigido.

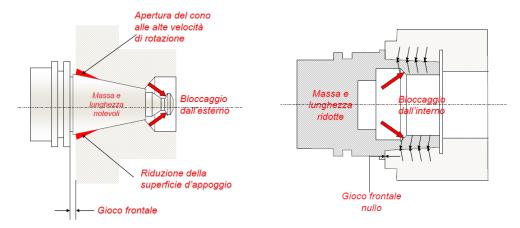


Figura 3.26: Rappresentazione portautensile SK.

Figura 3.27: Rappresentazione portautensile HSK.

In definitiva, l'attacco HSK, a causa della sua geometria particolare, risulta essere molto più rigido dell'attacco SK con vantaggi sulla lavorazione meccanica e sul processo di taglio.

Il sistema di bloccaggio-sbloccaggio dell'utensile è rappresentato in figura 3.28. Si tratta di un elemento meccanico che ha la funzione di afferrare l'attacco HSK100 dell'utensile in modo tale da impedirne il movimento in fase di lavorazione. Come si osserva in figura, si tratta di un elemento commerciale acquistato e posizionato all'interno dell'albero cavo. La presa dell'utensile è garantita da 6 petali che hanno il funzionamento di una pinza per interni. Infatti, essi sono incernierati e posizionati su un alberino conico che, scorrendo assialmente, produce un'apertura o una chiusura degli stessi. In figura 3.28, è possibile osservare la doppia configurazione di funzionamento: in alto, con alberino in avanti, i petali sono richiusi su di esso e liberano la sede dell'utensile; in basso, con alberino retratto, i petali si allargano e si posizionano diametralmente sulla sede dell'HSK. In generale, in posizione di riposo, sono presenti delle molle che tendono a spostare l'alberino interno nella posizione retratta e quindi tendono a tenere bloccato l'utensile. Questo è importante soprattutto in casi di emergenza o arresto della macchina in modo tale da impedire la rimozione involontaria dell'utensile.

Per lo sbloccaggio dell'utensile è quindi necessario muovere assialmente l'alberino conico che è vincolato dalla forza elastica delle molle. Per fare ciò, è stato progettato, nella parte inferiore del mandrino utensile, un pistone che, se azionato dal fluido in pressione, esercita una forza tale da vincere il precarico delle molle e quindi sposta assialmente l'elemento conico, con conseguente chiusura dei petali e rilascio dell'utensile.

La necessità di utilizzare un sistema di questo tipo ha vincolato la modellazione dell'albero in modo tale da generare l'alloggiamento adatto a questo sistema di bloccaggio utensile.

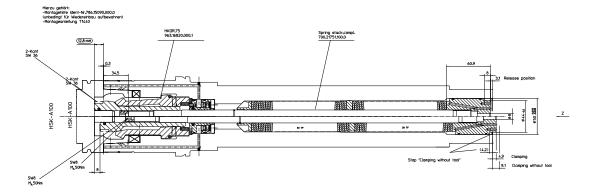


Figura 3.28: Sistema di bloccaggio-sbloccaggio utensile adottato.

È stato pensato l'utilizzo di un condotto, all'interno dell'albero meccanico, in modo tale da portare un flusso pressurizzato d'aria nella zona di interfaccia tra utensile e albero. In questo modo la sporcizia di truciolo, in fase di rimozione dell'utensile, viene spazzata via proteggendo il meccanismo interno all'albero.

La refrigerazione della zona di lavoro viene effettuata attraverso dei condotti che attraversano il mandrino e sono visibili in *figura 3.29*.

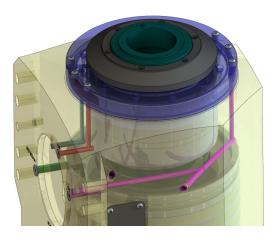


Figura 3.29: Rappresentazione condotti per fluido refrigerante.

In questo modo il fluido refrigerante giunge in due camere generate tra le due flange e fuoriesce tramite dei raccordi idraulici. È possibile, così, orientare opportunamente il flusso verso la zona di lavorazione.

3.17 Tavola rotante Skiving

La tavola rotante è rappresentata in figura 3.30 ed è costituita da un corpo centrale il quale, movimentato da un motore elettrico, trasferisce il moto alla flangia frontale per il posizionamento del mandrino utensile. Infatti, il corpo del mandrino utensile si interfaccia con la tavola rotante attraverso la flangia conica visibile in figura 3.30. Il moto, anche in questo caso è imposto da un motore elettrico e il posizionamento angolare è garantito nel tempo da un opportuno sistema di bloccaggio della rotazione. Il tutto è protetto da una carcassa esterna e da un coperchio frontale.

Il motore utilizzato è un SIEMENS 1FW6-130-OPB07-1JC2 e si tratta di un piccolo torque motor che ha solo il compito di imporre l'angolo d'inclinazione al mandrino utensile. Anche in questo caso, il rotore è fissato sull'elemento rotante del meccanismo e lo statore è posizionato esternamente ad esso. Come tutti i motori utilizzati da Famar, è possibile osservare i canali di refrigerazione ricavati tra statore e carcassa che lo contiene. In tabella 3.6 sono riportati i dati caratteristici della motorizzazione.

MOTORIZZAZIONE ASSE B			SIEMENS 1FW6130-OPB07-1JC2		
Velocità max	n_{max}	320	rpm		
Velocità di ginocchio	n_n	230	rpm		
Coppia nominale	C_n	281	Nm		
Coppia max	C_{max}	615	Nm		

Tabella 3.6: Dati relativi alla motorizzazione dell'asse B.

Nella parte sinistra della tavola rotante è possibile osservare il cuscinetto radiale INA K 175x183x32, per il supporto dell'elemento rotante, opportunamente calibrato e tarato tramite il distanziale posto sotto di esso e che va in battuta su uno spallamento inferiore. Un cuscinetto analogo è posizionato sul lato destro della tavola rotante ed ha anch'esso il compito di supportare l'elemento in rotazione. Quest'ultimo è posizionato con un leggero gioco sulla pista interna in quanto si desidera che l'asse di rotazione del sistema venga orientato dalla flangia conica posizionata sulla faccia frontale.

La ruota fonica è fissata all'elemento rotante e il relativo lettore è posizionato sulla flangia di chiusura laterale in modo tale da monitorare, tramite il controllore, il posizionamento angolare dell'asse.

La tavola rotante deve essere in grado di imporre al sistema una rotazione di $\pm 45^{\circ}$ che viene stabilita dal controllo numerico. A questo punto, l'angolo di inclinazione dell'utensile deve essere mantenuto costante lungo tutta la lavorazione ed è quindi stato necessario sviluppare un sistema di bloccaggio per vincolare l'asse B della macchina al posizionamento desiderato.

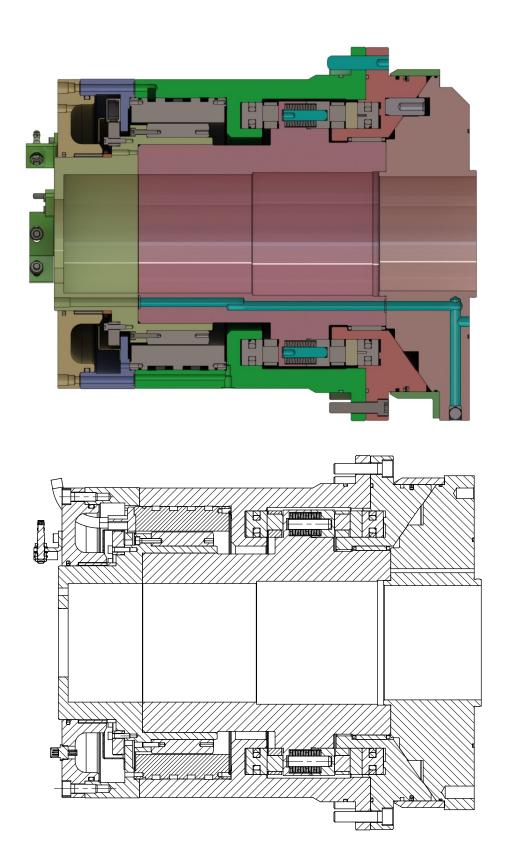


Figura 3.30: Vista in sezione tavola rotante.

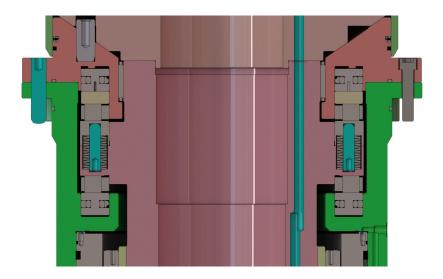


Figura 3.31: Dettaglio sistema di bloccaggio rotazione.

Il sistema di bloccaggio pensato è rappresentato in figura 3.31. È importante osservare che la flangia conica d'interfaccia con il mandrino utensile è solidale all'elemento rotante in rosa, tramite un fissaggio a vite. Come si osserva in figura, il sistema di bloccaggio è composto da alcune molle elastiche, due cuscinetti assiali e due elementi meccanici che svolgono il compito di pistoni idraulici, movimentati da un fluido in pressione. In fase di sbloccaggio, per poter effettuare la rotazione, è necessario inviare dell'olio in pressione sul pistone inferiore in modo tale da generare sulla sua superficie una forza diretta verso l'alto. In questo modo si vince il precarico delle molle e la flangia conica viene distanziata rispetto a quella fissa. È quindi possibile, a questo punto, imporre una rotazione all'asse. I due cuscinetti assiali hanno il compito di consentire la rotazione relativa tra gli elementi evitando lo strisciamento tra il corpo centrale rotante e quello fisso frontale. Nel caso in cui, a riposo, la forza delle molle non sia tale da assicurare il bloccaggio della rotazione, è possibile aumentare notevolmente la forza di bloccaggio inviando dell'olio in pressione sul pistone superiore.

3.18 Gruppo unità di Skiving

Per la modellazione dei singoli mandrini che compongono l'unità di *Skiving*, è stato importante porre una particolare attenzione sugli elementi di accoppiamento del sistema. Infatti, la flangia conica della tavola rotante è stata modellata in modo tale da potersi interfacciare con il corpo del mandrino utensile. Di conseguenza, come si vede in *figura 3.32*, i due mandrini sono vincolati tra di loro con un fissaggio a vite. In questo modo è possibile garantire, tramite la flangia conica, la rotazione angolare del mandrino utensile intorno all'asse B.

Come si osserva in figura 3.1, solo la parte posteriore della tavola rotante è accessibile dall'esterno della zona di lavorazione ed è quindi l'unica zona dell'unità di Skiving che può contenere tutti gli attacchi elettrici, idraulici e pneumatici per il funzionamento della stessa. È stato quindi necessario effettuare un'analisi approfondita del sistema per lo sviluppo e la modellazione di una serie di condotti interni per il trasferimento

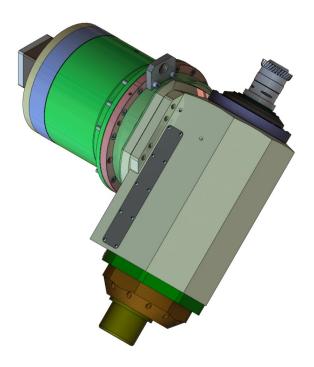


Figura 3.32: Gruppo unità di Skiving.

dell'energia elettrica e dei fluidi in pressione fino al mandrino utensile. In funzione degli ingombri degli elementi, e in funzione degli spessori minimi di sicurezza da mantenere, sono stati progettati una serie di condotti interni visibili in figura 3.33.

Come si può osservare, tutti i fori sono realizzati dall'esterno e quindi, in alcuni casi, è stato necessario prevedere dei tappi ad espansione HALDER EH22880 per impedire il collegamento dei condotti principali con l'esterno. In particolare, si osserva che:

- CONDOTTO BLU → necessario per il trasporto dell'olio in pressione fino alla parte inferiore del mandrino utensile dove è posizionato il pistone idraulico di sbloccaggio dell'utensile;
- CONDOTTO CIANO → necessario per il trasporto dell'acqua nei condotti di raffreddamento del motore all'interno del mandrino utensile;
- CONDOTTO VERDE → è analogo a quello ciano ma ha il compito di raccogliere l'acqua in uscita dai condotti di raffreddamento e convogliarla verso l'esterno. In questo modo si ha sempre un flusso continuo di fluido refrigerante;
- CONDOTTO VIOLA E ROSSO → necessari per il trasporto del refrigerante di lavorazione che, una volta entrato nella camera realizzata sulla parte superiore del mandrino utensile, fuoriesce attraverso dei condotti flessibili per ottenere dei getti diretti verso il punto di lavorazione.
- ullet CONDOTTO AZZURRO \to necessario per il trasporto dell'aria in pressione sulla parte superiore del mandrino utensile, in modo tale da alimentare il distributore

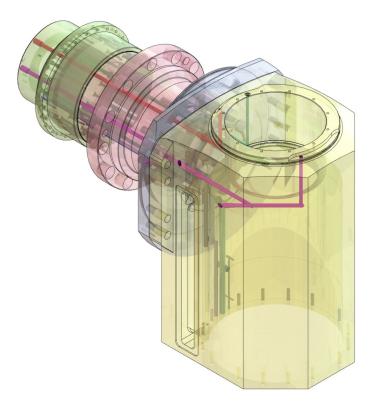


Figura 3.33: Vista in trasparenza condotti interni.

bronzato visto in precedenza al fine di impedire l'ingresso di truciolo all'interno del mandrino.

Come si può osservare, i fori sono stati realizzati, per quanto riguarda il mandrino utensile, sul corpo esterno in ghisa, mentre, per quanto riguarda la tavola rotante, su tutti i componenti che subiscono il moto di rotazione. È importante fare ciò, per garantire la comunicazione dei condotti in ogni fase di movimentazione dell'asse macchina; anche durante la rotazione dell'asse B.

Il motore elettrico utilizzato nel mandrino utensile è dotato degli attacchi per i cavi elettrici nella zona inferiore dello stesso. È stato quindi necessario realizzare uno scasso laterale sul corpo del mandrino in modo tale da riportare i cavi elettrici verso l'alto per poi collegarli all'esterno della zona di lavorazione attraversando l'albero cavo della tavola rotante. Una rappresentazione più schematica è visibili in figura 3.34.

I cavi sono protetti da una guarnizione e da un coperchio avvitato direttamente sul corpo mandrino.

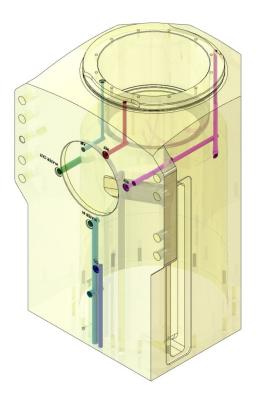


Figura 3.34: Dettaglio in trasparenza per fuoriuscita cavi motore.

3.19 Gruppo slitta asse Y

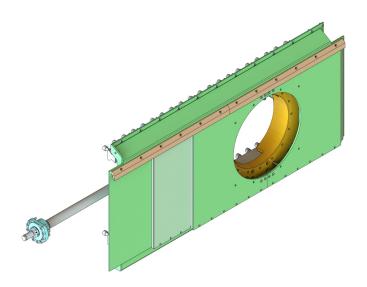


Figura 3.35: Gruppo slitta asse Y.

La slitta relativa all'asse Y ha il compito di muovere l'unità di *Skiving* lungo l'asse Y della macchina in modo tale da posizionarsi correttamente rispetto al pezzo in lavorazione che è libero solo lungo l'asse X e Z. È composta da una vite a ricircolo di sfere per la conversione del moto da rotatorio a traslatorio, da una slitta e da una serie di ripari scorrevoli che, con un meccanismo telescopico, si adeguano alla posizione

richiesta dall'unita di *Skiving*. La slitta è fissata, tramite dei pattini, a delle guide lineari vincolate sul basamento della macchina.

La vite a ricircolo di sfere ha una corsa di $\pm 240mm$ ed è azionata da un motore SIEMENS 1FT7082-5AC71-1CG1. Come si osserva in figura, la chiocciola è fissata, tramite un manicotto, alla slitta in modo da imporre il moto alle due teste mandrino.

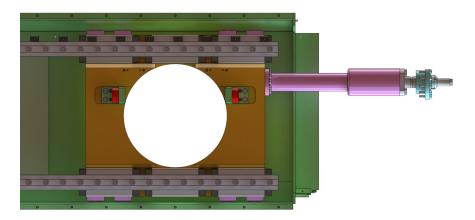


Figura 3.36: Dettaglio costruttivo slitta asse Y.

Il movimento alternato della slitta, è vincolato da due finecorsa meccanici che, in caso di errore di posizionamento, impattano sul basamento e impediscono fisicamente la traslazione della slitta. Come si può osservare in figura, la slitta è un elemento simmetrico rispetto al piano verticale così da poter prevedere un corretto montaggio in una configurazione tandem sia su macchina destra che su macchina sinistra.

MOTORIZZAZIONE ASSE Y		SIEMENS 1FT7082-5AC71-1CG1		
Tipo madrevite		DIN 69051		
Senso elica		Destro		
Passo vite	p	20 mm		
Accelerazione max	a_{max}	6	$\mathrm{m/s^2}$	
Spinta nominale asse X	S_n	5.7	kN	
Spinta asse X S3 25%	S_n $S3$ 25%	10 kN		
Velocità in rapido	v_r	20 m/min		
Diametro nominale	d_n	40 mm		
Carico dinamico	L_d	3460 daN		
Carico statico	L_s	5930 daN		
Corsa lavoro	c	±240	mm	
Velocità nominale	n	2000 rpm		
Coppia nominale	C_n	11.4	Nm	

Tabella 3.7: Dati relativi alla motorizzazione dell'asse Y.

Lo scorrimento della slitta lungo l'asse Y avviene, tramite dei PATTINI A RULLI BOSH REXROTH SLH GR.55 R1824-531-2X, su guide commerciali unificate simili a quelle presenti sugli altri assi macchina. È importante la fase di montaggio di questi elementi che definiscono l'orientamento della slitta, e di conseguenza dell'utensile, con conseguenze geometriche sulle lavorazioni. Infatti, il fissaggio della slitta sul basamento è guidato da una serie di distanziali neri che, possedendo una faccia inclinata, tendono

a spingere la guida contro una superficie rettificata del basamento. In questo modo il posizionamento della guida su cui scorre la slitta è strettamente affidato alla precisione della lavorazione effettuata sul basamento.

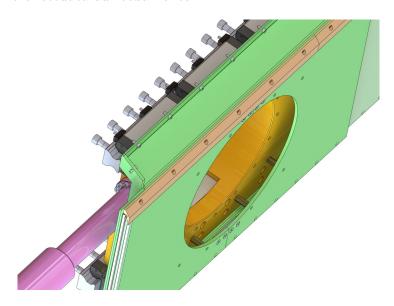


Figura 3.37: Dettaglio costruttivo slitta asse Y.

I pattini sono posizionati con un ragionamento analogo su una superficie di precisione della slitta e possiedono un profilo equivalente a quello della guida su cui scorrono. La coppia di pattini centrali non ha funzione di posizionamento e orientazione della slitta, ma ha il compito di supportare e irrigidire l'intero sistema. Per quanto riguarda la parte inferiore della slitta, il posizionamento avviene di conseguenza, una volta effettuato quello superiore.

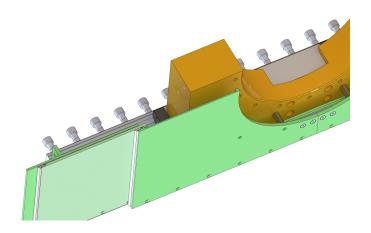
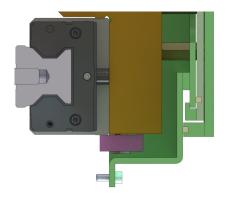


Figura 3.38: Dettaglio ripari telescopici asse Y.

Il moto di traslazione lungo l'asse Y affidato alla slitta deve trasferirsi anche ai ripari in modo tale da seguire la corsa impostata e quindi proteggere le zone esterne dalla polvere di truciolo. A questo proposito, il riparo più lontano dalla slitta è solidale, tramite dei tasselli, al gruppo movimentato dalla vite a ricircolo. Di conseguenza,

volendo realizzare un meccanismo telescopico sono stati realizzati dei risalti sui ripari intermedi.

Così facendo il riparo più esterno, movimentato dalla slitta, spinge o trascina il riparo intermedio nel verso relativo al suo movimento. Per ottimizzare lo scorrimento tra le superfici dei ripari sono stati introdotti dei coltelli raschiaolio in modo tale da garantire la tenuta tra le superfici a contatto. Il riparo più esterno è fisso alla struttura della macchina ed è l'unico a non essere movimentato.



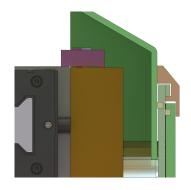


Figura 3.39: Dettaglio feltri inferiori ripari asse Y.

Figura 3.40: Dettaglio feltri superiori ripari asse Y.

Nella parte superiore e inferiore di ogni pannello del riparo, sono state realizzate delle cave in modo tale da inserirci un feltro con lo scopo di aumentare notevolmente le capacità di tenuta del meccanismo.

Capitolo 4

Controllo numerico

In questo capitolo verrà trattato lo sviluppo di un programma CNC per la lavorazione di dentature tramite *Skiving*, in riferimento alla progettazione meccanica del *capitolo* 3. Per una problematica relativa alle tempistiche aziendali, l'algoritmo di controllo è stato sviluppato su una macchina utensile differente ma analoga a quella descritta in precedenza.

Per le esigenze dei clienti, le due macchine sono differenti in alcuni aspetti costruttivi, ma sono in grado di lavorare con lo stesso programma di gestione assi. Sono quindi stati affrontati tutti i principali aspetti della lavorazione per *Skiving* in modo tale da poter sviluppare un unico codice di controllo versatile per diverse configurazioni di macchina.

In particolare, la macchina su cui è stato provato e testato il programma di lavorazione è osservabile in *figura 4.1*.

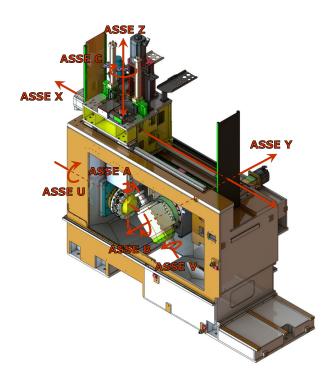


Figura 4.1: Rappresentazione assi macchina.

Anche in questo caso, come nel *capitolo 3*, si tratta di una macchina TANDEM quindi con configurazione speculare degli elementi.

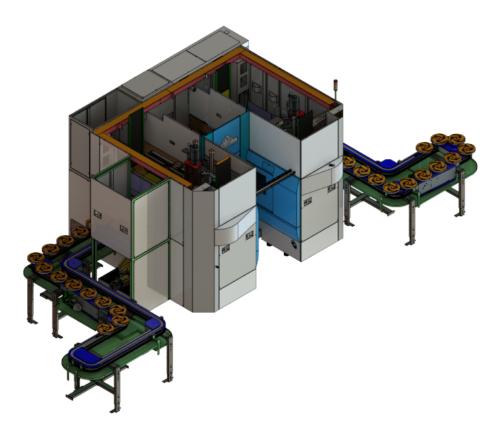


Figura 4.2: Schema macchina complessivo

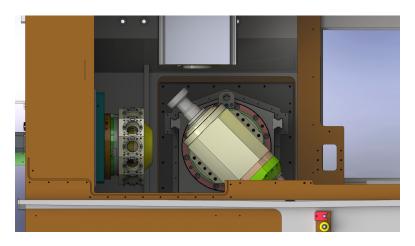


Figura 4.3: Rappresentazione dettagliata macchina Skiving.

Come si osserva, la macchina risulta essere molto simile a quella del *capitolo 3*, con una differente disposizione di alcuni assi. Inoltre, la struttura della macchina utensile è dotata, oltre che di un'unità per *Skiving*, anche di una torretta standard Famar per le più semplici lavorazioni di tornitura. Infatti, in questo caso, è stata richiesta dal cliente

una prima fase di lavorazione di tornitura e poi, successivamente, la realizzazione della dentatura tramite *Skiving*. È stato quindi necessario posizionare l'asse di *Skiving* sul fianco laterale del basamento in modo tale da lasciare libero lo spazio necessario per le altre lavorazioni.

L'asse Y della macchina, che nel capitolo 3 corrispondeva ad una traslazione laterale dell'utensile, in questo caso corrisponde ad una traslazione longitudinale. Il posizionamento dell'unità di Skiving è completato tramite la rotazione discreta di un angolo intorno all'asse B. L'asse V è l'asse intorno al quale si porta in rotazione l'utensile per Skiving. Come tutte le macchine Famar, il mandrino principale che porta il pezzo in lavorazione si muove lungo un asse verticale Z e ruota intorno all'asse C. Lungo l'asse X si muove tutto il gruppo testa per il posizionamento del pezzo relativamente alla torretta utensili. La torretta utensili, dotata di 12 slot per la disposizione dei differenti utensili, è dotata di un asse U di rotazione per modificare l'utensile in lavorazione e di un asse A nel caso di utensili motorizzati.

Si osserva inoltre che, in questo caso, il posizionamento del pezzo in lavorazione può avvenire solo lungo l'asse X e Z della macchina. Data la configurazione dell'asse utensile, per quanto riguarda la parte di *Skiving*, è poi necessario muovere l'asse Y per il posizionamento radiale dell'utensile sul pezzo.

In particolare, la progettazione di una macchina utensile, nasce dall'esigenza del cliente di effettuare delle lavorazioni meccaniche su dei pezzi grezzi. Si ha quindi il bisogno di conoscere dettagliatamente il componente grezzo, sul quale effettuare la lavorazione, e il componente finito desiderato.

4.1 Pezzo da lavorare

I disegni relativi al pezzo da realizzare sono stati forniti dal cliente unitamente a quelli caratteristici del pezzo grezzo di partenza e alle caratteristiche specifiche della dentatura. Sulla base di ciò, è stato studiato un processo di lavorazione con lo scopo di progettare un algoritmo di controllo e movimentazione degli assi durante le lavorazioni. I disegni forniti dal cliente sono stati utilizzati per la realizzazione di un modello 3D con una maggior semplicità di visualizzazione.



Figura 4.4: Modello grezzo e finito del pezzo in lavorazione.

A sinistra è possibile visualizzare il modello del pezzo grezzo di partenza; sulla destra invece è riportato il pezzo finito dopo aver subito una serie di lavorazioni di tornitura, foratura e dentatura.

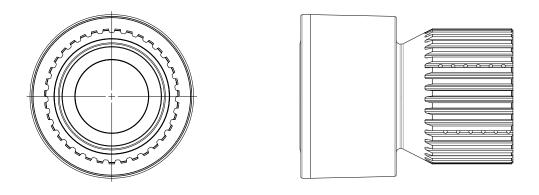


Figura 4.5: Rappresentazione dentatura su pezzo in lavorazione.

4.2 Utensile da taglio utilizzato

Come si può facilmente osservare in *figura 4.5*, la dentatura da realizzare non presenta il tipico profilo ad evolvente caratteristico delle ruote dentate e richiede quindi uno specifico profilo del tagliente.

Essendo la progettazione di un utensile strettamente legata alla tipologia di dentatura da realizzare, è stato contattato il fornitore di utensili che, a partire dalle informazioni geometriche della dentatura voluta, ha identificato l'utensile più adatto a questa tipologia di lavorazione, quello riportato in figura 4.6. All'interno dello schema dell'utensile sono riportate tutte le informazioni caratteristiche della dentatura dell'utensile e del pezzo in lavorazione.

Si tratta in definitiva di un utensile caratterizzato da una dentatura con le stesse caratteristiche di quella da realizzare. Si osserva infatti che vi è coerenza nella scelta del modulo e dell'angolo di pressione della dentatura dell'utensile rispetto a quelli della dentatura del pezzo.

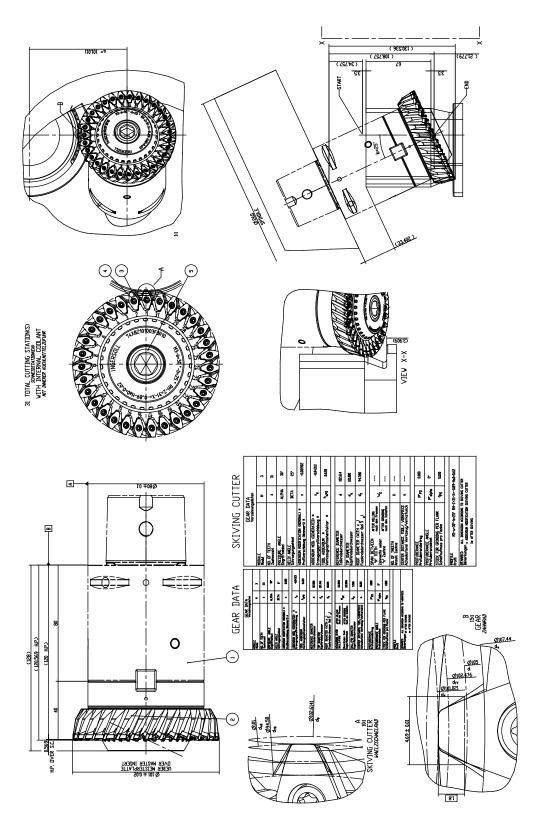


Figura 4.6: Utensile da taglio per Skiving.

4.3 Processo di lavorazione

In questo paragrafo si analizzerà il processo di lavorazione a cui è sottoposto il pezzo visto in precedenza. Le lavorazioni che precedono quella di dentatura tramite *Skiving* sono rappresentate di seguito e sono dei semplici lavori di tornitura e foratura. Tali processi, pur non essendo considerati parte centrale di questo lavoro di Tesi, sono stati riportati per avere un quadro completo delle lavorazioni richieste ed effettuate sul pezzo.

In particolare, per quanto riguarda il pezzo in figura 4.4, prima del processo di taglio della dentatura, vengono eseguite 10 operazioni di taglio suddivise in due fasi di lavorazione OP10 e OP20. Le operazioni relative alla prima fase di lavorazione vengono eseguite su un lato della macchina TANDEM mentre le altre, dopo la rotazione del pezzo, avverranno sul lato opposto della macchina, dove vi è l'unità di Skiving. Si riportano di seguito le rappresentazioni delle singole operazioni di taglio con indicazione dell'utensile selezionato per quella lavorazione.

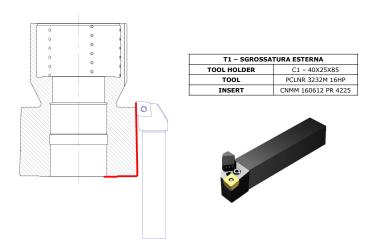


Figura 4.7: Rappresentazione sgrossatura esterna.

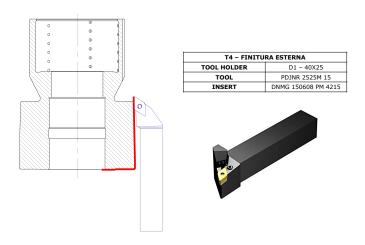


Figura 4.8: Rappresentazione finitura esterna.

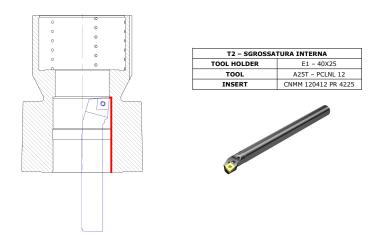


Figura 4.9: Rappresentazione sgrossatura interna.

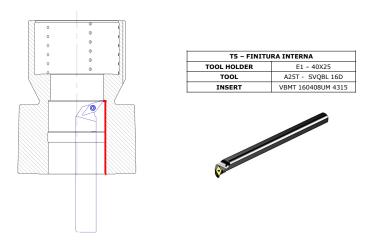


Figura 4.10: Rappresentazione finitura interna.

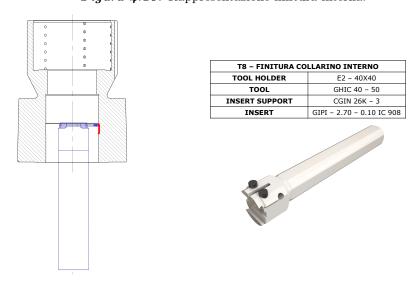
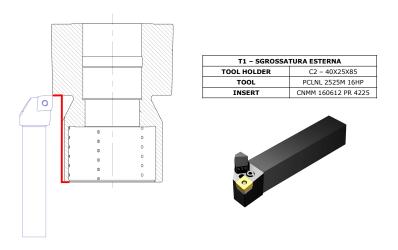


Figura 4.11: Rappresentazione lavorazione di gola interna.



 ${\it Figura~4.12:}$ Rappresentazione sgrossatura esterna.

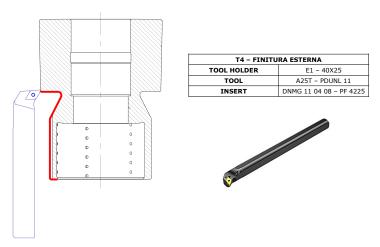
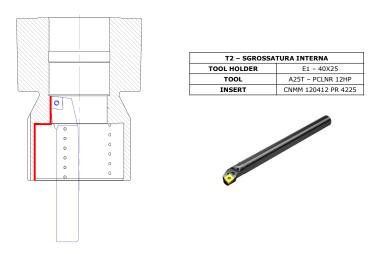


Figura 4.13: Rappresentazione finitura esterna.



Figura~4.14: Rappresentazione sgrossatura interna.

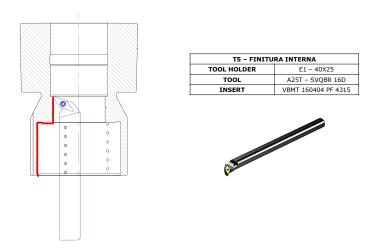


Figura 4.15: Rappresentazione finitura interna.

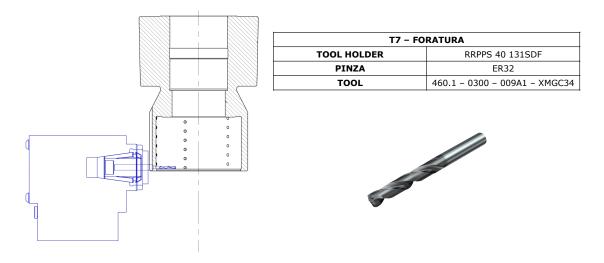


Figura 4.16: Rappresentazione foratura.

Trattandosi di una macchina TANDEM, le lavorazioni relative alla fase OP10 sono effettuate sul lato sinistro della macchina dopodichè, utilizzando il ribaltatore, si esegue la rotazione di 180° del pezzo e lo si porta sul lato destro della macchina per l'esecuzione delle lavorazioni relative alla fase OP20. All'interno della fase OP20 è compresa anche la realizzazione della dentatura che viene effettuata mediante il codice di controllo descritto successivamente.

4.4 Codice di controllo per la movimentazione degli assi CNC

La gestione e la movimentazione degli assi macchina in termini di posizione, velocità e accelerazione è gestita da un codice di controllo creato appositamente per le tipologie di lavorazione richieste. L'algoritmo di programmazione, salvato all'interno di un archivio, viene caricato sul controllo numerico della macchina in modo tale da interfacciarsi con tutte le altre periferiche di movimentazione e non solo, quali ad esempio azionamenti, motori, encoder, PLC, robot, ecc.

L'algoritmo di controllo per la movimentazione degli assi si basa su una serie di variabili, inizializzate e definite in un file di testo a parte, il quale viene eseguito inizialmente in modo da salvare in memoria i valori delle suddette variabili.

Dopodichè viene processato effettivamente il programma di lavorazione per portare in moto gli assi della macchina al fine di eseguire le lavorazioni richieste.

È necessario osservare che la movimentazione degli elementi della macchina per effettuare la lavorazione meccanica, deve essere sincronizzata e gestita tramite PLC in modo tale da monitorare anche le condizioni degli altri elementi che si interconnettono con la macchina utensile. Infatti, per eseguire correttamente la lavorazione, è necessario, per esempio, verificare che il trasportatore di carico-scarico sia posizionato correttamente e che vi sia un pezzo grezzo sulla posizione di presa del mandrino.

In una fase preliminare il programma di gestione è stato testato, con una serie di combinazioni di dati, su un software di simulazione (SinuTrain). Attraverso il software Siemens di simulazione è stato possibile monitorare lo stato di avanzamento del codice di programmazione in tutta la fase di funzionamento e quindi sono stati corretti alcuni errori di progettazione e di codifica.

Per il monitoraggio più dettagliato delle fasi di lavorazione, è stato eseguito il codice sulla macchina utensile ma, a differenza di quanto richiesto dal cliente, sono stati utilizzati dei pezzi in Teflon in modo tale da limitare eventuali danneggiamenti alla macchina o all'utensile derivanti da errori di posizionamento o di scelta delle velocità di movimentazione degli assi. I pezzi in Teflon, prima di essere posizionati sulla macchina utensile, hanno subito un processo di lavorazione al tornio in modo tale da assumere le dimensioni geometriche relative al pezzo che effettivamente sarà in lavorazione.

Per ultimo, il programma di controllo della movimentazione assi è stato utilizzato per effettuare il collaudo della macchina e quindi per la realizzazione di pezzi con tutte le caratteristiche richieste dal cliente.

In particolare, in questo lavoro di Tesi ci si è focalizzati esclusivamente sulla programmazione del codice per la realizzazione della dentatura, tralasciando la parte relativa alle operazioni di tornitura.

4.5 Progettazione algoritmo di controllo

4.5.1 Definizione variabili

La programmazione tramite linguaggio CNC si basa su una serie di variabili che vengono definite e modificate all'interno di tutto il programma. L'utilizzo di variabili, congiunto all'utilizzo di funzioni matematiche, consente alla programmazione CNC di raggiungere un elevato livello di flessibilità. Il linguaggio è predisposto da due tipologie di variabili:

• variabili di sistema → sono variabili con un significato predefinito, sono definite all'interno del sistema e rese disponibili all'operatore. Possono anche essere in modalità di lettura e scrittura all'interno del software di sistema;

- variabili utente \rightarrow sono variabili il cui significato non è noto al sistema. Il significato di esse è definito unicamente dall'operatore. Sono suddivise in:
 - variabili utente predefinite → sono variabili già definite all'interno del sistema e il valore numerico viene impostato dall'operatore attraverso i dati di macchina;
 - variabili utente definite → sono definite unicamente dall'operatore e non vengono automaticamente create dal sistema. Il valore numerico, tipologia di dato e altre proprietà, sono definite solo dall'operatore.

L'algoritmo di controllo è composto da un file principale che richiama al suo interno una serie di sottoprogrammi contenenti la definizione delle variabili utilizzate, la loro inizializzazione numerica e il vero e proprio programma di lavorazione.

All'interno del programma di definizione, ad ogni variabile è stato assegnato un nome e un attributo (REAL, BOOL, INT) in modo tale da definire la tipologia di valore numerico salvato all'interno di essa.

Per poter effettuare un'attenta analisi del codice relativo alla movimentazione degli assi, è necessario descrivere in primis i dati iniziali che sono stati impostati all'interno del file richiamato all'inizio del programma principale. Tutti questi dati numerici vengono impostati dall'operatore tramite interfacce grafiche disponibili sul pannello del controllo, e sono osservabili in figura 4.17.

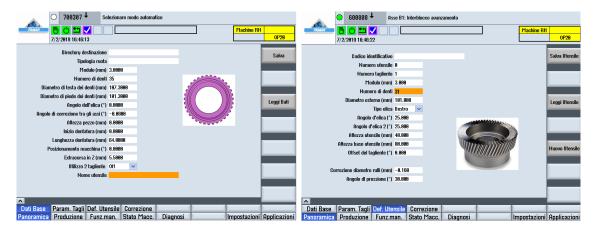


Figura 4.17: Dati pezzo e dati utensile in pagine interfaccia.

Ogni valore inserito all'interno delle pagine, viene salvato in variabili definite dall'utente che poi saranno riutilizzate nel codice di programmazione macchina. Qui di seguito, si riporta la nomenclatura utilizzata per il salvataggio dei dati numerici all'interno del programma CNC.

La definizione di queste variabili, risulta essere indispensabile al fine dello svolgimento del programma e per l'esecuzione dei calcoli nell'algoritmo principale. Si osserva che, all'interno di questo file, sono inserite tutte variabili numeriche relative alla lavorazione che si vuole realizzare e al pezzo in lavorazione che si vuole ottenere. Tutte le informazioni relative all'utensile da taglio vengono inserite all'interno di una pagina interfaccia relativa agli utensili in modo tale che, in fase di selezione di uno specifico utensile, vengono caricate tutte le informazioni geometriche relative all'utensile scelto.

Variabile	Tipologia	Descrizione	Val.
DISTANZA_SICUREZZA	REAL	Extra-corsa per prima passata	3
Z_IN	REAL	Modifica tratto ingresso	0,00
Z_OUT	REAL	Modifica tratto uscita	0,00
DIAM_PIEDE	REAL	Diametro tronc. int. dentatura	107,3
DIAM_TESTA	REAL	Dimetro tronc. est. dentatura	101,3
ANGOLO_ELICA_PARTE	REAL	Angolo elica pezzo	0,000
BOMBATURA	REAL	Bombatura fianco dente	0,000
CONICITA'	REAL	Conicità fianco dente	0,000
MODULO	REAL	Modulo dentatura	3
C1_RPM	INT	Vel. rotazione mandrino 1	1189
C1_RPM_FIN	INT	Vel. rotazione mandrino 1 in finitura	1189
DENTI_C1	INT	Numero denti pezzo	35
DENTI_C2	INT	Numero denti utensile	31
C1_OFFSET	REAL	Offset mandrino principale	0
CONTATORE	BOOL	Contatore pezzi ON/OFF	0
AVANZ[1]	INT	Avanzamento passata 1	340
AVANZ[2]	INT	Avanzamento passata 2	340
AVANZ[3]	INT	Avanzamento passata 3	340
AVANZ_1ST[1]	INT	Avanzamento passata 1 tratto iniz.	340
AVANZ_1ST[2]	INT	Avanzamento passata 2 tratto iniz.	340
AVANZ_1ST[3]	INT	Avanzamento passata 2 tratto iniz.	340
AVANZ_END[1]	INT	Avanzamento passata 1 tratto finale	340
AVANZ_END[2]	INT	Avanzamento passata 2 tratto finale	340
AVANZ_END[3]	INT	Avanzamento passata 2 tratto finale	340
AVANZ_FIN[0]	INT	Avanzamento finitura 1	114
AVANZ_FIN[1]	INT	Avanzamento finitura 2	91
AVANZ_FIN_1ST[0]	INT	Avanzamento finitura 1 tratto iniz.	114
AVANZ_FIN_1ST[1]	INT	Avanzamento finitura 2 tratto finale	91
AVANZ_FIN_END[0]	INT	Avanzamento finitura 1 tratto iniz.	114
AVANZ_FIN_END[1]	INT	Avanzamento finitura 2 tratto finale	91
NO_CUTS	INT	Numero passate di sgrosatura	3
PERCENTILE	BOOL	Passate in percentuale ON/OFF	0
PERCENT_SKI[1]	REAL	Prof. passata 1	2,0
PERCENT_SKI[2]	REAL	Prof. passata 2	1,7
PERCENT_SKI[3]	REAL	Prof. passata 3	1,3
FIN_OFFSET[0]	REAL	Sovrametallo di finitura 1	0,800
FIN_OFFSET[1]	REAL	Sovrametallo di finitura 2	0,200
OFFSET_FIN[0]	REAL	Offset finitura 1 fianco	0,000
OFFSET_FIN[1]	REAL	Offset finitura 2 fianco	0,000
Z_START_DENT	REAL	Coordinata Z inizio dentatura	0,000
Z_LUNGH_DENT	REAL	Lunghezza dentatura	64
Z_ECCESSO	REAL	Extra-corsa fine lavorazione	5,5
ALTEZZA_MANDR	REAL	Altezza autocentrante	147,5
PARTE_ID	INT	ID pezzo in lavorazione	_
ERR_MAX	REAL	Max errore inseguimento assi	0,400

Tabella 4.1: Principali variabili utilizzate nell'algoritmo di controllo.

Come si osserva in *tabella 4.1*, i parametri relativi alle velocità di avanzamento e alle profondità di passata sono salvati all'interno di un vettore che definisce la sua lunghezza nel momento in cui si imposta il numero di passate che si vogliono effettuare.

Nella pagina d'interfaccia relativa comparirà una tabella, con tante righe quante sono le passate, in cui è possibile impostare tutti i parametri per ogni singola passata di taglio.

Tramite questo codice di programmazione CNC si è pensato di poter realizzare anche dentature che possiedono un profilo del dente conico o bombato. La definizione di queste tipologie di dentature deve essere effettuata nei dati iniziali tramite le variabili Z_IN, Z_OUT, BOMBATURA e CONICITA'. Successivamente verrà affrontato l'utilizzo di queste variabili per la valutazione delle coordinate di movimento da imporre al pezzo.

4.5.2 Programma di lavorazione

4.5.2.1 Valutazione angolo inclinazione utensile Σ

Per il calcolo dell'angolo di inclinazione Σ , il codice prevede una serie di IF in cascata che, a seconda della configurazione tra utensile e ruota, calcola il valore dell'angolo da imporre all'utensile. Nel seguente paragrafo si analizzano le possibili combinazioni di utensile e ruota dentata, analizzando le differenze nel calcolo dell'angolo Σ in funzione della tipologia di dentatura e dell'inclinazione dell'elica dei due elementi.

Si indica con β_w e con β_t rispettivamente l'angolo d'elica del pezzo in lavorazione e dell'utensile.

Per la caratterizzazione della tipologia di elica, è stata utilizzata la seguente convenzione:

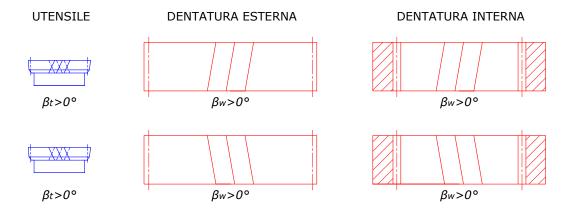


Figura 4.18: Convenzione di definizione angolo d'elica.

Inoltre, per la definizione dell'angolo di rotazione del mandrino che porta l'utensile, si è utilizzata la convenzione osservabile in figura 4.19.

Queste rappresentazioni risultano avere una particolare importanza nel momento in cui si impone al mandrino utensile la rotazione oraria (M3) o antioraria (M4) a seconda del segno dell'angolo Σ .

Per la buona riuscita del programma, sono state analizzate tutte le combinazioni di angolo d'elica del pezzo e dell'utensile, in modo tale da valutare correttamente, per ogni possibile configurazione, l'angolo d'inclinazione dell'utensile.

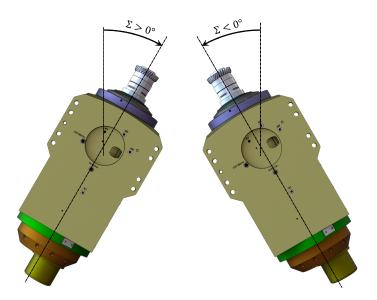
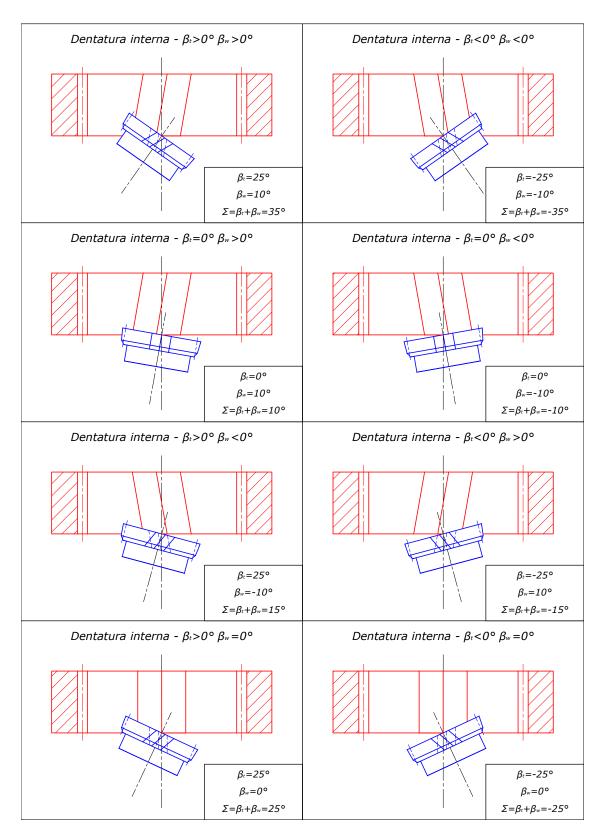


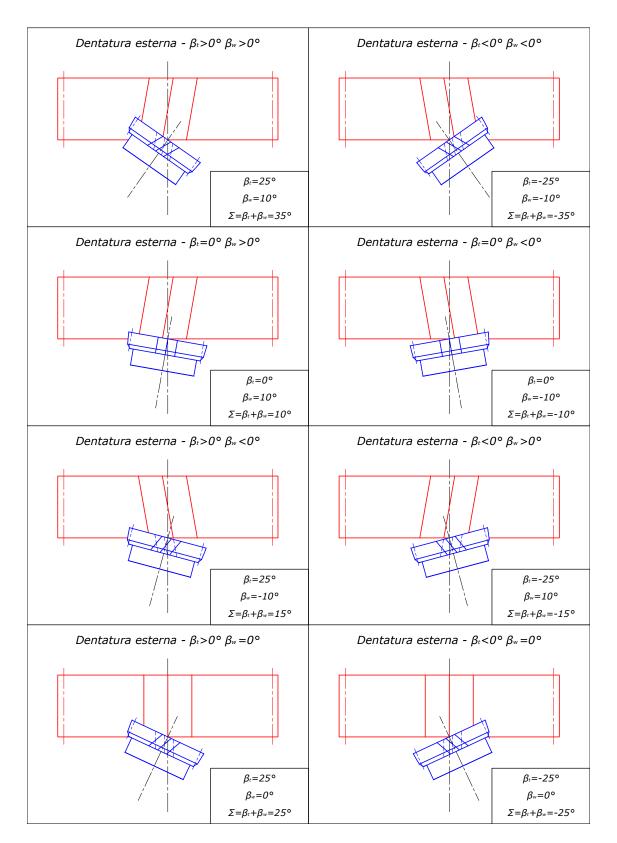
Figura 4.19: Convenzione angolo di rotazione mandrino utensile.

Come si può osservare, quindi, il calcolo dell'angolo d'inclinazione dell'utensile può essere ricondotto unicamente alla formula vista, a patto che venga utilizzata la convenzione di segno descritta relativamente all'angolo d'elica delle due dentature.

Al termine di questa fase di calcolo e di analisi dell'angolo di inclinazione dell'utensile, si utilizza il comando G00 del codice CNC per muovere l'asse relativo all'utensile. Importante ricordare che il senso di rotazione viene definito dai comandi M3 o M4 a seconda che si voglia ottenere una rotazione in senso orario o antiorario in funzione del segno dell'angolo Σ .



 ${\it Figura~4.20:}$ Calcolo angolo Σ per dentature esterne.



 ${\it Figura~4.21:}$ Calcolo angolo Σ per dentature interne.

4.5.2.2 La sincronizzazione e offset dei mandrini

Per l'esecuzione di un taglio alternato e periodico utile per la realizzazione di una dentatura è di fondamentale importanza la sincronizzazione degli assi dei principali elementi in gioco. In particolare, la programmazione Siemens in linguaggio CNC consente di monitorare lo stato degli assi così da ottenere la tipologia di sincronizzazione desiderata.

Come visto nel *capitolo 2*, in questa tipologia di lavorazione è di fondamentale importanza la sincronizzazione delle velocità di rotazione dei mandrini che portano in rotazione il pezzo e l'utensile. Queste velocità dipendono dalla scelta dei parametri di taglio e dalla tipologia di dentatura che si vuole realizzare.

Per l'esecuzione di queste operazioni di sincronismo, si utilizza un comando Siemens chiamato "Cambio Elettronico EG". Con il comando "Cambio Elettronico EG" si può controllare il movimento di un asse slave secondo un blocco di movimento lineare in funzione di un massimo di cinque assi master. I rapporti che legano gli assi master e l'asse slave sono definiti, per ogni asse master, dal fattore di accoppiamento. La quota calcolata per il movimento dell'asse slave è ottenuta sommando le singole quote di movimento relative ad ogni asse master moltiplicate per i rispettivi fattori di accoppiamento.

Per l'attivazione di un raggruppamento EG esistono tre varianti che si differenziano dalla tipologia di sincronizzazione selezionata. Nel nostro caso utilizziamo una sincronizzazione EGONSYNE riportata di seguito:

EGONSYNE (SPI(_SP), "FINE", SP_OFFSET[1], "DCP", SPI(_C), C_OFFSET, DENTI_C1, DENTI_SP11, Z, 0, DIFF_AVANZ, 100)

In questo caso, il mandrino SPI(_SP) è quello che porta in rotazione l'utensile ed è stato definito come asse slave, viceversa il mandrino SPI(_C), che porta in rotazione il pezzo e l'asse Z sono definiti assi master. La modalità "FINE" produce un sincronismo preciso e tramite le variabili di offset si definiscono le posizioni iniziali del sincronismo.

Si ha quindi che, per una velocità di rotazione dell'asse master SPI(_C), si ha una velocità di rotazione del mandrino slave, calcolata in base al rapporto di trasmissione a sua volta definito dal rapporto del numero di denti. Inoltre, in fase di avanzamento dell'asse Z, si genera un moto derivato sul mandrino utensile in modo tale da ottenere, se richiesta, una dentatura elicoidale. Come descritto nel capitolo 2, questa quota di velocità aggiuntiva è presente solo se si vuole realizzare una dentatura elicoidale; viceversa, il suo valore è nullo e quindi non produce alcun effetto sul mandrino utensile.

Per quanto riguarda la definizione degli offset, vengono effettuati dei calcoli in modo tale da valutare gli angoli di sincronismo adatti. In particolare, si valutano i valori degli angoli di offset per il mandrino utensile e per il mandrino del pezzo, sia per le passate di sgrossatura che per quelle di finitura.

Per quanto riguarda le passate di sgrossatura, è importante definire l'angolo di orientamento della dentatura rispetto ad eventuali altri riferimenti del pezzo in lavorazione. Questo valore viene inserito dall'utente tramite le pagine di interfaccia. Il valore di offset del mandrino pezzo risulta invariato sia per le passate di sgrossatura che per

quelle di finitura, a meno che non venga utilizzato un utensile di finitura opportuno che prevede un offset correttivo ulteriore per la sola finitura.

Per quanto riguarda l'offset relativo al mandrino utensile, questo risulta essere ininfluente per le lavorazioni di sgrossatura perchè l'orientamento della dentatura è definita dal mandrino pezzo. In fase di finitura, è necessario aggiungere un ulteriore valore di sfasamento del mandrino utensile in modo tale da lavorare sui fianchi della dentatura per poter allargare il vano adiacente a due denti. Il valore di sfasamento aggiuntivo ha una notevole importanza per quanto riguarda la misurazione del diametro sui rulli. Infatti, un vano più o meno grande comporta una misura sui rulli errata. La valutazione dell'offset aggiuntivo viene eseguita come segue, in funzione del valore dell'angolo di pressione della dentatura, dell'errore riscontrato, e dei diametri di riferimento dell'ingranaggio:

$$Corr = \frac{tan(\alpha) \cdot Err}{\frac{d_t + d_r}{2} \cdot \frac{\pi}{360}}$$

4.5.2.3 Calcolo della velocità di rotazione dei mandrini

Il calcolo della velocità di rotazione dei mandrini viene effettuato sulla base dei dati inseriti all'interno delle pagine d'interfaccia con l'operatore. Infatti, nelle pagine di visualizzazione è possibile introdurre il valore effettivo della velocità di rotazione dei due mandrini oppure, in alternativa, il valore della velocità di taglio richiesta dal processo.

Nel primo caso, il valore è già noto ed è sufficiente inserirlo all'interno delle variabili destinate a questo utilizzo. Viceversa, è necessario un processo analitico per il calcolo della velocità di rotazione.

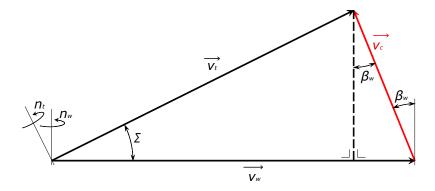


Figura 4.22: Schema di calcolo velocità di rotazione mandrini.

In figura 4.22, è possibile visualizzare uno schema trigonometrico delle velocità in gioco. Si è indicato con n_t e n_w rispettivamente il numero di giri dell'utensile e del pezzo, con β_w l'angolo di inclinazione dell'elica del pezzo e con v_t , v_w e v_c le velocità tangenziali relative a utensile, pezzo e quella relativa alla velocità di taglio.

Nota la velocità di taglio in m/min è possibile calcolare tramite funzioni trigonometriche il valore della velocità tangenziale di rotazione dell'utensile come:

$$v_t = v_c \cdot \frac{\cos|\beta_w|}{\sin\Sigma} \quad [m/\min] \tag{4.1}$$

Conoscendo poi la relazione tra velocità tangenziale, velocità angolare e numero di giri è possibile calcolare:

$$\omega_t = \frac{v_t}{d_{t_{tool}}/2} \cdot 1000 \quad [rad/min] \tag{4.2}$$

$$n_t = \frac{\omega_t}{2\pi} = \frac{v_t}{d_{treel} \cdot \pi} \cdot 1000 = v_c \cdot \frac{\cos|\beta_w|}{\sin\Sigma} \cdot \frac{1}{d_{treel} \cdot \pi} \cdot 1000 \quad [rpm] \tag{4.3}$$

Una volta calcolato il numero di giri dell'utensile, tramite un legame analitico con il rapporto di trasmissione, è possibile calcolare il numero di giri del pezzo in lavorazione. In particolare:

$$n_w = \frac{n_t}{z_w/z_t} \quad [rpm] \tag{4.4}$$

Dove con z_w e z_t si indicano il numero di denti del pezzo e dell'utensile.

Questo è valido solo nel caso di dentatura a denti dritti in quanto, se si volesse lavorare una dentatura elicoidale, è importante la lettura del capitolo 4.5.2.5.

Utile osservare che, a parità di velocità di taglio, l'utilizzo di un angolo Σ più grande richiede una minore velocità di rotazione dell'utensile.

Un procedimento analogo è svolto per quanto riguarda le passate di finitura a seconda dei dati effettivamente noti.

4.5.2.4 Valutazione della profondità di passata

A seconda del numero di passate che si vogliono effettuare, viene inserito dall'utente un valore numerico sulle pagine d'interfaccia, in modo tale da generare una tabella composta da tante righe quante sono le passate. A questo punto è possibile completare la tabella ed indicare per ogni passata la profondità di taglio desiderata.

Per la definizione della profondità di passata, ci sono due alternative differenti: definire la profondità di passata come percentuale dell'altezza del dente, oppure in termini geometrici in funzione delle coordinate radiali.

Come prima cosa, vengono effettuati dei controlli a livello numerico per verificare che nessuna profondità di passata sia stata definita in modo negativo e, nel caso di definizione in percentuale, che la somma di tutte le passate sia pari al 100%. Nel caso in cui queste condizioni non siano verificate, si presenta un messaggio d'errore che arresta irreversibilmente la macchina. L'arresto forzato è necessario in quanto in queste condizioni non è possibile effettuare la lavorazione richiesta oppure non si effettua il taglio per tutta l'altezza del dente.

Se la definizione delle profondità di passata è stata effettuata per via numerica non sono necessari altri calcoli in quanto è già noto il valore in ogni passata. Se, altrimenti, la definizione è stata effettuata in percentuale dell'altezza del dente, si calcola, per ogni passata di taglio, l'effettivo valore della profondità di passata come:

$$p_i = \frac{((|d_r - d_t| - f_{off}) \cdot \frac{p_{\%}}{100})}{2} \tag{4.5}$$

dove si indica con p_i il valore della profondità di passata, con d_r e d_t rispettivamente il diametro di troncatura interna ed esterna, con f_{off} il sovrametallo previsto per la finitura e con $p_{\%}$ il valore della profondità di passata in percentuale.

Il valore i-esimo di ogni passata è inserito all'interno di un vettore che ha tanti elementi quante sono le passate di taglio.

4.5.2.5 Calcolo dell'avanzamento incrementale

Nella realizzazione di una dentatura elicoidale, come visto nel *capitolo 4.5.2.2*, è necessaria una velocità aggiuntiva. Generalmente la velocità aggiuntiva per il sincronismo dei due assi di rotazione è affidata al mandrino utensile o al mandrino che porta in rotazione il pezzo. È calcolata come:

$$\Delta\omega = \frac{2 \cdot f \cdot \sin\beta_w}{m_n \cdot z_w} \tag{4.6}$$

Dove f è l'avanzamento del pezzo lungo l'asse Z, β_w è pari all'eventuale angolo d'elica del pezzo e m_n e z_w sono rispettivamente modulo e numero di denti della dentatura in lavorazione.

Come si osserva anche analiticamente, la riga di codice per il calcolo di questa velocità aggiuntiva è sempre presente in quanto, a causa della presenza della funzione $sin(\beta_w)$, il valore è diverso da zero solo se β_w è anch'esso diverso da zero altrimenti, il valore è nullo e quindi risulta ininfluente per la restante parte del codice.

Dalla lettura del *capitolo 4.5.2.2*, relativo al sincronismo degli assi, si intuisce che, avendo impostato il mandrino utensile come asse slave, sarà lui a modificare la propria velocità di rotazione. Infatti, muovendo l'asse Z esiste un fattore di accoppiamento tra mandrino utensile e asse Z tale per cui:

$$n_t = \frac{n_w}{z_w/z_t} + \Delta\omega \tag{4.7}$$

4.5.2.6 Traslazione dei sistemi di riferimento

Per la definizione e per il calcolo delle coordinate di lavorazione, è di fondamentale importanza definire dove sono posizionati i sistemi di riferimento della macchina e quale è il verso di incremento positivo degli stessi. In generale, per quanto riguarda gli assi X e Z, si definisce come verso di incremento positivo quello che allontana il pezzo dalla zona di lavorazione.

In questa macchina, noti gli assi di movimentazione, è necessario identificare le origini degli assi X e Z relativi la movimentazione del pezzo e dell'asse Y relativo alla movimentazione della testa per *Skiving*.

L'azzeramento degli assi di rotazione, invece, viene effettuato autonomamente dagli encoder posizionati all'interno dei gruppi mandrino tramite un'operazione di ricerca della tacca di zero. In questo modo, una volta caricato il pezzo sul mandrino principale, è possibile conoscerne l'orientamento in ogni istante.

Azzeramento per tornitura L'azzeramento degli assi di movimentazione pezzo per le operazioni di tornitura viene effettuato come osservabile in *figura 4.23*. In particolare, per quanto riguarda l'asse Z si fa in modo che la facciata del naso mandrino sia coincidente con la facciata superiore della torretta utensili. Questo azzeramento viene effettuato meccanicamente dall'operatore utilizzando un comparatore millesimale e procedendo all'azzeramento dei valori di posizionamento dell'encoder.

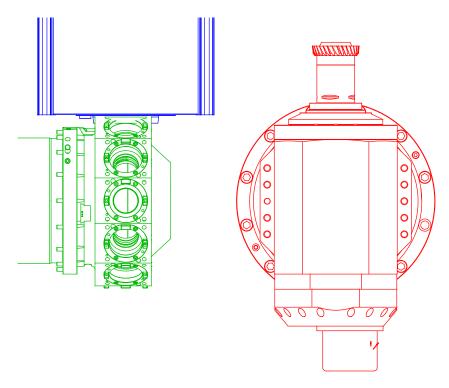


Figura 4.23: Rappresentazione azzeramento per taglio di tornitura.

È importante osservare che, per ricavare le coordinate di lavorazione sul pezzo è necessario effettuare delle correzioni di origine relative all'ingombro dell'autocentrante e della presa pezzo posizionati sul naso mandrino e dell'altezza dell'utensile fissato sulla torretta. Questa correzione verrà analizzata in seguito per quanto riguarda la parte di *Skiving*.

Azzeramento per *Skiving* In questa macchina, dovendo effettuare delle lavorazioni preliminari di tornitura e poi di dentatura, è necessario spostare l'origine pezzo in modo tale da rendere più semplice il calcolo delle coordinate di movimentazione. Per

comodità, lo zero pezzo per le lavorazioni di Skiving è quello rappresentato in figura 4.24 con gli assi X' e Z'.

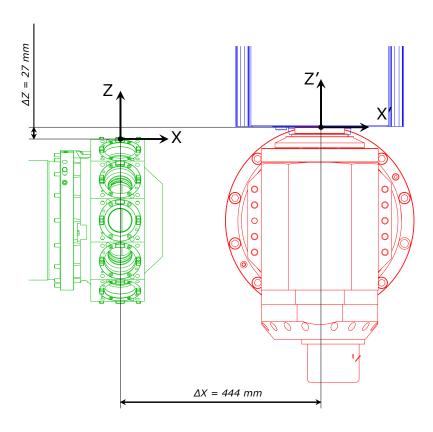


Figura 4.24: Rappresentazione azzeramento per taglio Skiving.

Anche in questo caso, così come per la tornitura, si allinea l'asse del pezzo con l'asse dell'utensile (nella condizione di $\Sigma = 0^{\circ}$) e si fa coincidere la facciata del naso mandrino con la facciata d'appoggio dell'utensile per *Skiving*.

Per l'inserimento nel codice CNC di questa origine si utilizza il comando G54 che, fornite le coordinate relative all'origine precedente, esegue una traslazione del sistema di riferimento. In particolare, le quote di spostamento sono osservabili in figura 4.24.

Come accennato in precedenza, è necessario effettuare un ulteriore spostamento dell'origine dovuto all'altezza del tool e all'altezza dell'autocentrante montato sul naso mandrino in modo tale da correggere la posizione relativa all'asse Z della macchina. In particolare, come visualizzabile in figura 4.24, è necessario aggiungere due traslazioni lungo l'asse Z della macchina. Per quanto riguarda la traslazione dovuta all'autocentrante, deve essere impostata in fase di progettazione del controllo mentre, per quanto riguarda la lunghezza dell'utensile, viene gestita direttamente dal controllo CNC tramite i dati geometrici dello stesso.

Azzeramento dell'asse Y L'azzeramento dell'asse Y viene effettuato in maniera tale da rendere più semplice la valutazione delle coordinate di lavorazione. Si è pensato, dunque, di porre lo zero nella condizione in cui l'asse dell'utensile per *Skiving* risulti

perfettamente allineato con l'asse del mandrino principale. In questo modo, il posizionamento lungo Y è quello visto nel *capitolo 4.5.2.8* e si basa solo sulla valutazione delle coordinate radiali della dentatura.

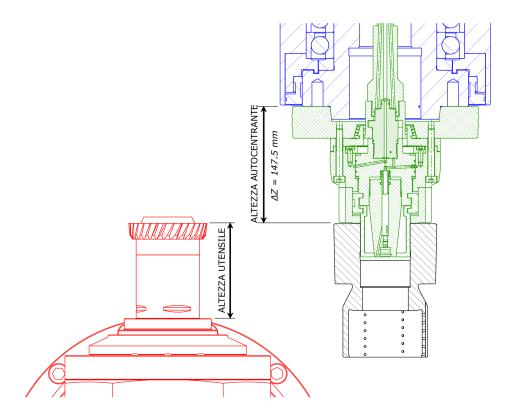


Figura 4.25: Rappresentazione spostamento origine lungo l'asse Z.

In figura 4.27 è possibile visualizzare l'origine del pezzo, per quanto riguarda la lavorazione di *Skiving* associato ai principali assi della macchina con indicazione del verso positivo di incremento degli stessi.

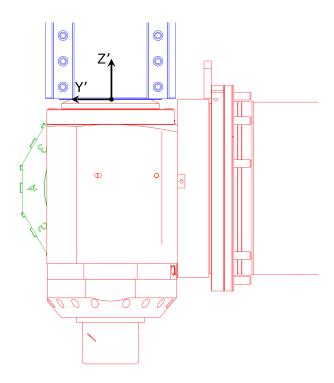


Figura 4.26: Rappresentazione azzeramento lungo l'asse Y.

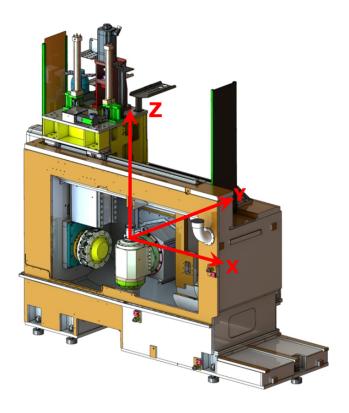


Figura 4.27: Rappresentazione origine degli assi di movimentazione della macchina.

4.5.2.7 Correzione lungo l'asse X e Z

A causa della rotazione della testa per *Skiving*, il punto di contatto tra tagliente e pezzo in lavorazione si sposta sia lungo l'asse X che lungo l'asse Z ed è quindi necessario inserire una correzione nel posizionamento del pezzo. Per la valutazione dei valori correttivi è sufficiente un'analisi geometrica come effettuato in *figura 4.28*.

Si osserva infatti che:

$$a_X = |L_{tot} \cdot \sin|\Sigma|| \tag{4.8}$$

$$a_Z = |L_{tot} - L_{tot} \cdot \cos|\Sigma|| = L_{tot} \cdot (1 - \cos|\Sigma|) \tag{4.9}$$

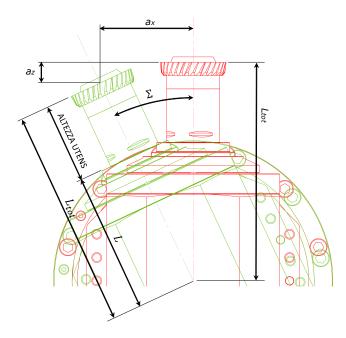


Figura 4.28: Rappresentazione correzione lungo l'asse X.

In particolare si osserva che la coordinata a_Z deve assumere sempre segno negativo vista la convenzione utilizzata per gli assi, mentre il segno di a_X dipende dal segno dell'angolo di rotazione Σ . In definitiva, in funzione della convenzione utilizzata sull'angolo Σ e sull'asse X si ha che:

$$a_X > 0$$
 se $\Sigma > 0$ (4.10)

$$a_X < 0 \quad se \quad \Sigma < 0 \tag{4.11}$$

4.5.2.8 Coordinata di lavorazione dell'asse Y

La coordinata di posizionamento lungo l'asse Y è calcolata in modo differente se si vuole realizzare una dentatura interna o esterna. In questa parte di codice vengono messi in rotazione anche i due mandrini. Anche in questo caso è importante fare attenzione al senso di rotazione in quanto dipende dalla tipologia di pezzo in lavorazione.

Se si lavora per realizzare una dentatura interna, le velocità di rotazione (in una vista dall'alto) devono essere concordi, viceversa per la realizzazione di una dentatura esterna. Per l'attivazione della rotazione dei mandrini si utilizzano i comandi M3 e M4 del controllo CNC.

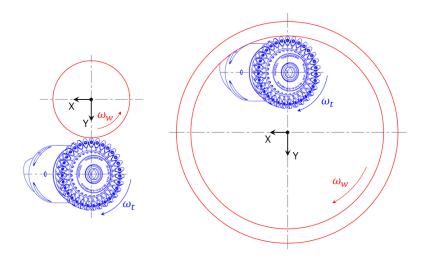


Figura 4.29: Rappresentazione coordinata di posizionamento lungo l'asse Y.

In generale, per dentature interne, la coordinata Y per il posizionamento della lavorazione è definita come:

$$Y_{work,1} = -\frac{d_t}{2} + r_t (4.12)$$

$$Y_{start} = -\frac{d_t}{2} + r_t + 1 (4.13)$$

Mentre, per dentature esterne:

$$Y_{work,1} = \frac{d_t}{2} + r_t \tag{4.14}$$

$$Y_{start} = \frac{d_t}{2} + r_t + 1 \tag{4.15}$$

dove si è indicato con d_t il diametro di troncatura esterna della ruota e con r_t il raggio di punta dell'utensile. Il fattore 1, rappresenta una correzione di sicurezza

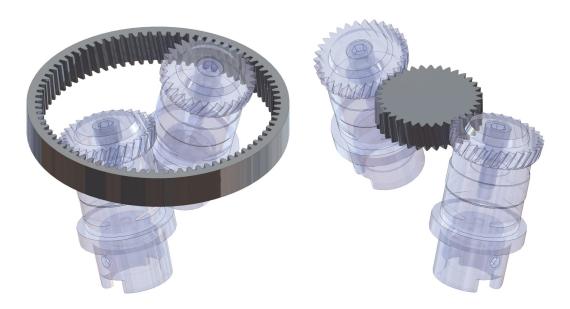


Figura 4.30: Possibili configurazioni di taglio con Skiving.

per il pre-posizionamento iniziale nella variabile Y_{start} , infatti è assente nell'effettiva coordinata di lavorazione Y_{work} .

Inoltre, è importante osservare che in questa parte di codice vengono analizzate le possibili configurazioni tra utensile e ruota in lavorazione a seconda degli angoli di inclinazione delle eliche. Difatti, definita la tipologia di lavorazione (interna o esterna), è possibile effettuare il processo di taglio con due posizionamenti diametralmente opposti tra di loro. Per semplificare la comprensione, è possibile osservare in figura 4.30 alcune delle possibili configurazioni di taglio.

Questa parte di codice è importante soprattutto nel caso in cui la tavola rotante non è predisposta per una rotazione dell'utensile in entrambi i versi. Infatti, se per esempio è permessa una rotazione dell'utensile solo in senso orario e la dentatura richiede una rotazione opposta, si può pensare di andare a lavorare con un'inclinazione oraria, di angolo pari a Σ , dal lato diametralmente opposto.

Per l'impostazione della configurazione di lavoro, all'interno del codice di programmazione sono presenti alcune righe che, esaminando la variabile CLOCK_POS, invertono il verso di incremento dell'asse Y, spostando il punto di lavoro da una posizione a quella diametralmente opposta. Tutto ciò può essere effettuato, tramite la funzione AMIRROR del codice CNC, a patto che si imposti l'origine del sistema di riferimento sull'asse del pezzo in lavorazione.

In questa parte di codice viene anche calcolata la coordinata di posizionamento lungo l'asse Y relativa alle eventuali passate di finitura. Anche in questo caso il calcolo della coordinata è differente se si analizza una dentatura interna o una esterna. Per una dentatura interna si ha:

$$Y_{work,2} = -\frac{d_r}{2} + r_t (4.16)$$

Mentre, per dentature esterne:

$$Y_{work,2} = \frac{d_r}{2} + r_t \tag{4.17}$$

dove si è indicato con r_t il raggio di punta dell'utensile, e con d_r il diametro di troncatura interna della dentatura.

Per ultimo in questa parte di codice si analizza anche la variabile BOMBATURA la quale definisce il valore dell'eventuale correzione di bombatura del dente e, a seconda del suo valore, si modifica la variabile DIREZIONE in modo tale da riutilizzarla nella parte di codice per la realizzazione della passata di taglio. In particolare si utilizzano i seguenti valori numerici:

Dentatura interna					
BOMBATURA	> 0	DIREZIONE	3		
BOMBATURA	< 0	DIREZIONE	2		
BOMBATURA	0	DIREZIONE	1		
Dentatura esterna					
BOMBATURA	> 0	DIREZIONE	2		
BOMBATURA	< 0	DIREZIONE	3		
BOMBATURA	0	DIREZIONE	1		

Tabella 4.2: Valori variabili a seconda della tipologia di dentatura.

Nelle righe di codice relative al pre-posizionamento del pezzo lungo l'asse Y, si attiva il motore relativo alla traslazione dell'asse Y della macchina mediante un comando G00 che, tramite un avanzamento rapido, porta il pezzo nella posizione prevista.

La coordinata finale di questo movimento è stata calcolata in precedenza a seconda della tipologia di dentatura da realizzare. Infatti, in funzione delle scelte progettuali effettuate sulla macchina e in funzione della tipologia di dentatura da realizzare, la coordinata relativa può avere un segno positivo o negativo.

4.5.2.9 Coordinata di lavorazione dell'asse Z

Il posizionamento prima della lavorazione lungo l'asse Z viene effettuato in maniera analoga a quello effettuato lungo l'asse Y imponendo, tramite un comando G00, lo spostamento all'asse Z fino alla coordinata calcolata. Importante ricordare che, per quanto riguarda l'asse Z, è stata inserita anche una correzione dovuta all'ingombro dell'autocentrante in modo tale da spostare l'origine del pezzo. In questo modo è possibile ricavare le coordinate di posizionamento tramite la quotatura del pezzo. Per quanto riguarda il posizionamento iniziale si ha una coordinata dell'asse Z pari a Z_START_DENT+DISTANZA_SICUREZZA. La quota di sicurezza è inserita in fase di definizione delle variabili.

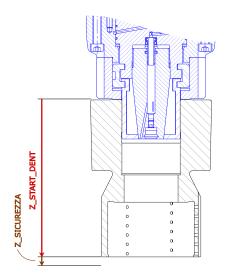


Figura 4.31: Rappresentazione posizionamento iniziale lungo l'asse Z.

Per la definizione della coordinata di fine lavorazione, è necessario effettuare un ragionamento analogo andando a considerare l'altezza totale della dentatura. Si ha quindi che, come riportato in *figura 4.32*, la coordinata finale risulta essere pari a Z_END_SKI.

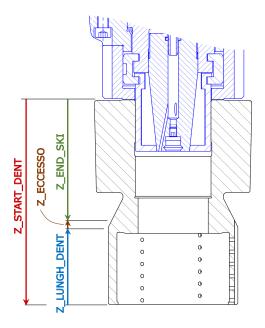


Figura 4.32: Rappresentazione posizionamento finale lungo l'asse Z.

In questo modo è quindi possibile effettuare la lavorazione di taglio lungo tutta l'estensione della dentatura come si osserva in figura 4.33. Il tratto in rosso rappresenta la traiettoria seguita dal pezzo nel movimento lungo l'asse Z della macchina. Come si

può vedere, sia nel posizionamento iniziale, che in quello finale, è previsto un extra-corsa aggiuntivo.

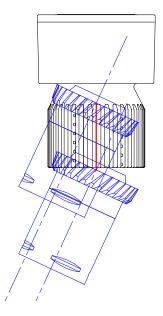


Figura 4.33: Rappresentazione lavorazione utensile Skiving lungo l'asse Z.

4.5.2.10 Lavorazioni di taglio

Il codice relativo alle lavorazioni di taglio si suddivide in due parti: la prima relativa a tutte le passate di sgrossatura e la seconda relativa alla finitura. Come già accennato, il numero delle passate di sgrossatura e di finitura viene definito in fase di impostazione macchina attraverso le pagine di interfaccia utente.

Fondamentalmente il codice per l'esecuzione delle passate di sgrossatura e di finitura si basa su due cicli WHILE che eseguono i calcoli e la movimentazione degli assi per ogni passata di taglio prevista.

A seconda dei dati impostati nel file iniziale, è possibile effettuare lavorazioni di taglio differenti tra loro in funzione di quella che è la dentatura che si vuole realizzare. È quindi necessario disporre di una variabile generica per valutare la tipologia di dentatura da realizzare e, a seconda del suo valore, individuare le coordinate lungo le quali muovere il pezzo in lavorazione. Come già descritto nel capitolo 4.5.2.8, la variabile che identifica la tipologia di dentatura è DIREZIONE. In particolare, la variabile DIREZIONE viene indicizzata in funzione della bombatura che si desidera effettuare sul fianco del dente.

Per quanto riguarda la realizzazione di un profilo con compensazione conica del dente, si utilizza il comando di taglio lineare G01 con un'opportuna modifica delle coordinate lungo l'asse X. In questo caso non si utilizza una variabile ausiliaria in quanto la coordinata in X viene modificata o meno a seconda dei parametri relativi alla conicità. Questo discorso non può essere applicato alla realizzazione di denti con compensazione di bombatura in quanto è necessario utilizzare delle funzioni G02 e G03

di taglio lungo una traiettoria circolare. Risulta quindi necessaria solo una distinzione di codice in funzione dei parametri relativi alla bombatura.

Come si intuisce nel capitolo 4.5.2.8, la variabile relativa alla bombatura del profilo del dente può assumere tre differenti valori. Questo è il motivo per cui il codice relativo alle lavorazioni si articola principalmente in tre blocchi distinti ognuno dei quali gestito da un IF per il monitoraggio della variabile DIREZIONE. Inoltre, all'interno di ogni blocco di lavorazione, è importante osservare che la fase di taglio può essere scomposta in tre zone di lavoro in modo tale da poter effettuare una conicità parziale della dentatura nella zona di imbocco con l'utensile o nella zona finale della lavorazione. La definizione delle eventuali lunghezze dei tratti conici viene effettuata in fase di inserimento dei dati attraverso le variabili Z_IN e Z_OUT.

La caratterizzazione della dentatura in termini di dentatura interna o esterna non è necessaria in quanto influisce solo sul calcolo del posizionamento lungo l'asse X e questo viene già valutato nel *capitolo 4.5.2.7*.

La parte di codice relativa ad una dentatura senza bombatura è caratterizzata dalla variabile DIREZIONE che vale 1. In questo blocco di codice viene effettuata la passata di taglio seguendo le coordinate di spostamento calcolate in precedenza. Come già accennato, trattandosi di una dentatura con profilo dritto (al più conico) si utilizza solo una funzione di taglio G01.

In generale, il moto previsto dal pezzo è unicamente diretto lungo l'asse Z. L'inserimento delle variabili di conicità, se diverse da zero, modificano il valore delle coordinate anche lungo l'asse X effettuando un taglio obliquo con conseguente generazione di un profilo conico.

Successivamente seguono i due blocchi gestiti da due IF nel caso di dentatura bombata. I due valori assunti dalla variabile DIREZIONE differiscono principalmente dal verso della bombatura in quanto è possibile realizzare una bombatura convessa o concava e le due casistiche sono distinte unicamente dal segno di BOMBATURA.

In questi due blocchi il processo di taglio principale della dentatura viene eseguito con un comando G02 e G03 che consente il movimento del pezzo con un'interpolazione circolare delle coordinate rispettivamente in senso orario o antiorario.

Anche in questi due blocchi è possibile prevedere una conicità della dentatura nel tratto iniziale e/o finale coerentemente con le scelte effettuate in fase di inserimento dei dati numerici nel programma.

Alla fine del processo di taglio di sgrossatura, si aggiorna la variabile relativa al conteggio delle passate effettuate e si effettua il posizionamento lungo X e lungo Z per la passata successiva sulla base di quanto descritto nel capitolo 4.5.2.7 e 4.5.2.9. Si procede quindi all'esecuzione delle successive passate di sgrossatura in riferimento al procedimento utilizzato per la prima passata di taglio.

Per quanto riguarda le passate di finitura, invece, è fondamentale ricalcolare i valori di offset che legano i due mandrini sincroni. Infatti, in funzione della larghezza della cava tra due denti che si vuole ottenere, potrebbe essere necessario uno sfasamento angolare in modo tale da lavorare solo su un fianco del dente. In questo modo, si ha la possibilità di effettuare delle dentature che presentano cave più larghe rispetto a quelle generate per inviluppo dal profilo dell'utensile.

Una volta effettuato il sincronismo degli assi è possibile procedere con l'algoritmo di taglio della finitura così come effettuato per le passate di sgrossatura.

4.5.2.11 Valutazione errori di processo

La programmazione con linguaggio CNC consente anche l'inserimento di una serie di errori che possono essere personalizzati all'interno del codice di progettazione del processo. In particolare, per quanto riguarda la nomenclatura Siemens, sono a disposizione dell'utente i seguenti errori:

- 65000-65999 → si tratta di errori che, quando richiamati con il comando SETAL, generano una visualizzazione sul pannello utente, con l'interruzione momentanea del ciclo. L'esecuzione del programma può essere forzata dall'operatore mediante il comando di avvio. Si tratta quindi di un errore che sarebbe bene correggere;
- 66000-66999 → si tratta di errori che, se richiamati, mostrano un messaggio all'operatore con arresto irreversibile del macchina. In questo caso, anche forzando l'esecuzione del programma con il pulsante di avvio, non si riesce a procedere con l'avanzamento del codice. Si tratta di errori che hanno un forte impatto sulla lavorazione e che potrebbero generare un pericolo;
- 67000-67999 → si tratta di errori con scarsa pericolosità che generano un messaggio d'errore visibile all'utente ma procedono automaticamente con l'esecuzione del programma.

Utilizzando questa base fornita da Siemens, sono stati inseriti, all'interno del codice di controllo, una serie di errori macchina in modo tale da monitorare l'avanzamento del programma eliminando tutte le principali cause di pericolo o di impossibilità di lavorazione.

Nella fase preliminare del codice, sono verificati i dati inseriti dall'operatore attraverso le pagine di interfaccia. In particolare, vengono verificati i dati relativi alla geometria dell'utensile e del pezzo in lavorazione:

- SETAL(66101) → arresto irreversibile della macchina a causa della scelta di una configurazione utensile-pezzo errata. Errore che viene eseguito quando si vorrebbe lavorare un pezzo a dentatura cilindrica con un utensile anch'esso cilindrico. Infatti, in queste condizioni, è impossibile generare una velocità di taglio e quindi non si può effettuare il processo di taglio mediante Skiving;
- SETAL(66102) → arresto irreversibile della macchina a causa della scelta di una configurazione utensile-pezzo errata. Errore eseguito quando il modulo del pezzo in lavorazione differisce da quello dell'utensile. Infatti in questa tecnologia di taglio, come già accennato, è importante che ci sia coerenza tra modulo del pezzo e dell'utensile. In particolare, definita la dentatura che si vuole realizzare, l'utensile deve essere individuato di conseguenza.

Altri errori che sono stati pensati per l'ottimizzazione del codice sono quelli relativi alla definizione dei parametri di taglio:

- SETAL(66103) → arresto irreversibile della macchina a causa di una scelta errata dei parametri di taglio. Si presenta questo errore se, avendo definito le profondità di passata in percentuale, è stato inserito un valore numerico negativo. è necessario correggere i dati ed eseguire nuovamente il programma;
- SETAL(66104) → arresto irreversibile della macchina a causa di una scelta errata dei parametri di taglio. Viene visualizzato un messaggio con conseguente arresto della macchina se le passate di taglio impostate, per via numerica o in percentuale, non sono tali da generare totalmente l'altezza del dente;
- SETAL(66105) → arresto irreversibile della macchina a causa di una scelta errata dei parametri di taglio. Si verifica quando la variabile DIREZIONE, definita nel capitolo 4.5.2.8, è nulla. Questo può verificarsi da un errore di inserimento degli angoli d'inclinazione delle eliche delle dentature oppure da un errore di scelta del parametro di bombatura.

4.5.2.12 Test algoritmo su SinuTrain

SinuTrain è un programma di simulazione Siemens che offre una soluzione pratica per testare codici CNC ed è utilizzabile sia dai principianti che dagli esperti. Si tratta di un software identico al controllo e perfettamente adattato alle esigenze dell'operatore.

Come si osserva in *figura 4.34* una volta creata la macchina virtuale, è possibile la visualizzazione tramite interfaccia utente che rispecchia esattamente il pannello di controllo Siemens installato sulla macchina. Quindi, a differenza di altri software di simulazione, risulta essere maggiormente intuitivo e versatile.



Figura 4.34: Rappresentazione interfaccia di SinuTrain.

L'interfaccia grafica è composta principalmente da un display (1), all'interno del quale è possibile la visualizzazione di tutti i dati macchina e di tutte le pagine relative alla gestione del codice.

Sulla destra, sono presenti una serie di pulsanti (2) che consentono la selezione delle pagine di controllo relative a: la scelta dei programmi, la visualizzazione degli allarmi, la visualizzazione dei dati macchina, la visualizzazione dei parametri di processo e la visualizzazione di tutti i menù selettivi.

Subito dopo, vi sono i comandi (3) che permettono solitamente di muovere il cursore all'interno della schermata grafica selezionata e che consentono la visualizzazione degli help relativa agli errori.

In basso a destra è possibile visualizzare due volantini analogici (4) che permettono la regolazione in percentuale delle velocità di rotazione e di avanzamento dei mandrini e sono accoppiati a dei pulsanti per l'attivazione-disattivazione del moto di rotazione e traslazione dei mandrini.

Nella zona centrale, e sulla sinistra, si trovano una serie di pulsanti con i quali l'operatore può selezionare un asse e imporre ad esso dei moti di rotazione-traslazione in entrambi i versi (5) oppure scegliere in quale modalità mandare in esecuzione il programma di controllo (6).

In basso a sinistra sono presenti i tasti (7) relativi all'avvio-interruzione del ciclo di lavorazione e quello relativo al reset della macchina.

Infine, a sinistra è presente un fungo di emergenza (8) per l'arresto forzato della macchina in situazioni di pericolo.

In questa fase di test, è stato possibile simulare il processo di lavorazione della macchina utensile monitorando, in ogni istante di tempo, la variazione delle grandezze cinematiche relative a tutti gli assi in gioco.

In particolare, per la realizzazione della dentatura precedentemente descritta, è stato testato il programma CNC e sono state definite tutte le principali variabili geometriche per il calcolo e la movimentazione degli assi lungo le coordinate desiderate. In figura 4.35 e 4.36, è possibile visualizzare i parametri impostati tramite pagine interfaccia sul controllo della macchina utensile in merito alle caratteristiche geometriche del pezzo in lavorazione e dell'utensile.

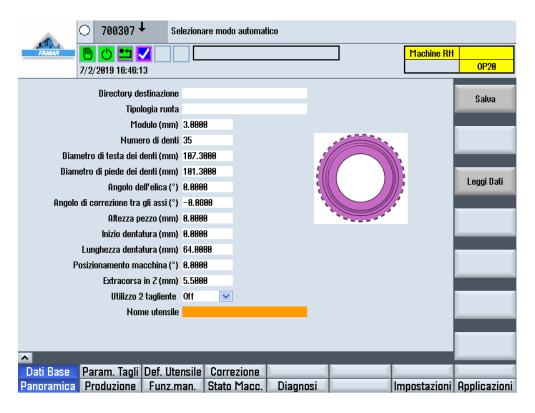


Figura 4.35: Pagina definizione dati geometrici relativi al pezzo in lavorazione.

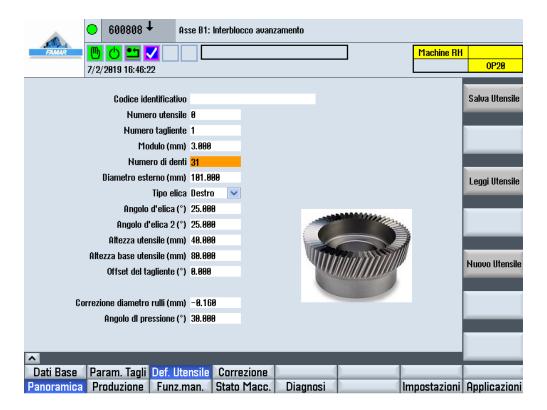


Figura 4.36: Pagina definizione dati geometrici relativi all'utensile per Skiving.

Le due pagine di interfaccia, tramite il salvataggio dei dati, generano un file di testo con la definizione di tutte le variabili per l'implementazione e per i calcoli effettuati nel file principale di gestione delle coordinate macchina.

Per quanto riguarda, invece, i parametri di lavorazione, è necessario fare riferimento alla figura 4.37. Infatti, come già accennato in precedenza, la definizione delle profondità di passata e delle velocità di avanzamento e di rotazione dei mandrini, avviene tramite una tabella.

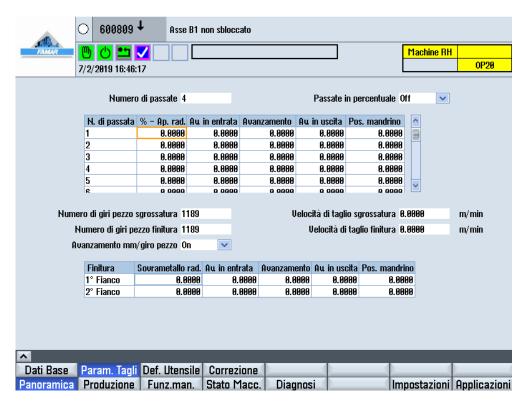


Figura 4.37: Pagina per definizione parametri di taglio.

Capitolo 5

Misurazione dentatura e test su macchina

5.1 Misurazione dentatura

La misurazione e il controllo dei parametri di dentatura sono stati effettuati sulla valutazione di alcune caratteristiche essenziali per un ingranaggio dentato. In particolare, è stato utilizzato un software di misurazione degli ingranaggi che restituisce un report grafico utile per la valutazione di:

- Profilo del dente → è valutato in funzione di 3 parametri geometrici che quantificano l'errore di forma del profilo del dente confrontato con quello teorico.
 Nell'analisi di questi parametri, il singolo dente viene esaminato lungo tutta la sua altezza spostandosi dal diametro di testa a quello di fondo o viceversa. In particolare, la misurazione viene effettuata su quattro denti distinti sfasati di circa 90°:
- Angolo d'elica della dentatura → anche l'angolo d'elica della dentatura viene valutato in funzione di 3 parametri distinti. In questo caso, il fianco del dente viene esaminato parallelamente all'asse della dentatura in modo tale da percorrere l'intera larghezza di fascia dell'ingranaggio. Come prima, vengono effettuale le misurazioni su quattro denti disposti a 90° in modo tale da avere un quadro completo su tutta la dentatura;
- Passo della dentatura → la valutazione del passo della dentatura viene effettuata andando a tastare tutti i denti dell'ingranaggio alternativamente prima sul fianco destro e poi sul sinistro. I risultati sono riportati nella seconda pagina del report di misura e sono anche schematizzati sia per forma grafica sia per forma analitica;
- Run-out radiale → la valutazione dell'errore di run-out radiale controlla la forma e l'orientamento della superficie misurata durante la rotazione attorno ad un asse di riferimento;
- Misurazione circonferenze → la misurazione delle circonferenze principali della dentatura viene rappresentata nell'ultima pagina del report e indica i valori massimi, minimi e medi sia per il diametro di testa che per quello di fondo. In questa sezione è riportato anche il valore della circolarità dei due diametri misurata su un campione di solo 4 denti.

Per ogni caratteristica appena enunciata, il software di misurazione produce un grafico per rendere più semplice l'interpretazione dei risultati. Il grafico è supportato anche da un insieme di valori numerici per una migliore identificazione degli errori in gioco.

Per facilitare la comprensione dei report di misurazione utilizzati nella fase di test sperimentale, si riportano degli estratti per descrivere più nel dettaglio tutti i parametri di misurazione e di classificazione della qualità della dentatura.

5.1.1 Profilo del dente

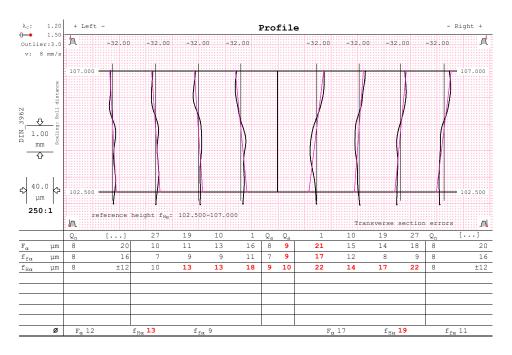


Figura 5.1: Estratto report misurazione dentature - Profilo del dente

Il profilo del dente viene esaminato, come già accennato, sulla base di alcune misurazioni condotte su quattro denti sfasati tra loro di circa 90°. In figura 5.1, è possibile osservare il profilo destro e quello sinistro dei fianchi dei quattro denti misurati. In particolare, la linea nera sottile rappresenta l'andamento teorico che dovrebbe avere il dente, quella nera spessa l'andamento reale della dentatura, mentre la linea rossa sottile è un'interpolazione lineare dell'andamento reale. Come si può osservare, l'andamento reale si discosta da quello teorico lungo tutta l'altezza del dente.

Analiticamente, la forma del profilo del dente è descritta da 3 parametri che sono riportati inferiormente alla figura. In particolare:

• F_{α} rappresenta la deviazione totale del profilo ed è classificata come la distanza orizzontale tra due profili nominali che racchiudono l'effettivo andamento del profilo lungo la lunghezza L_{α} di valutazione del profilo. Per l'identificazione di questa variabile è necessario analizzare il dente in un piano normale all'asse della dentatura.

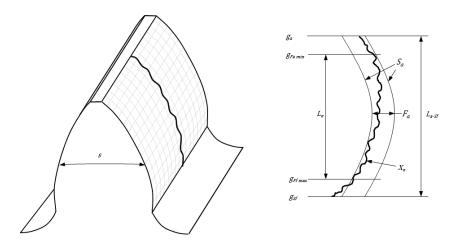


Figura 5.2: Valutazione parametro F_{α} .

• $f_{f\alpha}$ rappresenta la deviazione del profilo effettivo rispetto all'andamento medio del profilo attuale. Anche in questo caso viene esaminato lungo la lunghezza L_{α} di valutazione del profilo. L'errore di deviazione della forma del profilo può essere causato, per esempio, dall'usura degli utensili da rettifica, da una progettazione errata degli utensili da rettifica o da vibrazioni durante la fase di misurazione o di realizzazione della dentatura.

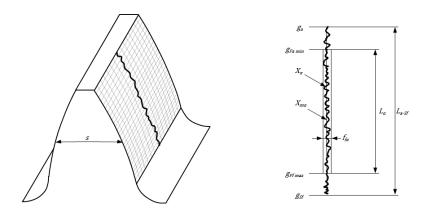


Figura 5.3: Valutazione parametro $f_{f\alpha}$.

• $f_{H\alpha}$ rappresenta la deviazione dell'inclinazione del dente. Identifica la deviazione dell'angolo di pressione effettivamente misurato, rispetto a quello teorico della dentatura. La deviazione dell'inclinazione del dente è causata solitamente dall'usura sull'utensile in lavorazione. Per il segno della deviazione angolare si rimanda alla norma DIN 21772.

In figura 5.1, è possibile osservare come, per ognuno dei quattro denti analizzati, vengano valutati tutti e tre i fattori descrittivi relativi alla forma del profilo dei fianchi del dente. In particolare, nella colonna Q_n è possibile osservare il livello di qualità desiderato dalla dentatura per questi tre parametri e il valore numerico limite degli

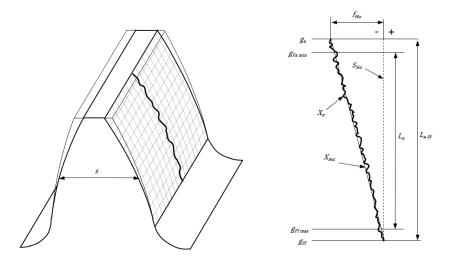


Figura 5.4: Valutazione parametro $f_{H\alpha}$.

stessi. I valori sono espressi in μm . La qualità ottenuta Q_a , in funzione dei valori misurati, è riportata nelle colonne centrali, sia per il fianco destro sia per il sinistro. L'ultima riga della tabella riporta i valori medi dei quattro denti analizzati in modo tale da poter classificare nel complesso la dentatura.

5.1.2 Angolo d'elica della dentatura

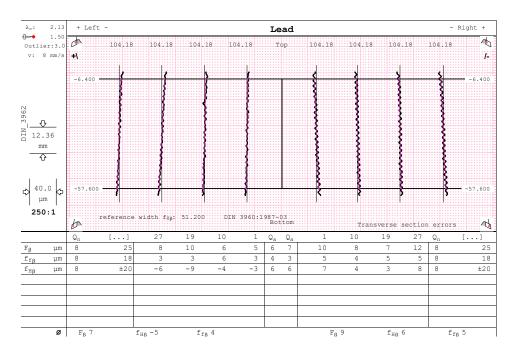


Figura 5.5: Estratto report misurazione dentature - Elica dentatura

Anche in questo caso, l'analisi è condotta su quattro denti sfasati tra di loro di 90°. Si effettua la misurazione dell'elica del dente lungo tutta la lunghezza di fascia

dell'ingranaggio. Come già accennato per la forma del profilo, nell'andamento grafico è possibile visualizzare tre curve che rappresentano l'andamento teorico (curva nera sottile), l'andamento reale (curva nera spessa) e l'interpolazione lineare dell'andamento effettivo (curva rossa).

I parametri che descrivono analiticamente l'andamento dell'elica della dentatura sono:

• F_{β} rappresenta la deviazione totale intesa come distanza orizzontale tra due andamenti nominali che racchiudono l'intero profilo effettivo ottenuto sul fianco del dente. La lunghezza del tratto di valutazione L_{β} non coincide con la larghezza fascia della dentatura.

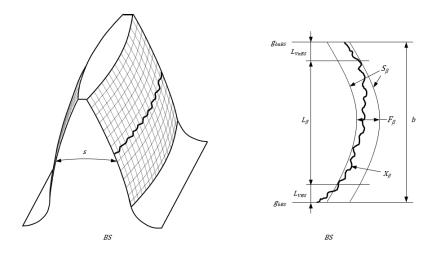


Figura 5.6: Valutazione parametro F_{β} .

• $f_{f\beta}$ rappresenta la deviazione di forma del fianco effettivamente prodotto rispetto all'interpolazione mediata dell'andamento reale. Anche questo parametro, così come per $f_{f\alpha}$, è un errore legato principalmente all'usura degli utensili di rettifica, ad una progettazione errata degli stessi o a vibrazioni durante la fase di misurazione e realizzazione della dentatura.

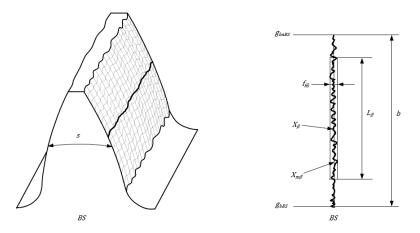


Figura 5.7: Valutazione parametro $f_{f\beta}$.

• $f_{H\beta}$ rappresenta la deviazione dell'angolo d'elica effettivo rispetto a quello teorico della dentatura. Il valore numerico può essere identificato come la distanza tra l'andamento effettivo medio del fianco e l'andamento teorico desiderato. Solitamente è un errore generato da un setup errato della macchina utensile o un posizionamento scorretto degli assi macchina.

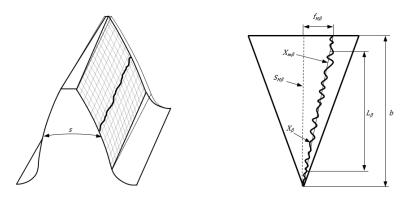


Figura 5.8: Valutazione parametro $f_{H\beta}$.

In figura 5.5, è possibile osservare che, per ognuno dei quattro denti esaminati, sono riportati anche i valori numerici delle grandezze appena citate. La colonna identificata con Q_n riporta il grado di qualità di quella caratteristica e i valori desiderati delle grandezze analizzate. Anche in questo caso i valori numerici sono espressi in μm e ogni dente misurato presenta i suoi valori per ogni grandezza. La qualità effettiva della dentatura è riportata nella colonna Q_a e il valore medio per ogni variabile è riportato nell'ultima riga della tabella.

5.1.3 Passo della dentatura

Il passo della dentatura viene valutato attraverso le rappresentazioni in *figura 5.9*. Inizialmente, viene misurato il passo esistente tra ogni coppia di denti dell'ingranaggio sia sul fianco destro che sul fianco sinistro. Come per la valutazione del profilo,

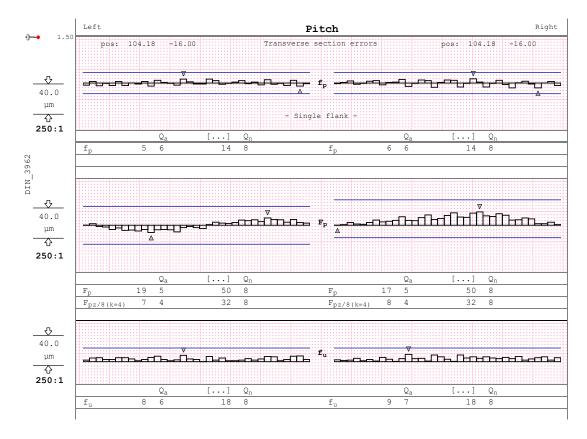


Figura 5.9: Estratto report misurazione dentature - Passo dentatura.

il valore dello scostamento dal passo teorico è riportando inferiormente alla figura ed è confrontato direttamente con il valore di scostamento massimo della dentatura desiderata.

Un'altra importante valutazione che viene effettuata è quella dell'errore sul passo valutato per tutti i denti dell'ingranaggio. Si ha quindi un andamento che tiene conto dell'errore cumulato di ogni singola coppia di denti, sia per il fianco destro e sia per il sinistro. La valutazione dell'errore sul passo cumulato è necessaria in quanto permette di escludere problemi di interferenza qualora tutti gli errori di passo siano sempre dello stesso segno. In questo caso, infatti, l'errore cumulato uscirebbe dalla zona di tolleranza massima evidenziando un probabile difetto di lavorazione.

Per ultimo, viene esaminato, sotto la variabile f_u , il salto di passo, sia per il fianco destro sia per il fianco sinistro. Il valore è relativo alla somma in modulo degli errori di passo riscontrati in due denti successivi. Anche in questo caso, un valore fuori tolleranza di f_u , potrebbe generare errori di interferenza tra ruote dentate.

5.1.4 Run-out radiale

Il run-out radiale corrisponde alla valutazione di un errore di oscillazione circolare radiale ed è misurato, come riportato in figura~5.10, andando a tastare tutti i denti dell'ingranaggio.

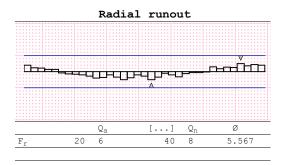


Figura 5.10: Estratto report misurazione dentature - Run-out.

Come per le altre grandezze, si riporta il valore nominale desiderato e quello effettivamente misurato, con la relativa qualità che ne deriva.

5.1.5 Misurazione circonferenze

Nell'ultima pagina del report di misura, sono riportate anche le misurazioni effettuate per quanto riguarda il diametro di fondo e il diametro di testa della dentatura.

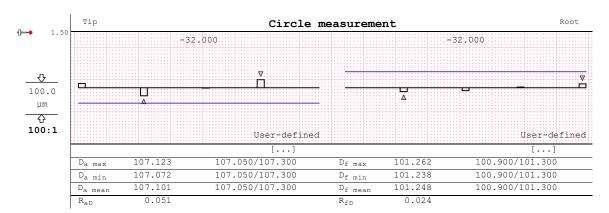


Figura 5.11: Estratto report misurazione dentature - Misurazione circonferenze.

La valutazione della dimensione del diametro di fondo e del diametro di testa, è affiancata dal valore minimo e dal valore massimo previsto dalla tolleranza.

Inoltre, come si vede in *figura 5.11*, viene valutato, prendendo in considerazione solo quattro denti, il valore dell'errore di circolarità di entrambi i diametri.

5.2 Test con pezzo in Teflon

Le prime prove su macchina sono state effettuate utilizzando un pezzo in Teflon. Questo, partendo da un grezzo, ha subito inizialmente una serie di lavorazioni meccaniche affinchè potesse avere, al momento della fase di dentatura, le dimensioni richieste da disegno.

Per l'esecuzione della dentatura sul pezzo di prova, sono stati scelti i parametri di taglio riportati in *tabella 5.1*.

	N. di passata	Prof. Passata diametrale	Avanzamento (mm/min)	Avanzamento (mm/dente)
	1	2	340	0,0085
Sgros.	2	1,7	340	0,0085
	3	1,3	340	0,0085
Finit.	4	0,8	114	0,0029
FIIII.	5	0,2	91	0,0023

Tabella 5.1: Parametri di lavorazione test su Teflon.

In questa fase non si è posta molta attenzione nella scelta dei suddetti parametri in quanto l'obiettivo di tale prova era quello di validare il corretto funzionamento del codice CNC trascurando, per il momento, le caratteristiche geometriche della dentatura.

Sono state effettuate 5 passate di taglio che sono suddivise in:

- 3 passate di sgrossatura;
- 2 passate di finitura.

Importante osservare che si è scelto di fornire al codice di controllo le profondità di passata in termini di coordinate diametrali e non in percentuale rispetto all'altezza del dente. La velocità di taglio viene automaticamente calcolata dal programma, come visto nel capitolo 4.5.2.3, una volta impostata dall'interfaccia grafica il valore della velocità di rotazione del pezzo sia per la fase di sgrossatura sia per la finitura.

La finitura dei fianchi della dentatura è stata momentaneamente trascurata per i motivi precedentemente descritti in merito all'obiettivo della prova.

Per quanto riguarda le 3 passate di sgrossatura è stato scelto un avanzamento piuttosto elevato in relazione alla profondità di passata; viceversa, per la finitura, l'avanzamento è stato ridotto notevolmente al fine di migliorare le qualità superficiali della lavorazione.

Il pezzo ottenuto dalla prima prova su componente in Teflon è visibile in figura 5.12. In questa prima fase è stata poi effettuata un'analisi prevalentemente visiva in modo tale da riscontrare problematiche relative alla programmazione CNC. Come si può osservare, la dentatura richiesta è stata realizzata con successo. Non sono visibili segni di errori di programmazione in quanto il passo della dentatura appare costante e il profilo del dente assume un andamento molto simile a quello effettivamente richiesto.

L'inserto scelto per la realizzazione della dentatura è stato progettato correttamente in quanto la forma del dente realizzato è paragonabile a quella richiesta.

Sulla base di queste osservazioni visive, si è confermata la corretta stesura del codice di controllo e si è quindi passati alla realizzazione di un pezzo in acciaio.



Figura 5.12: Foto test macchina su pezzo in Teflon.

5.3 Test con pezzo in acciaio

Successivamente, una volta validato il programma di lavorazione, è stato possibile effettuare una lavorazione di *Skiving* su un pezzo reale. Il grezzo di partenza è stato sottoposto inizialmente alla fase di tornitura e poi a quella di dentatura.

Pezzo n.0 I parametri di taglio sono stati scelti sulla base della prova effettuata con il pezzo in Teflon e sono riassunti nuovamente in *tabella 5.2*.

PEZZO N.0							
	N. di passata Prof. Passata diametrale Avanzamento (mm/min) Avanzamento (mm/dente)						
	1	2	340	0,0085			
Sgros.	2	1,7	340	0,0085			
	3	1,3	340	0,0085			
Finit.	4	0,8	114	0,0029			
riiii.	5	0,2	91	0,0023			

Tabella 5.2: Parametri di lavorazione test pezzo n.0.

Come già accennato si tratta di 3 passate di sgrossatura e 2 di finitura. In questa fase, l'importanza delle scelte riguardo le due operazioni di finitura diventa notevole in quanto produce delle conseguenze sulla qualità superficiale del pezzo. Con i parametri geometrici schematizzati in figura 4.35 e con i parametri di taglio in tabella 5.2, è stata realizzata la seguente dentatura.

Per la realizzazione del primo pezzo di prova, è stato seguito il ciclo di lavorazione standard senza apportare alcuna modifica al processo. In particolare, come già accennato, la fase di dentatura è stata realizzata per ultima, dopo aver portato a quota il pezzo (sia internamente che esternamente) con operazioni di tornitura.

Questa prima lavorazione è stata caratterizzata dalla presenza di vibrazioni che sono state percepite sia dal punto di vista uditivo e sia da quello visivo sul pezzo. Infatti, come si può osservare in *figura 5.13*, le superfici della dentatura ottenuta presentano importanti segni di vibrazioni e oscillazioni che si sono sviluppate nel contatto pezzoutensile durante le fasi di taglio di finitura.

Da un'attenta analisi della geometria del pezzo finito, si è osservato che potrebbe essere interessante, al fine di ottenere una migliore qualità superficiale, svolgere la fase



Figura 5.13: Dettaglio dentatura pezzo n.0.

di dentatura del pezzo non come ultima operazione del ciclo. Il ciclo di tornitura, infatti, prevedendo anche la sgrossatura interna del pezzo, tende a indebolire la struttura del componente in lavorazione, facilitando il fenomeno di risonanza del materiale. Infatti, durante tutta la fase di dentatura, l'utensile e il pezzo sono stati sottoposti a dei fenomeni di vibrazione che hanno generato un rumore fastidioso e una finitura superficiale non ottimale.

A questo proposito, si è pensato di realizzare prima la sgrossatura e la finitura esterna del pezzo, poi la dentatura e infine la lavorazione interna. In questo modo, durante la fase di dentatura, si avrebbe uno spessore maggiore del pezzo con minori possibilità di generazione di vibrazioni.

Il pezzo n.0 non è stato sottoposto a misurazione in quanto è stato scartato subito a causa dei difetti di lavorazione evidenziati.

Sulla base di queste scelte, è stato realizzato il pezzo n.1.

Pezzo n.1 Il pezzo n.1 è stato realizzato, come già accennato, apportando delle modifiche al ciclo di lavorazione visto in precedenza. In particolare, la fase di tornitura interna del pezzo viene realizzata successivamente alla dentatura. In questo modo, quindi, il maggior spessore del pezzo in lavorazione riduce notevolmente i fenomeni di oscillazione riscontrati in precedenza.

PEZZO N.1							
	N. di passata Prof. Passata diametrale Avanzamento (mm/min) Avanzamento (mm/dente)						
	1	2	340	0,0085			
Sgros.	2	1,7	340	0,0085			
	3	1,3	340	0,0085			
Finit.	4	0,8	114	0,0029			
	5	0,2	91	0,0023			

Tabella 5.3: Parametri di lavorazione test pezzo n.1.

I parametri di taglio sono rimasti invariati in modo tale da valutare l'effetto di una singola modifica per volta e sono riassunti in tabella 5.3. La velocità di rotazione

imposta al pezzo è pari a 1141rpm e, di conseguenza, quella impostata per l'utensile vale 1288rpm. Alcune foto del pezzo realizzato sono riportate in figura 5.14.



Figura 5.14: Dentatura realizzata su pezzo in acciaio.

Come si può osservare dalle foto del pezzo, il problema relativo alle vibrazioni in lavorazione, riscontrato sul pezzo n.0, non risulta presente. Dunque, è stato supposto che lo spessore del materiale in lavorazione è un aspetto importante per quanto riguarda i fenomeni di risonanza che possono verificarsi sul pezzo. A questo proposito, quindi, il ciclo di lavorazione è stato modificato in modo tale da eseguire prima la dentatura e dopo la sgrossatura e finitura interna del componente.

A questo punto, non avendo riscontrato altre problematiche visive, il pezzo n.1 è stato misurato sulla base del *capitolo 5.1* ed è stato analizzato il report riportato in allegato. In particolare, qui di seguito, si effettua un'analisi critica dei principali problemi riscontrati in fase di valutazione della dentatura ottenuta.

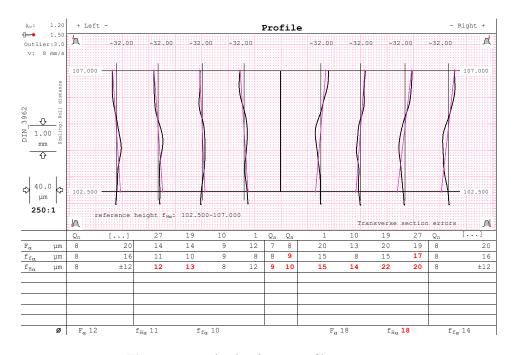


Figura 5.15: Analisi forma profilo pezzo n.1.

Si osserva facilmente che le problematiche principali della dentatura siano relative alla forma del profilo generato dall'utensile per *Skiving*. Infatti, in figura 5.15, è possibile osservare i principali fattori d'analisi che si discostano dal campo di tolleranza desiderato.

I grafici riportati, opportunamente scalati, riportano l'andamento effettivo del profilo del dente confrontato con quello teorico. Si riscontra che la deviazione totale del profilo risulta in tolleranza sia per quanto riguarda il fianco destro e sia per quello sinistro. Viceversa, alcune problematiche sono visibili riguardo la deviazione angolare $f_{H\alpha}$ e la deviazione del profilo rispetto all'andamento medio $f_{f\alpha}$.

Il fianco sinistro del profilo ottenuto è paragonabile a quello desiderato in quanto quasi completamente in tolleranza; per quanto riguarda il destro, lo scostamento dall'idealità risulta notevole soprattutto per il fattore di deviazione angolare $f_{H\alpha}$ che, valutato su tutta la dentatura, genera una qualità dell'ingranaggio di 10 non rispettando i requisiti minimi pari a 8.

Alcune modifiche ai parametri di taglio verranno effettuate nelle prossime prove al fine di ridurre al minimo questi scostamenti dai valori limite desiderati.

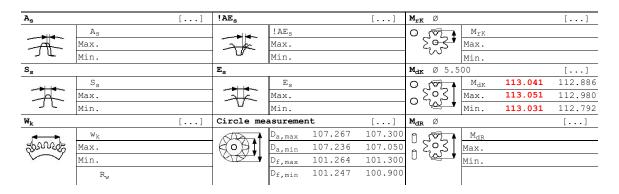


Figura 5.16: Analisi diametri riferimento pezzo n.1.

Un altro importante errore riscontrato nel primo pezzo è relativo alla misurazione della dentatura sui rulli. Infatti, come si osserva in *figura 5.16*, i valori misurati (medio, massimo e minimo) non rispettano i limiti imposti dai valori teorici.

In questo caso, per ottimizzare la misurazione sui rulli è stata effettuata una modifica sul programma di movimentazione degli assi in modo tale da effettuare una dentatura più profonda. In definitiva, è stato ridotto il valore del diametro di troncatura interno impostato a programma CNC. In questo modo si è pensato di effettuare un taglio più profondo con conseguente allargamento del vano tra due denti e diminuzione della misurazione sui rulli.

Pezzo n.2 Il pezzo n.2 è stato realizzato apportando alcune modifiche ai parametri di lavorazione in modo tale da modificare il profilo del dente e gli errori riscontrati nell'analisi del report di misura del pezzo n.1. In particolare, a differenza dei precedenti processi di lavorazione sono state utilizzate un maggior numero di passate di taglio, riducendo quasi al 50% il valore della profondità di passata. In particolare, sono stati utilizzati i parametri di taglio riportati in tabella 5.4.

	PEZZO N.2					
	N. di passata	Prof. Passata diametrale	Avanzamento (mm/min)	Avanzamento (mm/dente)		
	1	1	340	0,008513835		
	2	1	340	0,0085		
Sgros.	3	0,85	340	0,0085		
	4	0,85	340	0,0085		
	5	0,65	340	0,0085		
	6	0,65	340	0,0085		
Finit.	7	0,5	114	0,0028		
	8	0,5	114	0,0028		

Tabella 5.4: Parametri di lavorazione test pezzo n.2.

Sono state utilizzate 8 passate di taglio totali avendo ridotto opportunamente il numero delle profondità di passata e lasciando invariato il valore della velocità di rotazione e delle velocità di avanzamento.

Sul pezzo n.2 non risultano evidenti sostanziali cambiamenti geometrici visibili ad occhio nudo, dunque, il confronto è da effettuarsi sulla base dei report di misurazione.

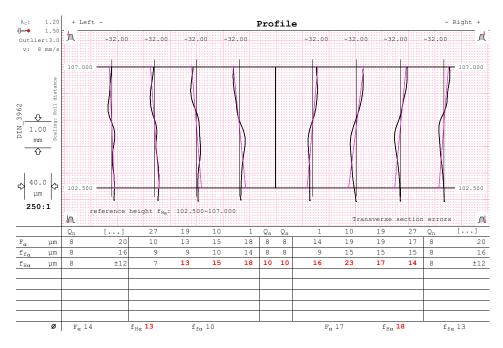


Figura 5.17: Analisi forma profilo pezzo n.2.

Le modifiche effettuate ai parametri di taglio, come già espresso, hanno prodotto delle modifiche sostanziali agli andamenti della forma del profilo del dente sui due fianchi di interesse. In particolare, si osserva che la deviazione dal valore medio è rientrata in tolleranza, sia per il fianco destro e sia per il sinistro. In questa seconda prova, però, con le modifiche apportate ai parametri di taglio, il fianco sinistro, che precedentemente era in tolleranza, presenta dei piccoli scostamenti dai valori limite e quindi risulta avere un andamento peggiore rispetto al pezzo n.1.

Avendo modificato da programma il valore del diametro di troncatura interna della dentatura, si osserva che la misurazione del diametro sui rullini è rientrata in tolleranza

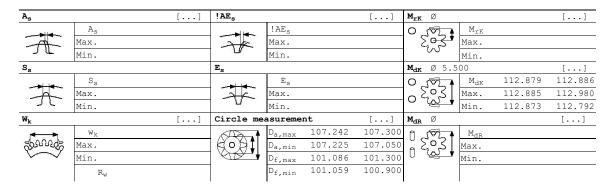


Figura 5.18: Analisi diametri riferimento pezzo n.2.

in quanto, come pensato, è stata effettuato un taglio più profondo con conseguente dilatazione del vano tra due denti.

La dentatura, quindi, risulta essere in tolleranza per quanto riguarda i parametri geometrici-dimensionali, ma non per quelli relativi alla forma del profilo dei denti.

Pezzo n.3 Il pezzo n.3 è stato realizzando sempre con lo stesso ciclo di lavorazione, ma sono stati modificati ancora una volta i parametri di lavorazione per provare a correggere gli errori di profilo riscontrati nel report di misura relativo al pezzo n.2. In particolare, è stato aumentato il valore dell'avanzamento lungo l'asse Z della macchina. Si riporta di seguito, in *tabella 5.5*, i parametri di taglio utilizzati.

	PEZZO N.3					
	N. di passata Prof. Passata diametrale Avanzamento (mm/min) Avanzamento (mm/min)					
	1	1	513	0,013		
	2	1	513	0,013		
Sgros.	3	0,85	456	0,011		
	4	0,85	456	0,011		
	5	0,65	342	0,009		
	6	0,65	342	0,009		
Finit.	7	0,5	228	0,006		
	8	0,5	228	0,006		

Tabella 5.5: Parametri di lavorazione test pezzo n.3.

Il pezzo non presenta, ad occhio nudo, sostanziali differenze rispetto alle prove precedenti. Anche in questo caso, quindi, l'analisi della lavorazione è stata effettuata sulla base del report di misura.

Utilizzare un avanzamento più elevato non ha prodotto conseguenze positive sulla forma del profilo della dentatura. Infatti, come si vede in *figura 5.19*, l'andamento risulta notevolmente peggiorato se confrontato con il pezzo n.1 e con il pezzo n.2. Quindi, questa modifica è stata parzialmente scartata effettuando una quarta prova con avanzamento in finitura minore.

Pezzo n.4 Per quanto riguarda il pezzo n.4, i parametri di taglio sono rimasti del tutto invariati a meno dell'avanzamento relativo alle due passate di finitura. Infatti, in questo caso si è deciso di diminuire il valore dell'avanzamento solo per le due passate

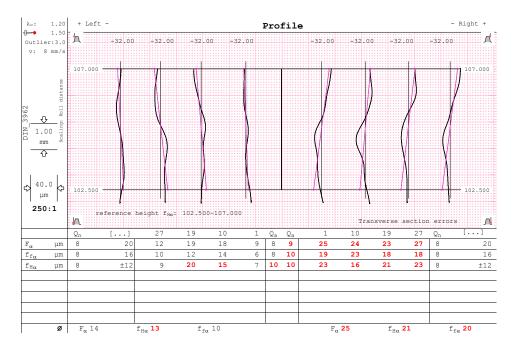


Figura 5.19: Analisi forma profilo pezzo n.3.

di finitura con l'obiettivo di ottimizzare il profilo della dentatura. I parametri di taglio utilizzati sono riportati in tabella 5.6 e il report di misurazione in figura 5.20.

	PEZZO N.4					
	N. di passata Prof. Passata diametrale Avanzamento (mm/min) Avanzamento					
	1	1	513	0,0128		
	2	1	513	0,0128		
Sgros.	3	0,85	456	0,0114		
bgros.	4	0,85	456	0,0114		
	5	0,65	342	0,0085		
	6	0,65	342	0,0085		
Finit.	7	0,5	171	0,0042		
	8	0,5	57	0,0014		

Tabella 5.6: Parametri di lavorazione test pezzo n.4.

La scelta di utilizzare un avanzamento più basso per le passate di finitura ha certamente migliorato la forma del profilo se confrontata con quella del pezzo n.4. Nonostante ciò, non è stato effettuato un grande passo avanti rispetto alla situazione globale del problema. Infatti, come si osserva in figura 5.20, il fianco destro risulta ancora una volta notevolmente fuori tolleranza. Tutti gli altri principali parametri della dentatura (angolo d'elica, passo e diametri principali) sono rimasti sempre all'interno dei limiti di tolleranza imposti e quindi non sono stati commentati.

Pezzo n.5 Alla fine dell'analisi relativa al pezzo n.4, si è giunti alla conclusione che una scelta di un numero maggiore di passate di taglio, con profondità minori, comporta solo un aumento notevole del tempo ciclo di realizzazione della dentatura senza sostanziali differenze sulle misurazioni del profilo. Si è quindi pensato di ritornare alla scelta iniziale di 5 passate di taglio suddivise in 3 di sgrossatura e 2 di finitura.

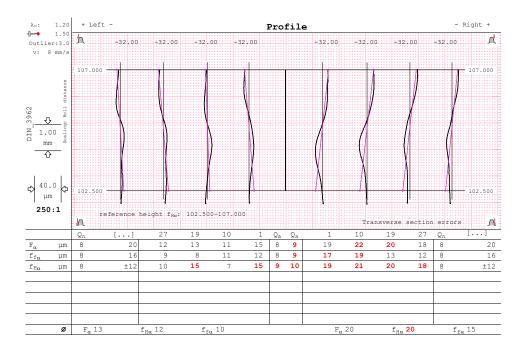


Figura 5.20: Analisi forma profilo pezzo n.4.

Inoltre, su suggerimento dei fornitori dell'utensile per Skiving, sono stati modificati i valori degli avanzamenti e della velocità di rotazione del pezzo. Infatti, la velocità di rotazione del pezzo è aumentata passando dal valore iniziale di 1141rpm a quello attuale di 1189rpm. Di conseguenza, la velocità di rotazione dell'utensile per Skiving è diventata pari a 1342rpm.

PEZZO N.5						
	N. di passata Prof. Passata diametrale Avanzamento (mm/min) Avanzamento (mm/dent					
Sgros.	1	2	356	0,0089		
	2	1,6	356	0,0089		
	3	1,4	356	0,0089		
Finit.	4	0,8	119	0,0030		
	5	0,2	95	0,0024		

Tabella 5.7: Parametri di lavorazione test pezzo n.5

Con queste modifiche riportate in tabella 5.7, si è realizzata una dentatura geometricamente descritta in figura 5.21. Come si osserva facilmente, il fianco sinistro risulta essere quasi completamente in tolleranza se si confronta il valore effettivo con quello teorico richiesto. Analogamente, anche il fianco destro, per quanto riguarda i parametri F_{α} e $f_{f\alpha}$, è molto prossimo all'idealità. Sono state quindi confermate le modifiche effettuate a livello di parametri di taglio avendo ottenuto la miglior combinazione di risultati.

Una sostanziale deviazione risulta ancora presente sul fianco sinistro relativamente all'errore d'inclinazione del fianco del dente.

Pezzo n.6 Durante la fase di analisi del pezzo n.5 è stato riscontrato un errore di correzione sulla dentatura. In particolare, l'errore di dentatura relativo alla misurazione

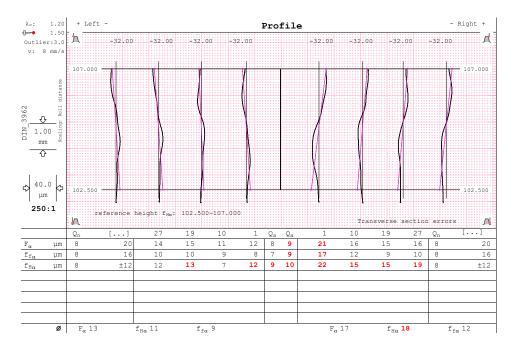


Figura 5.21: Analisi forma profilo pezzo n.5.

su rullini del pezzo n.1 era stato compensato con l'esecuzione di una passata di taglio più profonda rispetto al diametro di fondo del dente. In questo modo, però, oltre a diminuire il diametro sui rulli, si tende anche a ridurre il diametro di troncatura interna della dentatura (anche se ancora in tolleranza).

Per ovviare a questa problematica, la correzione del diametro sui rulli è stata effettuata utilizzando due passate di finitura che non lavorassero sul diametro di troncatura interna della dentatura, ma sui fianchi laterali dei denti. In definitiva, è stato modificato lo sfasamento tra i due mandrini in modo tale da allargare la cava tra due denti senza modificare i diametri di troncatura.

A questo proposito è stato modificato un parametro di correzione visibile nelle pagine interfaccia in modo tale che l'algoritmo di controllo possa calcolare l'offset di sfasamento dei due mandrini per le due passate di finitura, come già spiegato nel capitolo 4.5.2.2. Infatti, come si osserva in figura 4.36, al parametro relativo alla correzione del diametro sui rulli è stato assegnato un valore pari a 0.160mm in modo tale da sfasare i mandrini per recuperare questo errore. Dovendo ridurre il valore della misurazione sul diametro dei rulli, è stato assegnato un valore negativo alla variabile in questione.

	PEZZO N.6					
	N. di passata Prof. Passata diametrale Avanzamento (mm/min) Avanzamento (mm/d					
	1	2	356	0,0089		
Sgros.	2	1,6	356	0,0089		
ogros.	3	1,4	356	0,0089		
	4	0,8	119	0,0030		
Finit.	5	0,2	95	0,0024		
	6	0,2	95	0,0024		

Tabella 5.8: Parametri di lavorazione test pezzo n.6

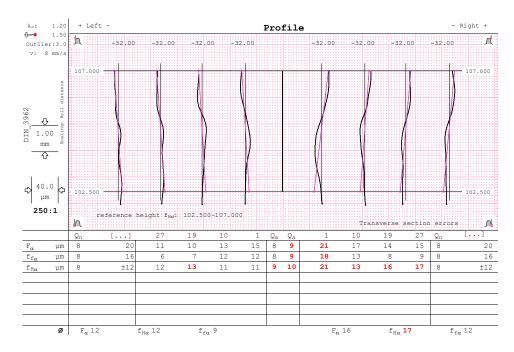


Figura 5.22: Analisi forma profilo pezzo n.6.

Si osserva quindi che, a parità di parametri di taglio utilizzati non è stata riscontrata alcuna differenza rispetto ai dati della prova precedente. Infatti, fianco destro e fianco sinistro risultano essere ancora in tolleranza, a meno della deviazione presente sul fianco destro relativa all'inclinazione del dente.

Una sostanziale differenza, invece, è stata notata sulla misura dei diametri principali della dentatura.

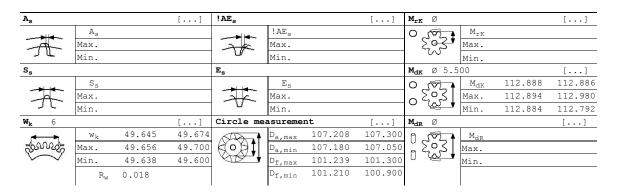


Figura 5.23: Analisi diametri riferimento pezzo n.6.

Come già accennato le due operazioni di finitura lavorano solo sui fianchi della dentatura in modo tale da compensare l'errore di misurazione sui rulli riscontrato nel pezzo n.2. Con questa modifica, quindi, il diametro di troncatura interna è aumentato, rispetto al pezzo n.2, di circa 0.150mm avvicinandosi al valore teorico impostato da programma. Le due passate di finitura, però, avendo lavorato sui fianchi, hanno allargato il vano tra due denti, riportando in perfetta tolleranza anche la misura della dentatura sui rullini.

Questa configurazione di dati utilizzati risulta essere la più affidabile e quella che rispetta al meglio le caratteristiche geometriche e dimensionali richieste dal cliente.

Pezzo n.7 Per provare ad ottimizzare l'errore di profilo riscontrato si è pensato di modificare l'angolo di inclinazione dell'utensile per Skiving in modo tale da verificare l'influenza dell'angolo Σ sul profilo del dente. In questa fase, è stato variato l'angolo di inclinazione dell'utensile di una quantità pari a 1' utilizzando sempre gli stessi parametri di taglio.

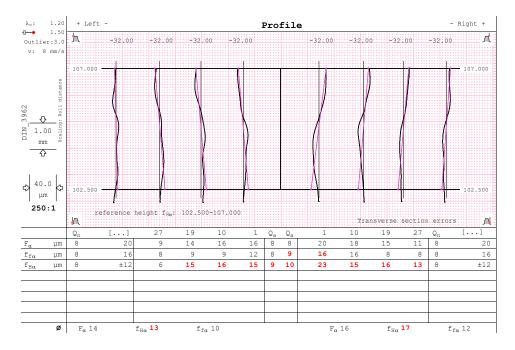


Figura 5.24: Analisi forma profilo pezzo n.7.

In definitiva non si è riscontrata alcuna importante variazione delle variabili analitiche che descrivono la dentatura.

Pezzo n.8 In questo pezzo, l'angolo di inclinazione dell'utensile ha subito una variazione di 5' rispetto alle condizioni nominali. I parametri di taglio utilizzati sono rimasti invariati.

Anche in questa ultima prova le differenze sono davvero minime. Si è deciso di non modificare ancora il valore dell'angolo d'inclinazione dell'utensile, in quanto lo stesso non è stato progettato per lavorare in condizioni geometriche differenti dall'idealità.

In conclusione, quindi, la condizione ottimale di taglio selezionata è stata quella relativa al pezzo n.6. Probabilmente, gli errori legati alla forma del profilo del dente sono dovuti principalmente alla progettazione dell'utensile. Infatti, utilizzato un utensile da *Skiving* ad inserti, la geometria della dentatura realizzata dipende dalle tolleranze e dagli errori di ogni singolo inserto dell'utensile. Non è stato possibile effettuare un collaudo sulla fresa da *Skiving* essendo sprovvisti della strumentazione necessaria per la sua misurazione. Quindi, in accordo con il cliente della macchina utensile, è

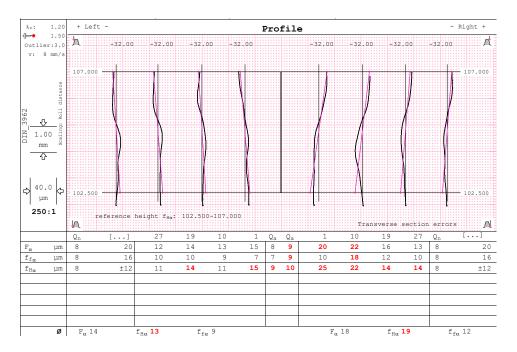


Figura 5.25: Analisi forma profilo pezzo n.8.

stata accettata la soluzione relativa al pezzo n.6 visto che i principali parametri geometrici legati alla lavorazione e alla disposizione degli assi macchina rientrano tutti in tolleranza.

5.4 Collaudo finale

Una volta individuata la configurazione ideale dei parametri di taglio per l'esecuzione della lavorazione, è stato effettuato il collaudo della macchina al fine di valutare statisticamente i risultati ottenuti realizzando 50 pezzi in serie. Il collaudo è stato eseguito con ciclo automatico senza alcun intervento dell'operatore. In particolare, i pezzi grezzi sono stati caricati manualmente sul trasporto in ingresso della macchina destra poi, tramite la programmazione macchina, il controllo numero ha effettuato tutte le operazioni che possiamo suddividere in:

- Carico macchina destra → il mandrino principale della macchina destra si sposta nella zona di carico-scarico della macchina e preleva il pezzo grezzo posizionato sul trasporto;
- Lavorazione OP10 → la macchina utensile di destra esegue le operazioni di tornitura previste nella prima fase di realizzazione del pezzo;
- Scarico macchina destra → completate le prime operazioni di tornitura, il mandrino ritorna nella posizione di carico-scarico e rilascia il semilavorato sul trasporto;
- ullet Ribaltamento pezzo \to nella zona intermedia tra le due macchine, è presente un braccio meccanico che ha il compito di ribaltare il pezzo in modo tale da

effettuare le operazioni in OP20 sulla macchina sinistra. In questa fase, il pezzo viene ribaltato e spostato dal trasporto di destra a quello di sinistra;

- Carico macchina sinistra → il mandrino principale della macchina sinistra si sposta nella zona di carico-scarico della macchina e preleva dal trasporto il pezzo proveniente dal ribaltatore;
- Lavorazione OP20 → la macchina utensile di sinistra esegue le operazioni di tornitura e di dentatura previste nella seconda fase di realizzazione del pezzo;
- Scarico macchina sinistra → completate le seconde lavorazioni, il mandrino ritorna nella posizione di carico-scarico e rilascia il pezzo finito sul trasporto.

Il procedimento è stato eseguito in automatico fino alla realizzazione di 50 pezzi che sono poi stati analizzati singolarmente per valutare la consistenza del processo e della macchina di lavorazione. In particolare, mi concentrerò sull'analisi dei risultati di dentatura, tralasciando la parte relativa alle misurazioni di tornitura.

Ai fini della valutazione della dentatura, è stata effettuata la misurazione del diametro sui rulli dell'intero campione di pezzi mentre, per quanto riguarda la forma del profilo, sono stati esaminati solo 10 semilavorati.

In particolare, in *figura 5.26*, si riportano le misurazioni effettuate su tutti i pezzi realizzati durante la fase di collaudo.

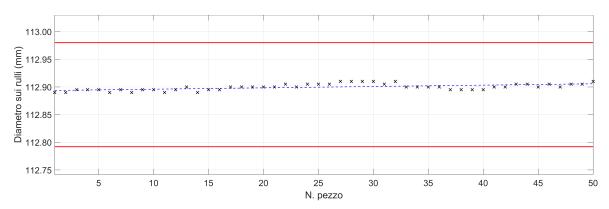


Figura 5.26: Risultati collaudo Skiving.

Sulla base dei risultati di misura ottenuti sui pezzi di collaudo, sono stati calcolati due fattori statistici per stimare la stabilità del processo esaminato. In particolare, trattandosi di un processo stabile e in controllo, sono stati valutati il C_p e il C_{pk} che hanno riportato i seguenti valori:

$$C_p = \frac{LimSup - LimInf}{6\sigma} = 5.21$$

$$C_{pk} = min\left(\frac{LimSup - ValMed}{3\sigma}, \frac{ValMed - LimInf}{3\sigma}\right) = 4.43$$

dove σ corrisponde alla varianza dei valori misurati rispetto ai limiti imposti dalla tolleranza.

Dalle formule si evince facilmente che il valore del C_p risulta tanto maggiore quanto minore è la varianza dei dati. Il C_p è un'indicazione di quale sarebbe il numero di dati al di fuori dei limiti se il processo fosse perfettamente centrato al valore di target definito e se questo fosse centrato rispetto ai limiti imposti. La valutazione del C_{pk} è necessaria, quindi, al fine di valutare la distanza del valore medio dei valori rispetto ai due limiti di tolleranza.

Normalmente, un obiettivo minimo riguardo i valori di C_p e di C_{pk} è pari a 1.67.

Come si osserva, l'andamento della quota misurata durante l'intero processo di collaudo risulta essere leggermente crescente. In definitiva, sulla base dei valori di C_p e di C_{pk} e sulla base di un andamento poco oscillante durante la prova e quasi completamente centrale sulla banda di tolleranza, il processo di lavorazione e i pezzi hanno riscontrato un esito positivo.

Capitolo 6

Modellazione controllo asse V

In questo capitolo, disponendo di alcuni dati sperimentali della macchina utensile, è stata realizzata la modellazione analitica del sistema meccanico relativo all'asse V della macchina. In particolare, trattandosi di un controllo velocità, sono state prima ricavate le equazioni analitiche che descrivono il sistema e poi, attraverso uno schema a blocchi, è stato ottimizzato il modello matematico al fine di valutare e confrontare la risposta del modello con quella sperimentale della macchina utensile.

6.1 Equazioni modello matematico

Le equazioni del modello matematico sono ricavate sulla base della componentistica meccanica che interessa l'asse V della macchina utensile. In particolare, dovendo monitorare la velocità di rotazione imposta dal motore elettrico, è interessante la modellazione analitica del motore che, fornendo una coppia motrice al sistema meccanico, impone il moto di rotazione all'asse. In particolare, quindi, è necessario individuare lo specifico motore elettrico utilizzato sull'asse in questione.

Si tratta di un motore sincrono trifase che, per semplicità di modellazione, viene approssimato ad un motore a corrente continua. Lo schema elettrico di un motore a corrente continua è quello osservabile in *figura 6.1*:

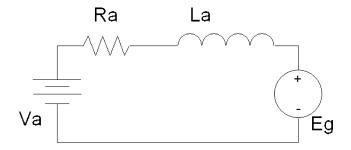


Figura 6.1: Schema elettrico motore a corrente continua.

Il circuito è sostanzialmente un circuito elettrico RL in cui vi è anche una forza elettro-motrice f.e.m. proporzionale alla velocità angolare del rotore $f.e.m. = k_e \cdot \omega$. Risolvendo la maglia del circuito si ha:

$$V_A = Ri + L\frac{di}{dt} + k_e \omega \tag{6.1}$$

La coppia erogata in un motore elettrico a corrente continua è proporzionale alla corrente i con una costante di proporzionalità k_c , corrispondente sia alla costante di coppia sia alla costante di tensione.

$$C_m = k_c i = k_e i$$

I valori di R, L, k_e sono incogniti e possono essere ricavati dal datasheet del motore elettrico in questione anche se utilizzare un modello di motore a corrente continua risulta essere una forte approssimazione del nostro caso sperimentale.

La componentistica meccanica, invece, è modellata sulla base dello schema in figura 6.2:

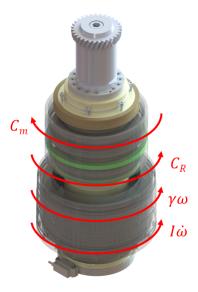


Figura 6.2: Schema bilancio meccanico del sistema.

Sulla base dello schema in *figura 6.2*, l'equazione di bilancio meccanico di equilibrio alla rotazione può essere scritta come:

$$C_m = I\dot{\omega} + \gamma\omega + C_R \tag{6.2}$$

In questo caso, tutti gli attriti del sistema sono stati modellati, per semplicità di calcolo, con un andamento lineare al variare della velocità di rotazione. La coppia

resistente, invece, coincide con la coppia frenante generata dalle forze di taglio durante tutto il processo di lavorazione.

Riassumendo, quindi, le equazioni analitiche che descrivono in comportamento elettrico, magnetico e meccanico del sistema in questione sono:

$$\begin{cases} V_A = Ri + L\frac{di}{dt} + k_e \omega \\ C_m = k_c i = k_e i \\ C_m = I\dot{\omega} + \gamma\omega + C_R \end{cases}$$

$$(6.3)$$

Sulla base di queste equazioni, è stato poi realizzato un modello a blocchi per l'implementazione del sistema fisico su un software di simulazione analitica. In particolare, lo schema a blocchi è osservabile in figura 6.3:

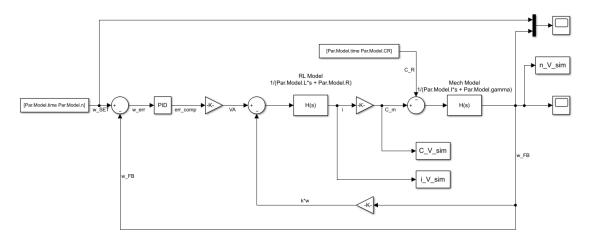


Figura 6.3: Schema a blocchi modello asse V.

In particolare, si tratta di uno schema a blocchi di un controllo velocità all'interno del quale vengono risolte le equazioni scritte in precedenza in modo tale da monitorare il valore della velocità di rotazione dell'asse in funzione del tempo.

6.2 Valutazione parametri del modello

I parametri del modello sono stati valutati singolarmente in funzione dei dati sperimentali o delle caratteristiche del motore. Come già accennato in precedenza, il motore è stato approssimato ad un motore a corrente continua i cui parametri elettrici sono stati ricavati dal Datasheet del motore effettivo.

In particolare:

$$R = 0.933\Omega$$
$$L = 4.927mH$$

La costante elettrica e la costante di coppia sono state supposte uguali e sono state calcolate in funzione dei dati sperimentali di corrente e di coppia, rispettivamente, assorbita e generata dalla macchina utensile.

Infatti, valutando l'andamento medio a regime di coppia e corrente del motore, si è ricavato:

$$k_e = k_c = 2.48Nm/A$$

La valutazione dei parametri meccanici, anche in questo caso, ha avuto delle basi sperimentali e delle basi di calcolo. In particolare, il momento d'inerzia del sistema è stato ricavato dal software di modellazione 3D e vale:

$$I = 135150 \cdot 10^{-6} kgm^2$$

Il coefficiente d'attrito γ è stato ricavato da un calcolo sui dati sperimentali. In particolare, osservando l'andamento della coppia motrice sperimentale in *figura 6.4* si nota che si possiedono i dati relativi ad un primo tratto di movimentazione dell'asse a vuoto (senza lavorazione meccanica) e, dopo circa 4 secondi di acquisizione, di una fase di lavorazione.

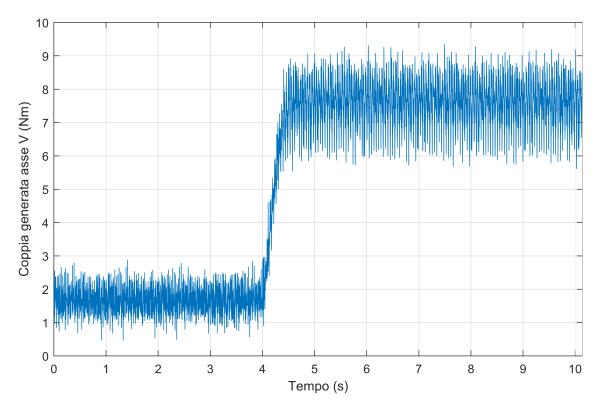


Figura 6.4: Coppia motrice sperimentale.

Utilizzando questo andamento, è stato possibile valutare il valor medio di coppia motrice generata dal motore nella fase senza lavorazione. Ricordando l'equazione di bilancio si ha:

$$C_m = \gamma \dot{\omega} + \gamma \omega + \delta_R$$

dove la parte relativa all'inerzia è nulla perchè sistema a velocità costante, la coppia resistente è assente perchè non siamo in fase di lavorazione. Si ha quindi:

$$C_m = \gamma \omega$$

da cui, nota la velocità di rotazione si ha:

$$\gamma = \frac{C_m}{\omega} = 0.0114 \frac{Nm}{rad/s}$$

Una volta determinati tutti i parametri fisici del modello, è stato eseguito uno studio sulle funzioni di trasferimento in modo tale da valutare preventivamente la bontà della modellazione e per individuare i parametri del controllore PID utilizzato.

6.3 Analisi funzioni di trasferimento OL e CL

Lo studio approfondito delle funzioni di trasferimento del modello è stato necessario al fine di quantificare l'accuratezza e la stabilità del modello appena creato. In particolare, l'ottimizzazione delle stesse è stata effettuata in funzione dei parametri del controllore PID utilizzato.

Volendo valutare la funzione di trasferimento in open-loop e in closed-loop del sistema è stata effettuata una prima semplificazione del modello matematico basata sullo svolgimento parziale delle equazioni viste in precedenza. Infatti, partendo dalle 3 equazioni del modello, e volendo estrapolare la velocità di rotazione ω si ottiene:

$$\omega = \frac{k_c}{LIs^2 + (RI + L\gamma)s + R\gamma + k_ek_c}V_A - \frac{R + Ls}{LIs^2 + (RI + L\gamma)s + R\gamma + k_ek_c}C_R$$

Si osserva, dunque, che la velocità di rotazione ω modellata è dovuta a due contributi: uno relativo alla tensione di armatura del circuito elettrico, e l'altro relativo al disturbo del modello che, in questo caso, è rappresentato dalla coppia resistente derivante dalle forze di taglio della lavorazione. Importante osservare anche l'utilizzo della trasformata di Laplace s per la risoluzione rapida delle equazioni differenziali lineari.

Il modello, quindi, può essere semplificato come in figura 6.5.

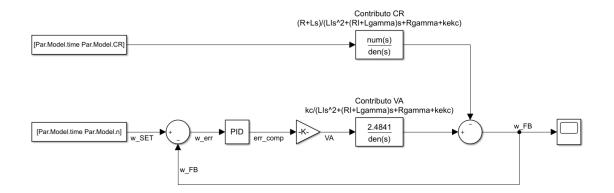


Figura 6.5: Schema a blocchi semplificato modello asse V.

A questo punto, quindi, ipotizzando una coppia resistente nulla, risulta più semplice la valutazione e il calcolo delle funzioni di trasferimento del sistema, sia per quanto riguarda quella in OPEN-LOOP sia per quella in CLOSED-LOOP.

Infatti, le funzioni di trasferimento risultano essere calcolate come segue:

$$FT_{OL} = \frac{FB}{ERR} = \frac{k_A \cdot G_{PI} \cdot k_c}{ILs^2 + (RI + L\gamma)s + R\gamma + k_e k_c}$$

che, usando un controllo proporzionale-integrativo PI diventa:

$$FT_{OL} = \frac{FB}{ERR} = \frac{k_A \cdot k_c}{ILs^2 + (RI + L\gamma)s + R\gamma + k_e k_c} \cdot \left(k_p + \frac{k_I}{s}\right)$$
(6.4)

Allo stesso modo, e utilizzando lo stesso schema a blocchi semplificato è stata calcolata la funzione di trasferimento in CLOSED-LOOP del modello.

$$FT_{CL} = \frac{k_A \cdot k_c}{ILs^2 + (RI + L\gamma)s + R\gamma + k_e k_c} \cdot \left(k_p + \frac{k_I}{s}\right)$$

$$(6.5)$$

Adesso, note le funzioni di trasferimento del sistema, è stato effettuato un processo di ottimizzazione dei parametri k_p e k_I del controllo PI in modo tale da ottenere un modello stabile e accurato a regime.

Dopo il processo di studio, si sono ricavati i seguenti andamenti delle due funzioni di trasferimento calcolate in precedenza:

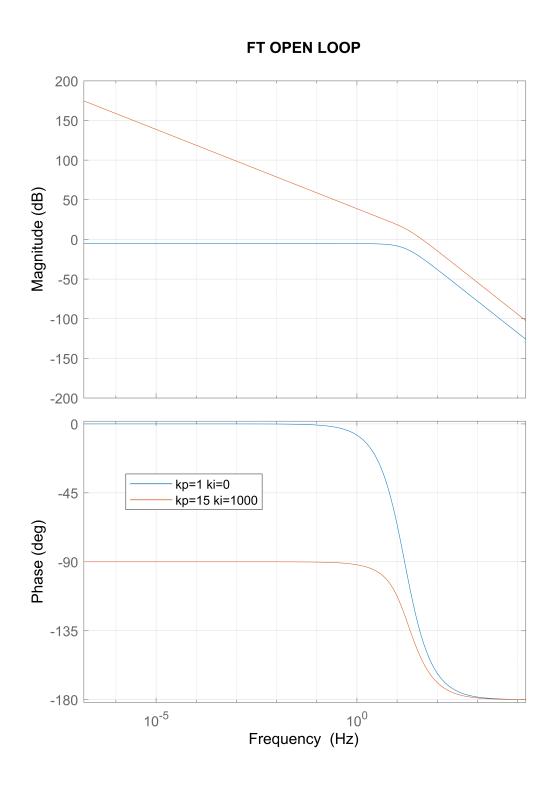
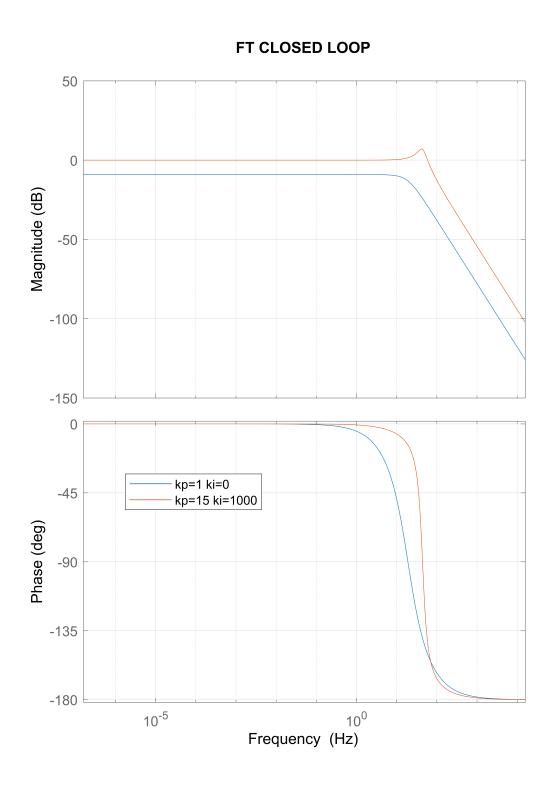


Figura 6.6: Andamendo FT in OPEN-LOOP.



 ${\it Figura~6.7:}$ Andamendo FT in CLOSED-LOOP.

Come già accenato, la scelta di k_p e k_I è stata effettuata in modo tale da ottimizzare gli andamenti delle due funzioni di trasferimento. In particolare si è cercato di ottimizzare:

- ACCURATEZZA → è stato inserito un controllo integrativo del tipo ^{s_I}/_s in modo tale che la FT in OPEN-LOOP, a regime, abbia un valore pressochè infinito. Questo significa che a regime il valore dell'errore tra il modello e il SET è praticamente nullo o trascurabile. Di conseguenza, sulla base della formula teorica di calcolo delle funzioni di trasferimento, il valore della FT di CLOSED-LOOP è nullo, vale a dire che il modello ricopre esattamente l'andamento di SET;
- STABILITÀ \rightarrow è garantita dall'introduzione di due parametri di valutazione quali Φ_M e G_M :
 - $-\Phi_M \rightarrow$ è un guadagno di fase e corrisponde ad un valore di circa $30^{\circ} \div 50^{\circ}$. In particolare, quando la FT in OL vale 0dB, la fase deve essere distante da 180° di almeno una quantità pari a Φ_M ;
 - $-G_M \rightarrow$ è un guadagno di ampiezza e corrisponde ad un valore di circa -8dB. Quando la fase della OL tende a -180° , il modello deve rispondere con un'ampiezza negativa, almeno pari al valore di G_M .

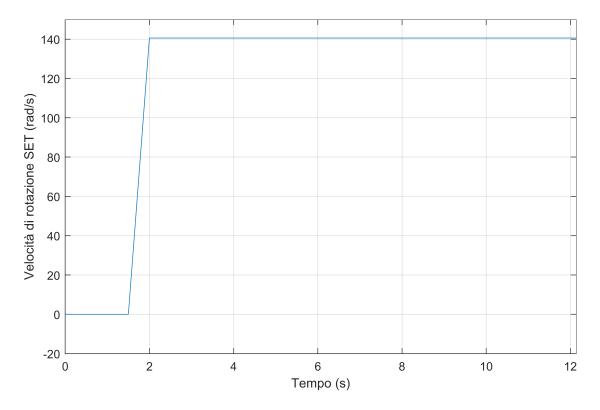
Una volta definiti tutti i parametri numerici del modello realizzato, sono state effettuate delle simulazioni in modo tale da confrontare i risultati che emergono dal modello matematico con quelli sperimentali ricavati direttamente dalla macchina utensile.

6.4 Simulazione modello matematico

A questo punto, definito il modello matematico di riferimento, è stata eseguita una simulazione numerica con lo scopo di confrontare i risultati che emergono dalla simulazione con quelli reali estrapolati dalla macchina utensile. In particolare, sulla base dello schema a blocchi in *figura 6.3*, è stato necessario realizzare un andamento di velocità di rotazione e di coppia resistente da fornire come input al modello matematico.

Per far lavorare il modello in condizioni simili a quelle reali, si è imposta una velocità di rotazione come in *figura 6.8*. In questo modo, si ipotizza di avere un sistema inizialmente fermo che successivamente, con accelerazione costante, tende al suo valore di regime.

Successivamente, dopo un certo intervallo di tempo imposto pari a 6s, inizia la lavorazione. Questo fenomeno è simulato dalla nascita di una coppia resistente come osservabile in *figura 6.9*. Il valore di coppia resistente è stato calcolato sulla base dei dati sperimentali, confrontando il valore di coppia motrice generata dal motore prima della lavorazione e quella generata durante il processo di taglio.



 ${\it Figura~6.8:}$ Andamento velocità di rotazione input modello.

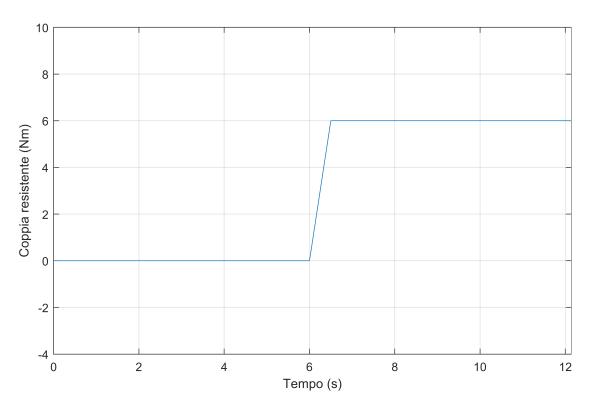


Figura 6.9: Andamento coppia resistente input modello.

Il modello matematico spiegato in precedenza ha prodotto i seguenti risultati:

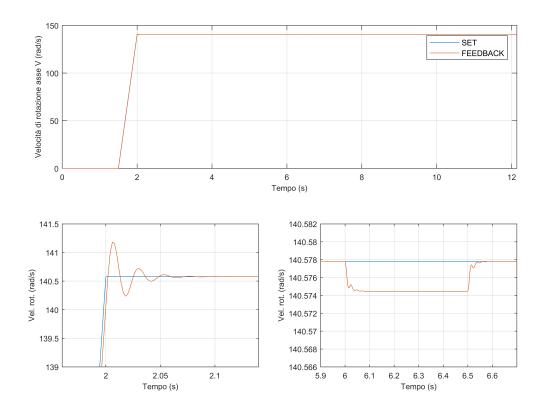


Figura 6.10: Andamento velocità di rotazione simulata modello.

Come si osserva in *figura 6.10*, il modello calcola un andamento molto simile a quello imposto come SET. Questo, dimostrato anche dallo studio precedente sulle FT, è segno di un elevata accuratezza a regime.

Nella fase di salita, in funzione del valore del guadagno proporzionale del controllore PI, l'andamento del modello presenta un lieve overshoot che si smorza sul valore di regime. Nel momento in cui interviene la coppia resistente, la velocità del modello cala bruscamente per poi, finito il transitorio di coppia, ritornare al valore di regime imposto inizialmente.

Come si può osservare, l'effetto della coppia resistente è davvero trascurabile. Questo fenomeno è dovuto principalmente a due fattori: in primis, il valore di coppia derivante dalla lavorazione è davvero piccolo in quanto l'effettiva sezione di truciolo lavorato è minimo; inoltre, l'elevata rigidezza del modello fa sì che, per avere una notevole influenza sulla velocità di rotazione, il valore di coppia resistente deve essere molto alto.

Utilizzando il modello analitico, si sono anche confrontati gli andamenti di coppia motrice e di corrente relativi al modello con quelli sperimentali della macchina utensile. Gli andamenti sono riportati in *figura 6.11* e 6.12.

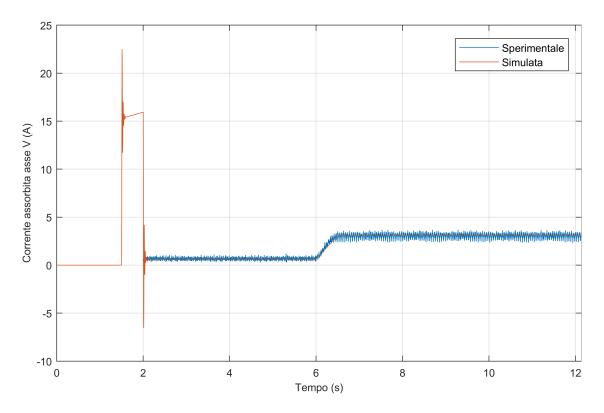


Figura 6.11: Andamento corrente assorbita simulata modello.

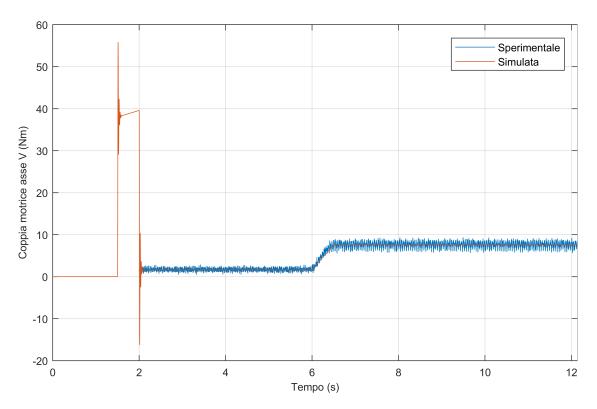


Figura 6.12: Andamento coppia motrice simulata modello.

Come si osserva, il modello ricopre esattamente quello che avviene nella realtà. Nella prima parte del grafico, non si disponevano i dati sperimentali dell'incremento di velocità dell'asse e quindi non è stato possibile effettuare un confronto. L'andamento risulta comunque plausibile in quanto, per avere un incremento di velocità lineare, è richiesto necessariamente un incremento della corrente assorbita dal motore e, di conseguenza, della coppia motrice in modo tale da vincere l'inerzia e gli attriti del sistema fisico in gioco.

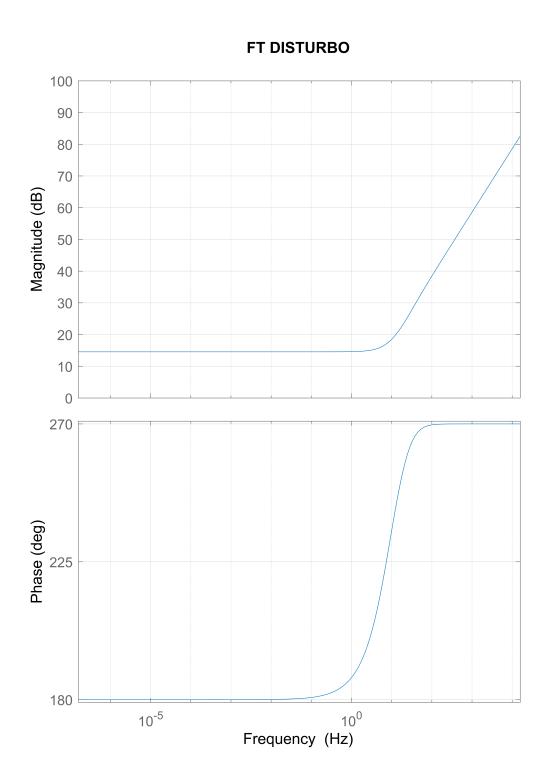
L'incremento di coppia resistente, sia nel modello che nella realtà, produce gli stessi effetti in termini di corrente e coppia motrice.

Come già accennato, l'influenza del disturbo di coppia sull'andamento della velocità di rotazione è minimo. Questo è giustificabile anche da uno studio sulla funzione di trasferimento che lega la coppia resistente alla velocità di rotazione. Infatti, si ha:

$$FT_{RIG} = \frac{C_R}{FB} = -\frac{LIs^2 + (RI + L\gamma)s + R\gamma + k_e k_c}{R + Ls}$$

$$\tag{6.6}$$

Riportando su un diagramma di Bode l'andamento si ottiene la *figura 6.13*. Come si osserva in figura, avendo un molto sempre positivo con valori molto elevati, per avere una importante influenza sulla velocità calcolata dal modello, è necessario un importante valore di coppia resistente.



 ${\it Figura~6.13:}$ Andamendo FT disturbo..

Conclusioni

In conclusione ritengo opportuno focalizzare l'attenzione sui principali risultati ottenuti dai test sperimentali sulla macchina utensile. In particolare, come visto nel capitolo 5, sono state effettuate una serie di prove sperimentali al fine di individuare la combinazione ottimale dei parametri di taglio che garantisse i risultati attesi.

Come già accennato, la soluzione scelta ha previsto anche una piccola modifica al ciclo di lavorazione del pezzo in modo tale da migliorare la qualità della lavorazione. Infatti, al fine di ridurre i fenomeni di vibrazioni riscontrati nei primi test, è stato pensato di effettuare prima la lavorazione di dentatura esterna e, solo dopo, la sgrossatura e finitura interna del pezzo. In questo modo, durante lo *Skiving*, lo spessore del pezzo è tale da non generare fenomeni di risonanza.

Sulla base di questa modifica di processo, è stata individuata la miglior combinazione di parametri di taglio riportati in tabella 6.1.

PARAMETRI DI LAVORAZIONE OTTIMALI - PEZZO N.6							
	N. di passata Prof. Passata diametrale Avanzamento (mm/min) Avanzamento (mm/dente)						
	1	2	356	0,0089			
Sgros.	2	1,6	356	0,0089			
bgros.	3	1,4	356	0,0089			
	4	0,8	119	0,0030			
Finit.	5	0,2	95	0,0024			
	6	0,2	95	0,0024			

Tabella 6.1: Parametri di lavorazione ottimali.

La misurazione del pezzo ottenuto con questi dati di processo ha riportato il grafico visibile in figura 6.14 relativamente alla forma del profilo del dente.

Come si evince dal grafico, alcuni parametri relativi alla forma del profilo sono fuori tolleranza. Il collaudo della macchina, però, ha comunque avuto un esito positivo in quanto, gli errori di forma riscontrati, sono da ricondurre principalmente alla geometria dell'utensile da taglio. Infatti, la variazione dei parametri di taglio o la variazione della geometria del processo, come osservabile negli altri test effettuati, non ha riportato variazioni significative sui risultati. Tutte le altre grandezze geometriche e di forma risultano perfettamente in tolleranza con quanto richiesto. È possibile visualizzare il report di misurazione completo in *Appendice*.

Il collaudo della macchina utensile è stato effettuato sulla base della realizzazione di 50 pezzi in serie con un processo automatico.

È stata eseguita una misurazione del diametro sui rulli sull'intero campione prodotto (50 pezzi), mentre gli andamenti della forma del profilo e le altre grandezze geometriche sono state valutate solo sul 10% del campione.

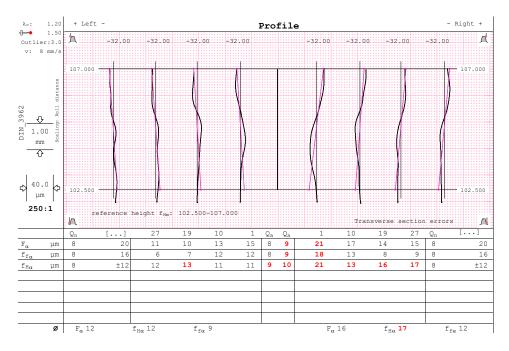


Figura 6.14: Analisi forma profilo pezzo n.6.

In figura 6.15, è possibile osservare l'andamento della variabile di interesse durante il processo di collaudo.

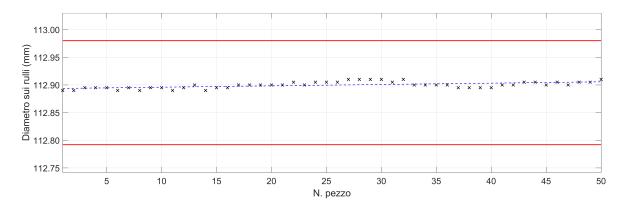


Figura 6.15: Risultati collaudo Skiving.

Si evince facilmente che tutti i pezzi realizzati rientrano in tolleranza. In particolare, è importante osservare che la quota è pressochè costante nel tempo, con un andamento leggermente crescente.

Relativamente al lavoro di modellazione del sistema meccanico, si è concluso che il modello realizzato rispecchia fedelmente le condizioni reali ricavate dai dati sperimentali. In particolare, come si vede in figura 6.16, la velocità del modello segue quella fornita in input. Una piccola oscillazione è presente alla fine del transitorio fino a quando il modello non si stabilizza sul valore di regime. Inoltre, l'inizio della lavorazione (circa a 6s), con conseguente aumento della coppia resistente, produce un aumento dell'errore non compensato che, viene recuperato a fine transitorio. L'errore dovuto all'inserimen-

to della coppia motrice è minimo a causa del basso valore di coppia resistente e a causa dell'elevata rigidezza dinamica del sistema che è stato modellato.

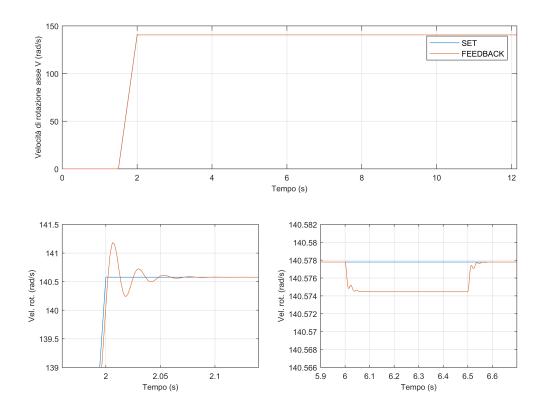


Figura 6.16: Andamento velocità di rotazione simulata modello.

Come lavoro futuro, si potrebbe pensare di implementare nel codice CNC la parte relativa alla realizzazione di dentature a denti dritti e a denti elicoidali con delle compensazioni di tipo conico o bombato. Potrebbe essere interessante intervenire con queste compensazioni nel caso in cui, a causa dell'usura degli organi della macchina utensile, il sistema perdesse rigidità con conseguente introduzione di notevoli errori di forma sul profilo e sull'elica della dentatura.

Un altro importate studio che potrebbe essere effettuato è quello relativo al dimensionamento dei motori degli assi. Infatti, sulla base dei dati sperimentali degli azionamenti, sarebbe interessante simulare l'andamento delle forze di taglio teoriche in funzione della tipologia di lavorazione in modo tale da, utilizzando un modello matematico del sistema, stimare e pre-dimensionare la taglia dei motori da utilizzare. In questo modo, con un modello parametrico, si potrebbe valutare la taglia del motore in funzione del materiale del pezzo in lavorazione, delle dimensioni della dentatura e dei parametri di lavorazione minimi richiesti.

Appendice

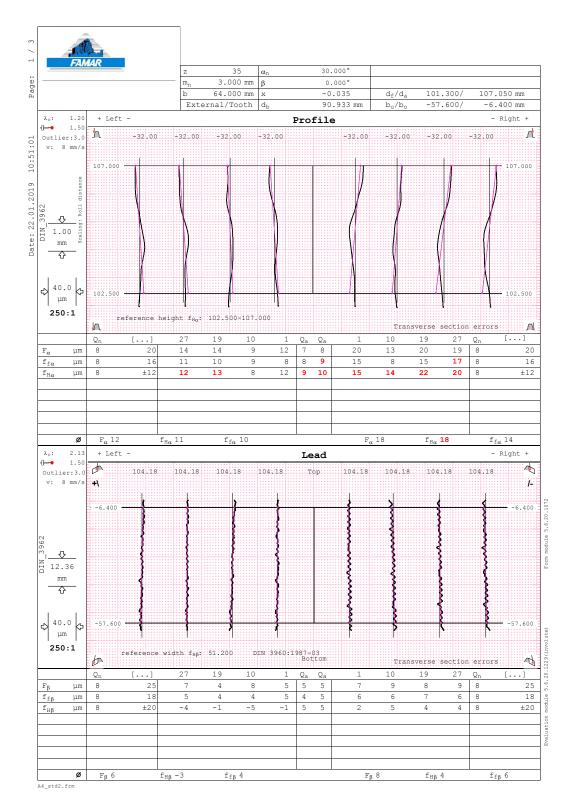
Report test sperimentali

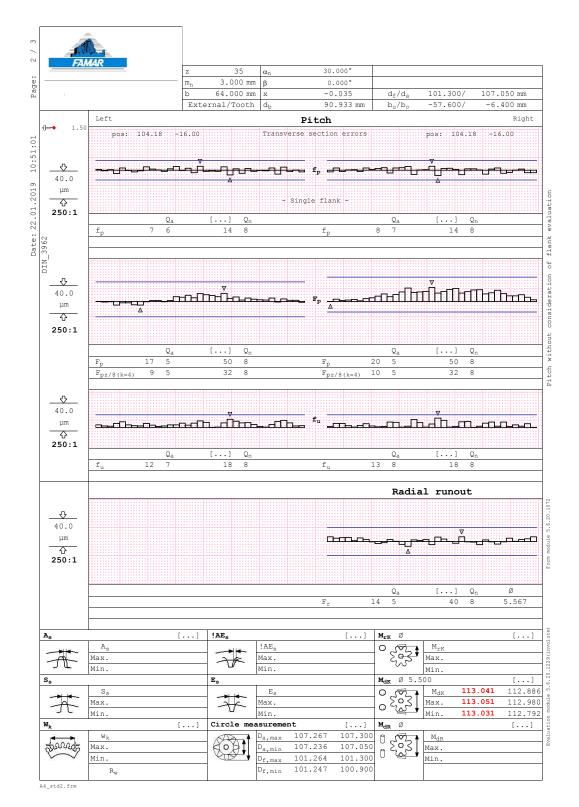
In questa appendice si riportano i report integrali relativi alle misurazioni della dentatura effettuate sui test precedentemente descritti e approfonditi.

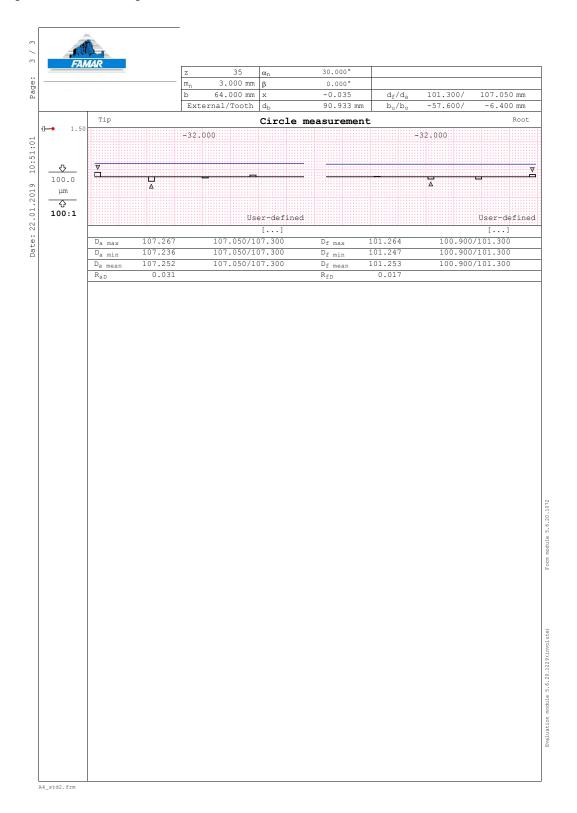
In precedenza, per motivi di semplicità, sono stati riportati solo gli estratti significativi in modo tale da effettuare un'analisi critica sulle principali differenza riscontrate tra i vari test.

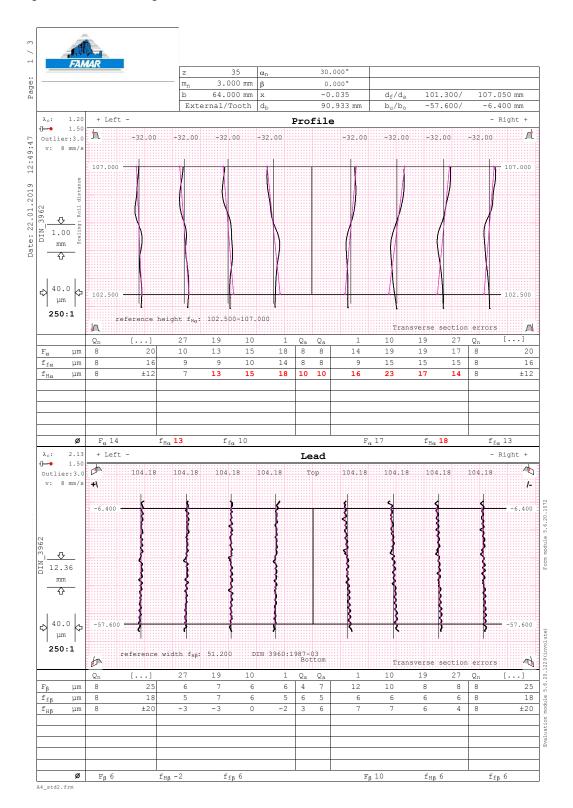
Come già accenato, il report di misurazione è composto da 3 pagine che riassumo tutte le principali caratteristiche geometriche della dentatura in questione. In alto sono anche riportati i dati teorici significativi della dentatura in misura.

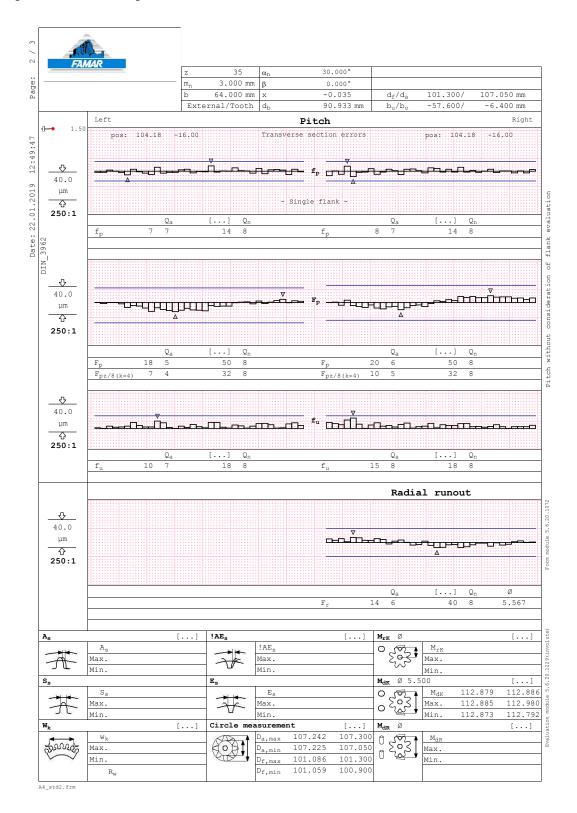
Report misurazione pezzo n.1

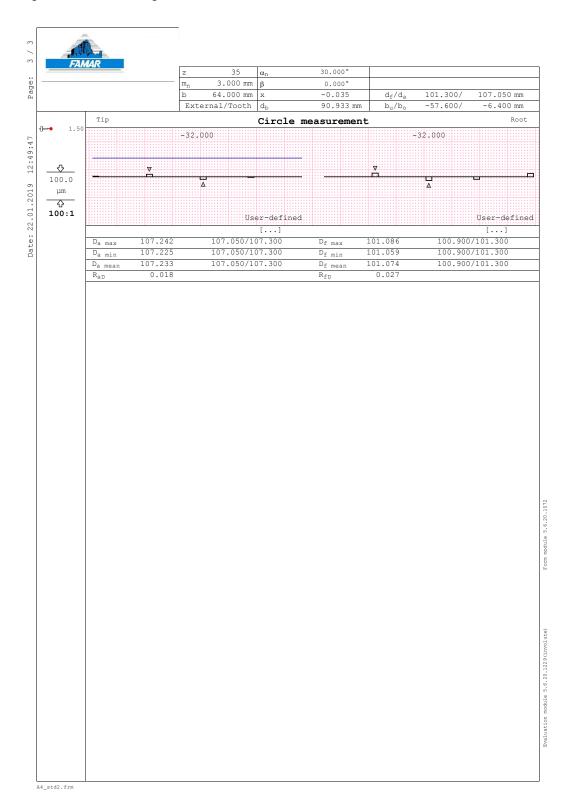


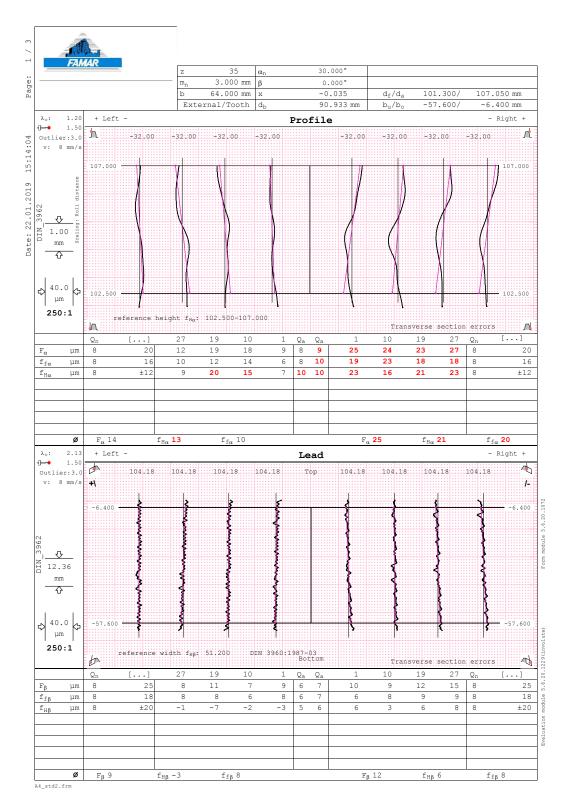


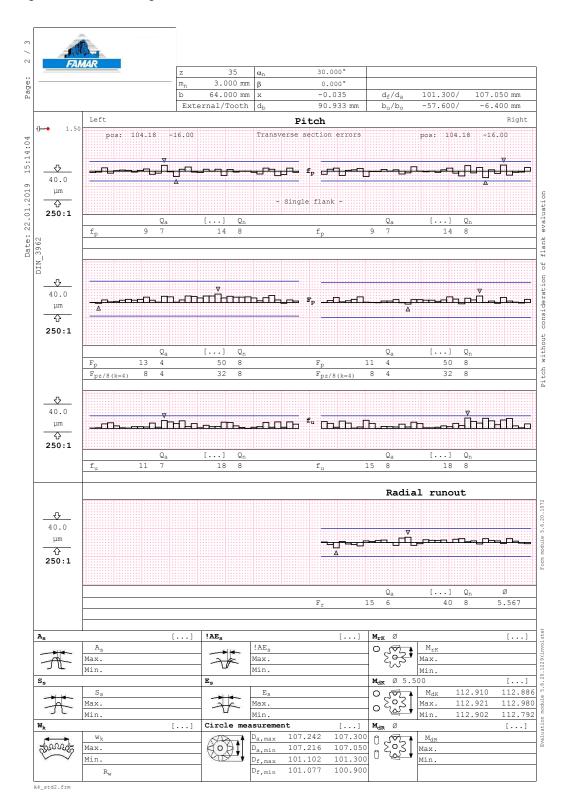


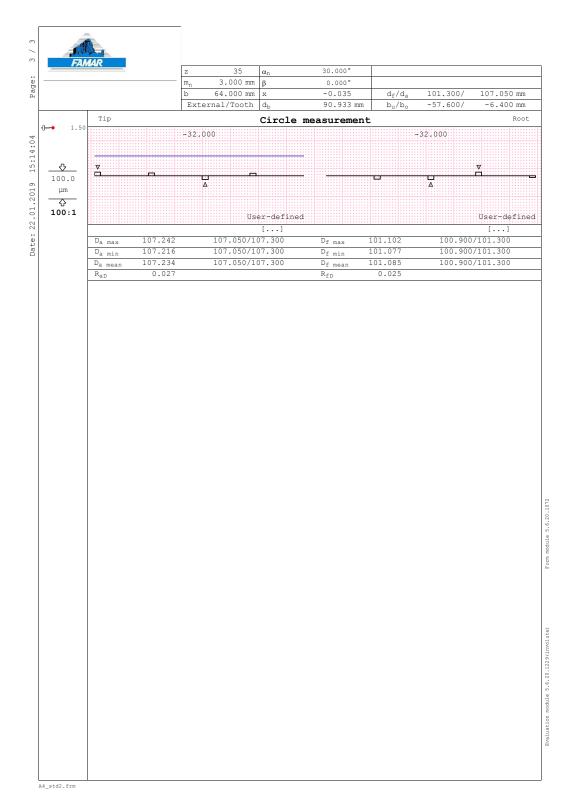




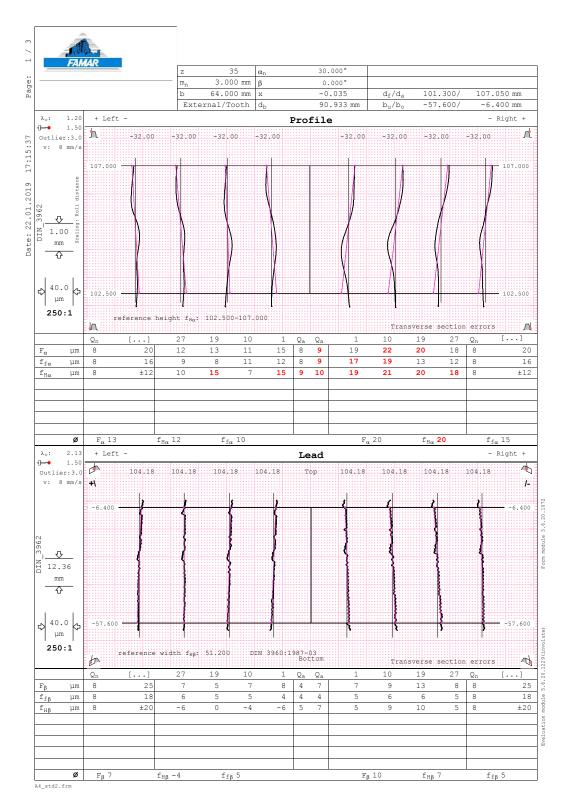




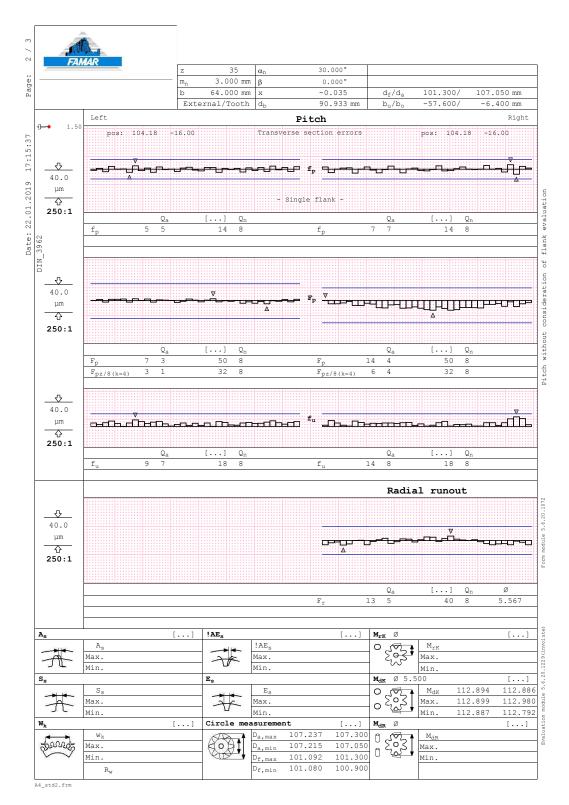


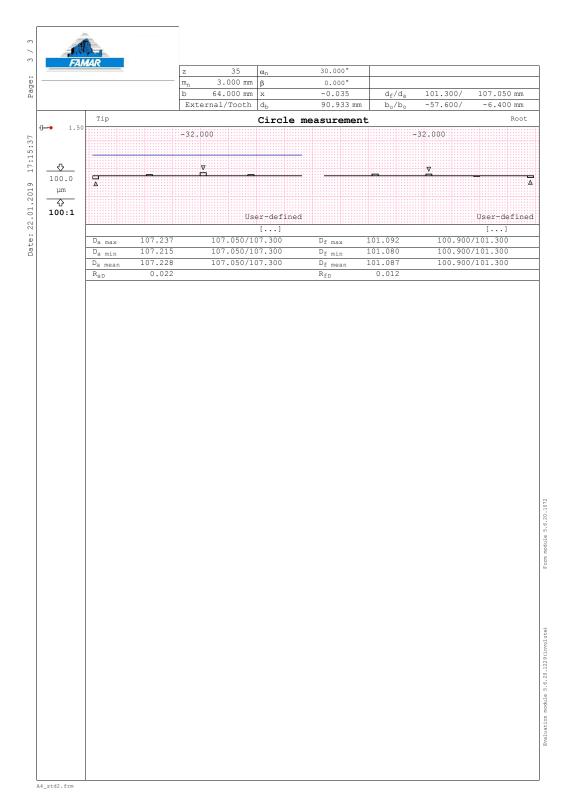


Report misurazione pezzo ${\rm n.4}$

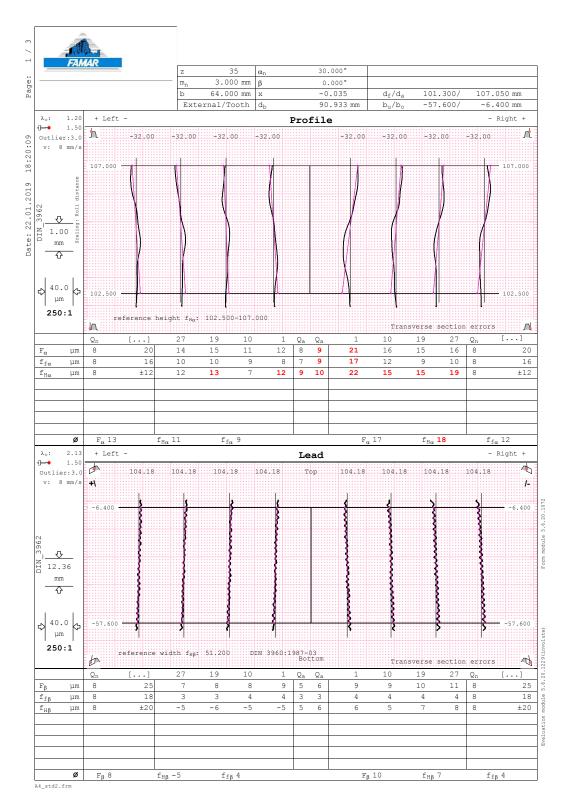


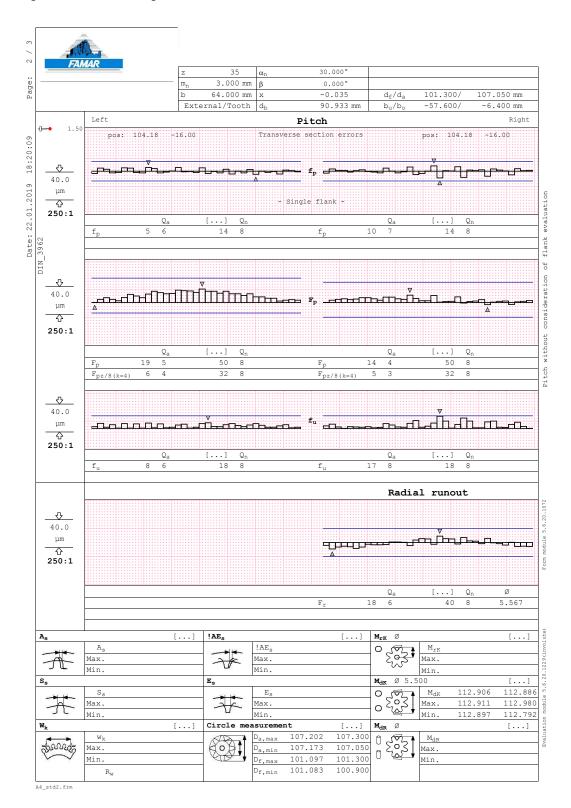
Report misurazione pezzo ${\rm n.4}$

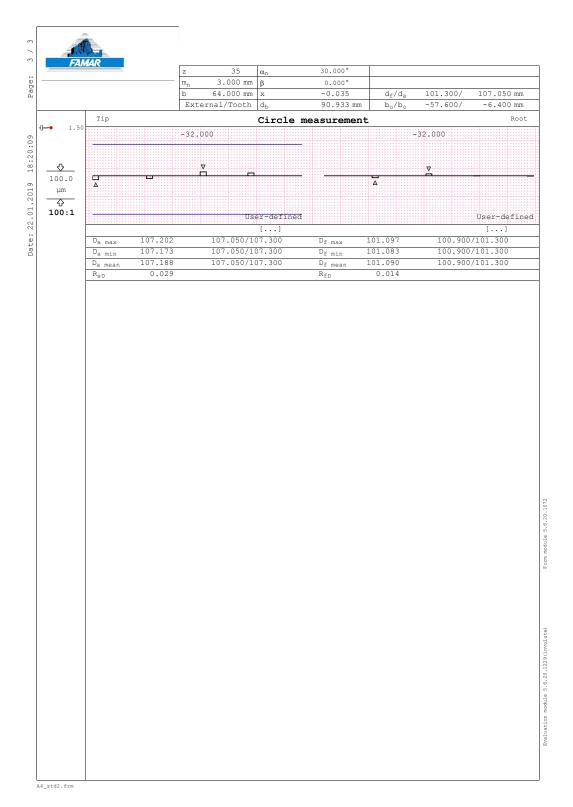


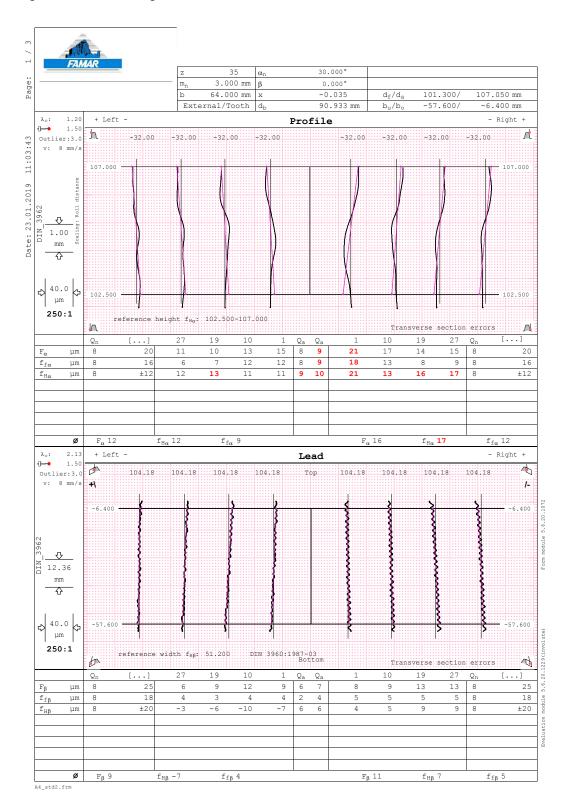


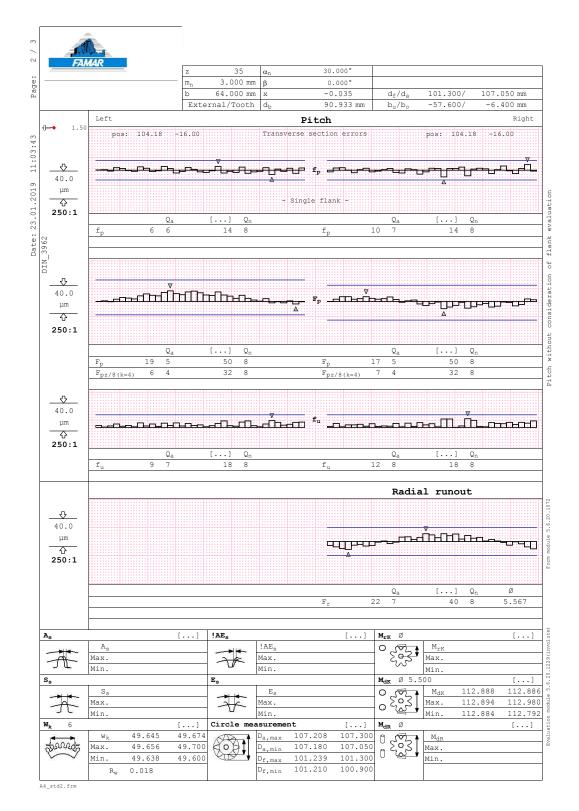
Report misurazione pezzo ${\rm n.5}$

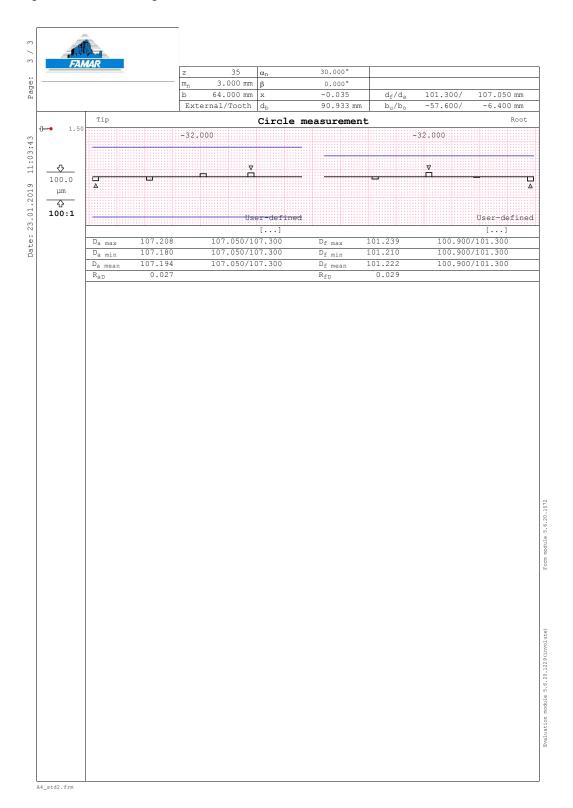




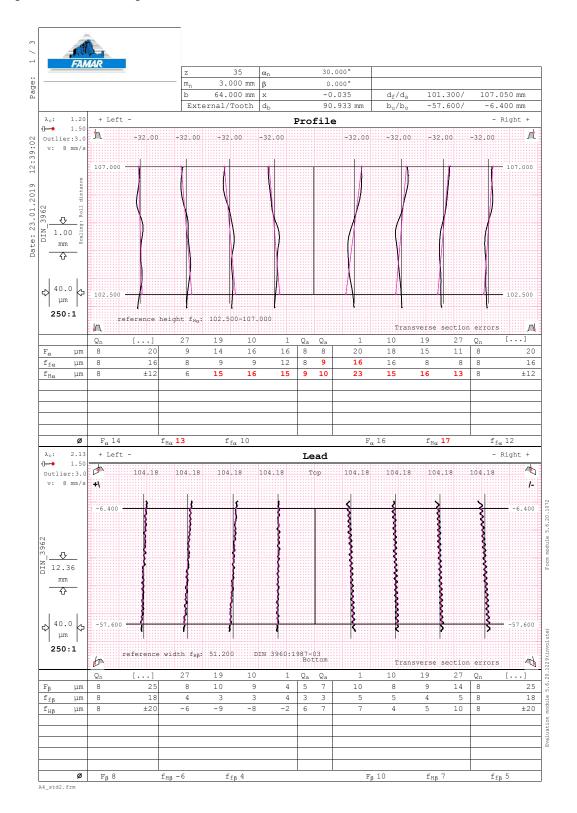


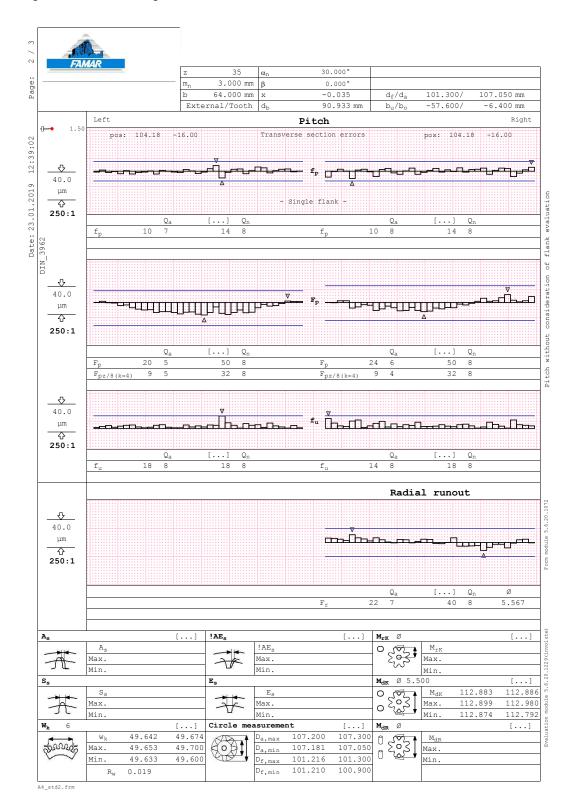


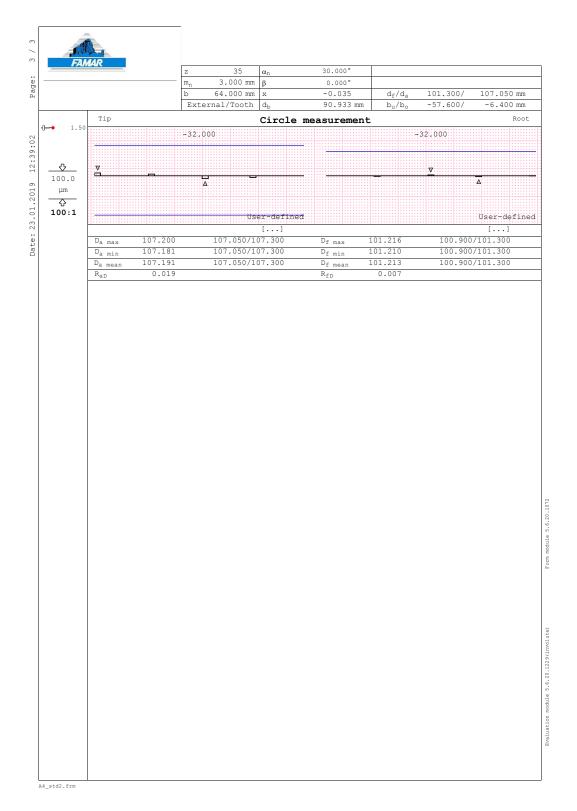


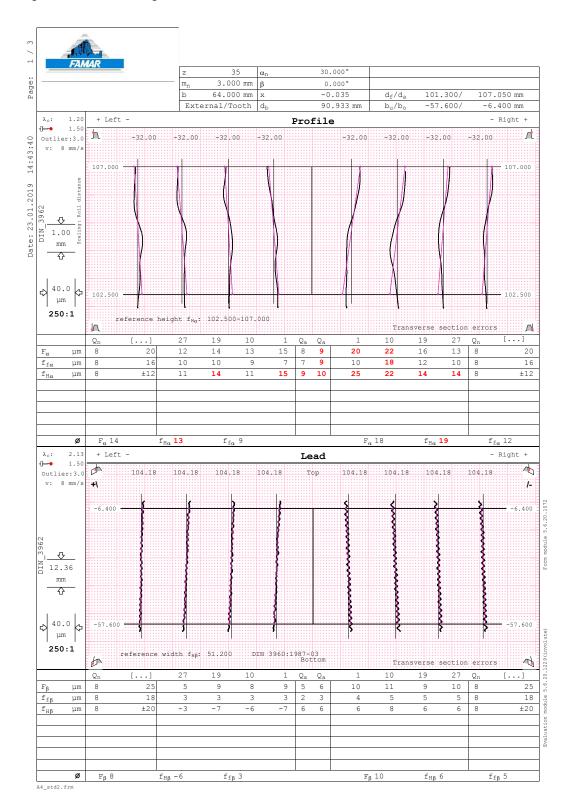


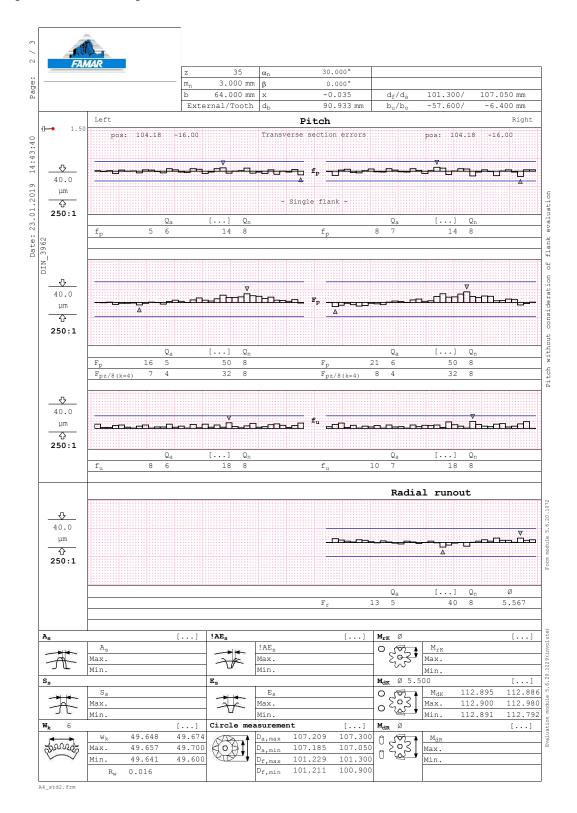
Report misurazione pezzo ${\rm n.7}$

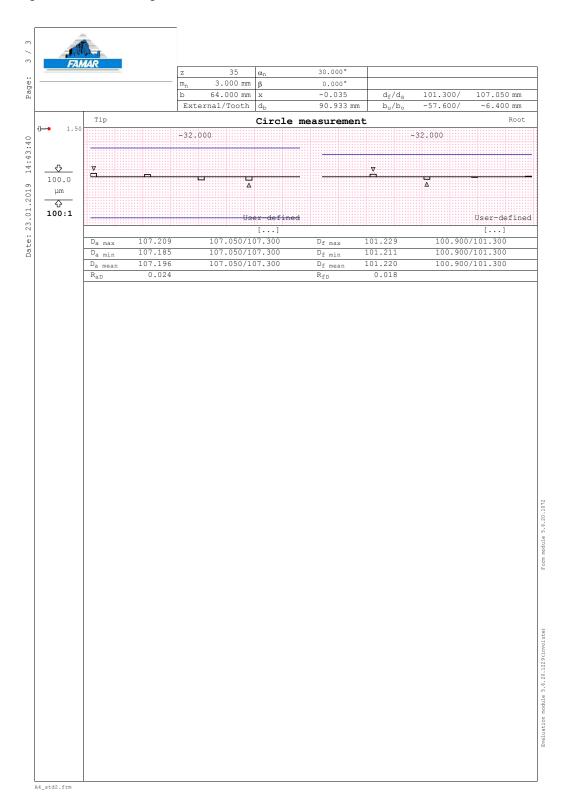












Ringraziamenti

Al termine di questo mio percorso di studi durato cinque anni desidero, in primis, ringraziare i miei Relatori, il Prof. Sorli e il Prof. Rosso per la disponibilità e la professionlità dimostratemi in questi mesi di Tesi. I Vostri consigli e il Vostro supporto sono stati fondamentali per lo svolgimento del mio lavoro e per il completamento del mio elaborato finale.

Un ringraziamento particolare lo riservo a Famar S.r.l, a tutta la famiglia Marinello e ad Avigliana. Mi hanno ospitato per otto mesi e mi hanno permesso di concludere al meglio il mio percorso di studi con la stesura di questa Tesi.

Ringrazio vivamente la mia famiglia, in particolare mio padre e mia madre dai quali mi sono dovuto allontanare per poter seguire la mia strada e realizzare i miei desideri. Vi siete sempre fidati di me e nonostante la distanza mi avete dato costantemente l'energia per proseguire e non mollare, anche se "vi ho sempre chiesto: Soldi, Soldi ... Clap, Clap"

Ringrazio Chiara, mia sorella, per i consigli, i suggerimenti e la vicinanza dimostratami nei momenti più bui del mio percorso. Forse anche gli esercizi di Fisica/Chimica mi hanno aiutato a mantenere vivi quei concetti alla base dei miei studi di Ingegneria. Ti voglio tanto bene!

Kekè, cosa potrei dirti che già non sai?! Mi hai aiutato su ogni cosa, in ogni momento. Ti ringrazio per avermi sopportato, supportato, ascoltato, odiato, amato. Per essermi stata vicino anche quando, preso dall'ansia e dalla tensione, mi allontanavo da tutto e da tutti. Sei stata la mia vera ancora di salvezza qui a Torino.

Muchas gracias a Francesco e Giuseppe: abbiamo affrontato tutto il percorso universitario insieme, non facendoci mai mancare litigi e risate. Ci siamo allontanati per la Tesi ma siamo riusciti comunque a raggiungere l'obiettivo comune insieme. Il "carico" da trainare è stato pesante, ma ce l'abbiamo fatta!

Grazie a Matteo, mio "fratello". È vero, non ci sono più le partite al computer, le partite in TV, la PSP, l'NBA. La vita ci ha un po' allontanati, ma forse è giusto così perchè ho avuto la certezza che non si sarà mai distanza troppo grande, ovunque saremo. Spesso ho chiesto il tuo parere e tu sei sempre stato pronto a consigliarmi, con le tue tempistiche, ma con sincerità. $(2013 \rightarrow \infty)$

Un grazie speciale anche a Carla con cui ho condiviso il tetto per 5 anni. Ci siamo scambiati poche parole a causa del nostro carattere molto simile ma abbiamo sempre affrontato i problemi insieme, uscendone con maturità e spensieratezza.

Ringrazio anche Matteo, il mio nuovo coinquilino, per aver portato da pochi mesi quel pizzico di pazzia e imprevedibilità che mi è sempre mancata. Sei ancora all'inizio di questo percorso, ma spero che i miei consigli e suggerimenti possano aiutarti nel tuo cammino. "I piccoli cinghiali grugniranno quando sapranno quanto ha sofferto il vecchio cinghiale"

Molte grazie anche a Oscar, amico, "collega"... Per 8 mesi abbiamo condiviso il pranzo e ogni venerdì, quando non ti dimenticavi di me, le nostre chiacchiere e le nostre confidenze ci hanno accompagnato in Autostrada.

Un dolcissimo grazie alle mie nonne. A nonna Gina, per le frequenti chiacchierate al telefono, per gli aggiornamenti metereologici del sud Italia e per tutti i racconti, i ricordi e i momenti fantastici trascorsi insieme in questi 25 anni. Grazie a nonna Cetta che, se fosse qui con noi, sarebbe orgogliosa di me. Ti porterò per sempre nel mio cuore. La mia Luce è ancora accesa. Questo mio risultato è anche merito vostro.

Grazie a Torino, una città meravigliosa che mi ha adottato per cinque anni divenendo a tutti gli effetti "La mia città", quella del cuore.

Infine, ringrazio chi, anche a distanza di chilometri, mi ha sempre dimostrato amore e vicinanza. Tutta la mia folle ma insostituibile famiglia.

Ad maiora! Pierluca Mandorino

Elenco delle figure

1.1	Schema macchina ERGO400 di Famar S.r.l
2.1	Utensile da fresa per formatura
2.2	Differenti utensili per fresatura
2.3	Schema fresatura ruote dentate
2.4	Utensile dentatrice Maag
2.5	Schema taglio con dentatrice Maag
2.6	Utensili dentatrice Fellow
2.7	Schema taglio con dentatrice Fellow
2.8	Utensile dentatrice a creatore
2.9	Schema taglio con dentatrice a creatore
2.10	Utensile finitura per rettificatura
	Utensile finitura per sbarbatura
2.12	Schema funzionamento Power Skiving
	Schema struttura Power Skiving
2.14	Setup di processo in vista frontale
2.15	Setup di processo in vista superiore
2.16	Confronto tecnologie di taglio dentature
2.17	Schema velocità di taglio Skiving
2.18	Schema svantaggi <i>Skiving</i>
3.1	Schema assi macchina
3.2	Schema macchina complessivo
3.3	Schema TANDEM 415 Z RAM senza ripari e senza trasporto 27
3.4	Gruppo basamento
3.5	Paratia intermedia aperta
3.6	Paratia intermedia chiusa
3.7	Mandrino pezzo che attraversa la paratia intermedia
3.8	Gruppo asse X
3.9	Gruppo testa
3.10	Ripari asse X con corsa $-625mm$
3.11	Ripari asse X con corsa $+625mm$
	Gruppo asse Z
	Confronto mandrino standard con evoluzione RAM
3.14	Gruppo asse Y
3.15	Gruppo unità di Skivina

3.16	Ripari asse Y in configurazione $-240mm$	37
3.17	Ripari asse Y in configurazione $+240mm$	37
3.18	Schema ripari macchina.	38
3.19	Gruppo armadi elettrici e centralina idraulica	39
3.20	Gruppo unità di <i>Skiving</i>	40
	Vista in sezione mandrino utensile	41
	Dettaglio cuscinetto a rulli nel mandrino utensile	43
	Dettaglio costruttivo distributore aria.	43
	Distributore in bronzo	43
	Modellazione attacco HSK da DIN 69893	44
	Rappresentazione portautensile SK	45
	Rappresentazione portautensile HSK	45
	Sistema di bloccaggio-sbloccaggio utensile adottato	46
	Rappresentazione condotti per fluido refrigerante	46
	Vista in sezione tavola rotante	48
	Dettaglio sistema di bloccaggio rotazione	49
	Gruppo unità di Skiving	50
	Vista in trasparenza condotti interni	51
	Dettaglio in trasparenza per fuoriuscita cavi motore	52
	Gruppo slitta asse Y	52
	Dettaglio costruttivo slitta asse Y	53
	Dettaglio costruttivo slitta asse Y	54
	Dettaglio ripari telescopici asse Y	54
	Dettaglio feltri inferiori ripari asse Y	55
	Dettaglio feltri superiori ripari asse Y	55
0.40	Demagno lettii superiori ripair asse 1	55
4.1	Rappresentazione assi macchina	57
4.2	Schema macchina complessivo	58
4.3	Rappresentazione dettagliata macchina Skiving	58
4.4	Modello grezzo e finito del pezzo in lavorazione	59
4.5	Rappresentazione dentatura su pezzo in lavorazione	60
4.6	Utensile da taglio per <i>Skiving</i>	61
4.7	Rappresentazione sgrossatura esterna	62
4.8	Rappresentazione finitura esterna	62
4.9	Rappresentazione sgrossatura interna	63
4.10	Rappresentazione finitura interna	63
4.11	Rappresentazione lavorazione di gola interna	63
4.12	Rappresentazione sgrossatura esterna	64
4.13	Rappresentazione finitura esterna	64
	Rappresentazione sgrossatura interna	64
	Rappresentazione finitura interna	65
	Rappresentazione foratura	65
	Dati pezzo e dati utensile in pagine interfaccia	67
	Convenzione di definizione angolo d'elica	69
	Convenzione angolo di rotazione mandrino utensile	70

4.20	Calcolo angolo Σ per dentature esterne	71		
4.21	Calcolo angolo Σ per dentature interne			
4.22	Schema di calcolo velocità di rotazione mandrini			
4.23	Rappresentazione azzeramento per taglio di tornitura			
4.24	Rappresentazione azzeramento per taglio Skiving			
4.25	Rappresentazione spostamento origine lungo l'asse Z	79		
4.26	Rappresentazione azzeramento lungo l'asse Y	80		
4.27	Rappresentazione origine degli assi di movimentazione della macchina	80		
4.28	Rappresentazione correzione lungo l'asse X	81		
4.29	Rappresentazione coordinata di posizionamento lungo l'asse Y	82		
4.30	Possibili configurazioni di taglio con Skiving	83		
4.31	Rappresentazione posizionamento iniziale lungo l'asse Z	85		
4.32	Rappresentazione posizionamento finale lungo l'asse Z	85		
4.33	Rappresentazione lavorazione utensile Skiving lungo l'asse Z	86		
4.34	Rappresentazione interfaccia di SinuTrain	89		
4.35	Pagina definizione dati geometrici relativi al pezzo in lavorazione	91		
4.36	Pagina definizione dati geometrici relativi all'utensile per Skiving	91		
4.37	Pagina per definizione parametri di taglio	92		
F 1		0.4		
5.1	Estratto report misurazione dentature - Profilo del dente	94		
5.2	Valutazione parametro F_{α}	95		
5.3	Valutazione parametro $f_{f\alpha}$	95		
5.4	Valutazione parametro $f_{H\alpha}$	96		
5.5	Estratto report misurazione dentature - Elica dentatura	96		
5.6	Valutazione parametro F_{β}	97		
5.7	Valutazione parametro $f_{f\beta}$	98		
5.8	Valutazione parametro $f_{H\beta}$	98		
5.9	Estratto report misurazione dentature - Passo dentatura	99		
5.10	Estratto report misurazione dentature - Run-out	100		
5.11	Estratto report misurazione dentature - Misurazione circonferenze	100		
	Foto test macchina su pezzo in Teflon.	102		
	Dettaglio dentatura pezzo n.0	103		
	Dentatura realizzata su pezzo in acciaio.	104		
	Analisi forma profilo pezzo n.1.	104		
	Analisi diametri riferimento pezzo n.1	105		
	Analisi forma profilo pezzo n.2.	106		
	Analisi diametri riferimento pezzo n.2.	107		
	Analisi forma profilo pezzo n.3	108		
	Analisi forma profile pezzo n.4	109		
	Analisi forma profilo pezzo n.5	110		
	Analisi forma profilo pezzo n.6	111		
	Analisi diametri riferimento pezzo n.6	111		
	Analisi forma profilo pezzo n.7	112		
	Analisi forma profilo pezzo n.8	113		
5.26	Risultati collaudo <i>Skiving</i>	114		

6.1	Schema elettrico motore a corrente continua	117
6.2	Schema bilancio meccanico del sistema	118
6.3	Schema a blocchi modello asse V	119
6.4	Coppia motrice sperimentale	120
6.5	Schema a blocchi semplificato modello asse V	122
6.6	Andamendo FT in OPEN-LOOP	123
6.7	Andamendo FT in CLOSED-LOOP	124
6.8	Andamento velocità di rotazione input modello	126
6.9	Andamento coppia resistente input modello	126
6.10	Andamento velocità di rotazione simulata modello	127
6.11	Andamento corrente assorbita simulata modello	128
6.12	Andamento coppia motrice simulata modello	128
6.13	Andamendo FT disturbo	130
6.14	Analisi forma profilo pezzo n.6	132
6.15	Risultati collaudo Skiving	132
6.16	Andamento velocità di rotazione simulata modello.	133

Elenco delle tabelle

3.1	Dati relativi alla motorizzazione dell'asse X	31
3.2	Dati relativi alla motorizzazione dell'asse Z	34
3.3	Dati relativi alla motorizzazione dell'asse C	34
3.4	Dati di identificazione mandrini Famar	40
3.5	Dati relativi alla motorizzazione dell'asse V	42
3.6	Dati relativi alla motorizzazione dell'asse B	47
3.7	Dati relativi alla motorizzazione dell'asse Y	53
4.1	Principali variabili utilizzate nell'algoritmo di controllo	68
4.2	Valori variabili a seconda della tipologia di dentatura	84
5.1	Parametri di lavorazione test su Teflon	101
5.2	Parametri di lavorazione test pezzo n.0	102
5.3	Parametri di lavorazione test pezzo n.1	103
5.4	Parametri di lavorazione test pezzo n.2	106
5.5	Parametri di lavorazione test pezzo n.3	107
5.6	Parametri di lavorazione test pezzo n.4	108
5.7	Parametri di lavorazione test pezzo n.5	109
5.8	Parametri di lavorazione test pezzo n.6	110
6.1	Parametri di lavorazione ottimali	131

Bibliografia

- [1] https://www.industry.siemens.com.
- [2] https://www.phase.eu/torque-and-spindle-motors.
- [3] https://www.heidenhain.it/it_IT/prodotti.
- [4] https://www.halder.com.
- [5] https://www.bosch.it.
- [6] https://www.skf.com.
- [7] https://www.schaeffler.de.
- [8] Ingersoll Cutting Tool Company.
- [9] Sandvik Coromant.
- [10] Machine tools; ball screws; nominal diameters and nominal leads. DIN 69051-2, 1989-05.
- [11] Kegel-hohlschafte mit plananlage-form c. DIN 69893, 1994.
- [12] Zahnrader-zylinderrader und zylinderradpaare mit evolventenverzahnung-begriffe und geometrie. DIN 21771, 2014-08.
- [13] Eleonora Atzeni. Il controllo numerico delle macchine utensili Cambio utensile e pezzo. Appunti corso SIP 2017.
- [14] Zheng Guo, Shi-Min Mao, Liang Huyan, and Dong-Sheng Duan. Research and improvement of the cutting performance of skiving tool. *Mechanism and Machine Theory*, 120:302–313, 2018.
- [15] Georges Henriot. Manuale pratico degli ingranaggi. Tecniche nuove, 1993.
- [16] Joseph Edward Shigley, Richard Gordon Budynas, J Keith Nisbett, and Dario Amodio. *Progetto e costruzione di macchine*. McGraw-Hill, 2009.
- [17] Siemens. Sinumerik 840D sl Programming Manual Job Planning. 2012.
- [18] Siemens. Sinumerik 840D sl Programming Manual Foundamentals. 2013.

[19] Chung-Yu Tsai. Mathematical model for design and analysis of power skiving tool for involute gear cutting. *Mechanism and Machine Theory*, 101:195–208, 2016.