

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA · SEDE DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE - DIN TESI DI LAUREA IN

INGEGNERIA MECCANICA LM

**VARIAZIONE DI PROFILO
TRA INIZIO E FINE VITA
DI UTENSILI CREATORI
PER IL TAGLIO DI RUOTE DENTATE**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA MECCANICA E MACCHINE A FLUIDO

RELATORE:
**Prof. Ing.
Alessandro Fortunato**

CORRELATORI:
**Dott. Ing.
Veronica Ripamonti**

PRESENTATA DA:
Francesco Soliani

II APPELLO - I SESSIONE
ANNO ACCADEMICO 2024/2025

Indice

1	TEORIA DEGLI INGRANAGGI	6
1.1	Generalità e definizioni	6
1.2	Forma dei denti e dentatura dritta	8
1.3	DEENTATURA ELICOIDALE	14
1.3.1	Definizione dell'elica	14
1.3.2	Dentatura	15
2	Introduzione al processo di creazione e controllo degli utensili creatori	20
2.1	Generalità utensile creatore	20
2.2	Processo di profilatura dente	23
2.3	Controllo degli utensili creatori	24
2.3.1	Errore di spessore dente	25
2.3.2	Scostamento di forma di un tagliente	26
3	Software 3D di simulazione cinematica diretta: determinazione dei profili utensile a inizio e fine vita	28
3.1	Definizione del modello creatore	29
3.2	Definizione del modello mola	30
3.3	Processo di creazione dell'assieme virtuale	32
3.4	Parametri utente	34
3.4.1	Moto roto-traslatorio dell'utensile creatore	35
3.4.2	Moto di avanzamento della mola abrasiva	35
4	Simulazioni	38
4.1	Validazione del software	38
4.2	Impatto delle variazioni parametriche sul profilo a fine vita	40
4.2.1	Simulazione 1	41
4.2.2	Simulazione 2	45
4.2.3	Simulazione 3	49
4.2.4	Simulazione 4	52
4.2.5	Simulazione 5	56
4.3	Simulazione 6	60
4.4	Osservazioni	64
5	Conclusioni	66
6	Sviluppi futuri	72

Introduzione

L'attività di tesi è volta allo studio e all'ideazione di un software di simulazione del processo di rettifica degli utensili per la dentatura degli ingranaggi, con particolare attenzione al processo di profilatura del dente di creatori topping e semitopping con affilatura dritta.

L'interesse per questo processo è nato durante l'attività di tirocinio svolta presso STARSU EUROPE S.R.L., azienda di Bentivoglio. Durante questo periodo, è stato sviluppato un codice in Visual Studio che, utilizzando Autodesk Inventor, consente di realizzare una simulazione cinematica per ottenere il profilo dell'utensile.

L'obiettivo di questa tesi è soddisfare le esigenze dell'azienda e fornire le basi per lo sviluppo futuro di un programma di simulazione cinematica e fisica del processo.

L'elaborato si articola in tre parti principali:

- Teoria degli Ingranaggi: Una panoramica introduttiva sulla teoria degli ingranaggi, essenziale per comprendere le basi del processo di dentatura.
- Utensili Creatori e Profilatura del Dente: Un focus sugli utensili creatori, con particolare attenzione alla forma del dente e alle metodologie di affilatura.
- Sviluppo del Software di Simulazione Cinematica: Descrizione dettagliata del software di simulazione cinematica realizzato, seguita da un'analisi delle simulazioni eseguite e dei risultati ottenuti.

La tesi si propone di analizzare la variazione del profilo degli utensili creatori tra l'inizio e la fine della loro vita utile, esaminando l'impatto della variazione di alcuni parametri progettuali. Attraverso l'uso di simulazioni cinematiche, il lavoro mira a validare e comprendere il processo di profilatura. Il software sviluppato gestisce i modelli 3D dell'utensile creatore e della mola abrasiva, simulando i cinematismi del processo di rettifica trasversale e ottenendo il profilo del dente dell'utensile mediante sottrazione booleana di volumi.

1 TEORIA DEGLI INGRANAGGI

1.1 Generalità e definizioni

Un ingranaggio è un organo che assicura il collegamento tra due alberi, trasmettendo il moto di rotazione di uno dei due alberi all'altro con un rapporto tra le velocità angolari costante.

Gli ingranaggi possono essere paralleli, concorrenti o sghembi a seconda della posizione relativa degli assi. In questo documento si farà riferimento soprattutto agli ingranaggi paralleli. Questi possono essere interni o esterni (Figura 1, Figura 2) a seconda che le circonferenze primitive siano posizionate su semipiani opposti oppure sullo stesso semipiano, rispetto alla retta tangente alle circonferenze primitive, nel punto di contatto.

Per definire una coppia di ingranaggi paralleli si parte dalla costruzione di due ruote di frizione che rotolano senza strisciare: le due pulegge hanno pertanto medesima velocità tangenziale da cui la relazione:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

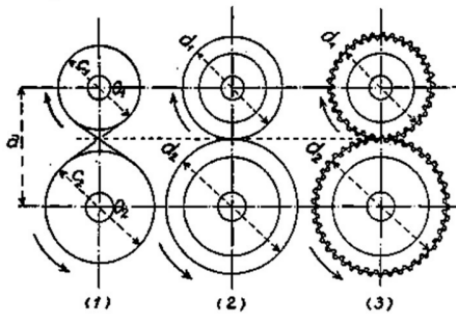


Figura 1: Pulegge con cinghia incrociata; Ruote di frizione; Ingranaggio parallelo esterno [3].

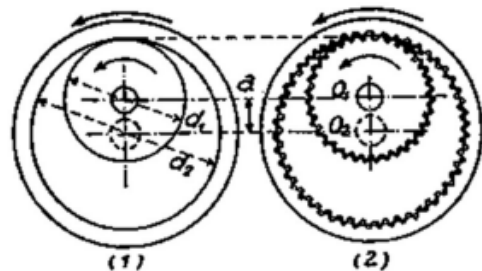


Figura 2: Ruote di frizione; Ingranaggio parallelo interno [3].

Il passaggio da ruote di frizione a ruote dentate avviene per scongiurare fenomeni di strisciamento e quindi assicurare un rapporto costante tra le velocità angolari. Nelle ruote dentate i cerchi primitivi sono i cerchi di diametro d_1 e d_2 , derivanti dalle ruote di frizione, che rotolano senza strisciare rispettando la relazione (1) e che presentano interasse $a = d_1 + d_2$. Qualora l'ingranaggio parallelo fosse esinterno, cambia la definizione di interasse: $a = d_2 - d_1$. Si definisce, per convenzione, pignone l'organo con minor numero di denti, associato al pedice 1 e ruota quello con maggior numero di denti,

associato al pedice 2. Il passo rappresenta la distanza costante misurata tra i denti, alla periferia:

$$p = \frac{\pi d_1}{Z_1} = \frac{\pi d_2}{Z_2} \quad (2)$$

in cui Z_1 e Z_2 sono rispettivamente il numero di denti di pignone e ruota. Inserendo tale definizione nella relazione (1) si ottiene la seguente relazione:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (3)$$

Il modulo è il rapporto tra il passo e il numero π : $m = \frac{p}{\pi} = \frac{d_1}{Z_1} = \frac{d_2}{Z_2}$

Il rapporto di ingranaggio, invece, rappresenta il rapporto tra il numero di denti della ruota e del pignone: $u = \frac{Z_2}{Z_1} > 1$

1.2 Forma dei denti e dentatura dritta

Esistono tre principali forme di dentatura per un organo cilindrico fig. 3:

1. Dritta
2. Elicoidale
3. Bieloidale

Nel primo caso i denti sono paralleli all'asse, nel secondo i denti si avvolgono secondo delle eliche mentre nel terzo caso si distinguono due parti elicoidali opposte.

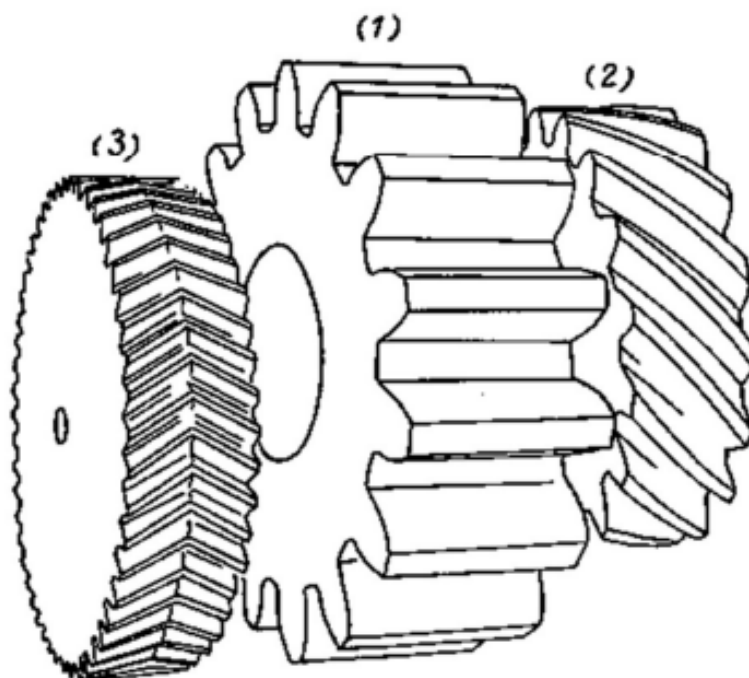


Figura 3: Dentatura: (1)dritta; (2)elicoidale; (3)bieloidale [3].

Definito un piano normale all'asse si definisce profilo del dente la sezione su tale piano. Generalmente tale profilo si dice ad evolvente di cerchio, come riportato in Figura 4: data una retta tangente che rotola senza strisciare su un cerchio si definisce evolvente di cerchio il luogo dei punti descritto dal punto Q di tangenza tra retta e cerchio all'istante zero. Pertanto, l'evolvente è la curva avente estremi Q ed M come conseguenza del rotolamento della retta dal punto Q al punto T. Tale curva non può penetrare all'interno

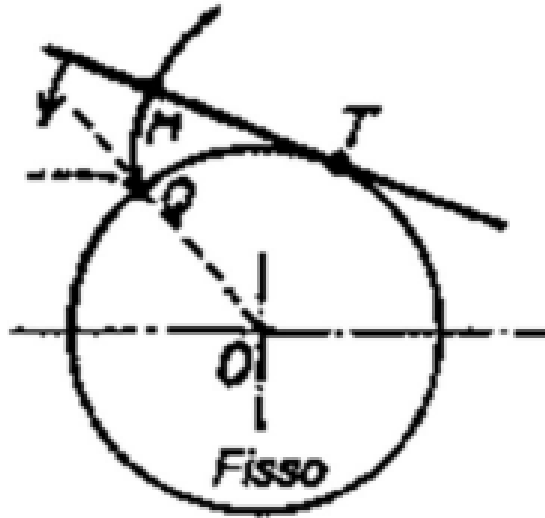


Figura 4: Costruzione geometrica dell'evolvente di cerchio [3].

del cerchio, infatti tale costruzione descrive una curva simmetrica alla prima rispetto al raggio passante per il punto iniziale e definisce la forma del secondo fianco del dente.

Per costruzione sussiste quindi la relazione:

$$\widehat{TQ} = \overline{TM} \quad (4)$$

Il cerchio di costruzione descritto si definisce cerchio di base.

Si dicono coniugati i profili a contatto durante il movimento dell'ingranaggio come in Figura 5; questi devono essere tangenti in ogni istante, evitando il contatto tra angoli vivi e mantenendo costate il rapporto delle velocità angolari.

Il luogo dei punti di contatto tra due profili ad evolvente coniugati è una retta e viene definita linea d'azione. Questa è tangente ai cerchi di base ed è geometricamente analoga alla cinghia montata su due pulegge aventi diametri pari a quelli dei cerchi di base Figura 5.

Pertanto, sussiste la relazione analoga alla (1): $\frac{d_b1}{d_b2} = \frac{n_2}{n_1}$

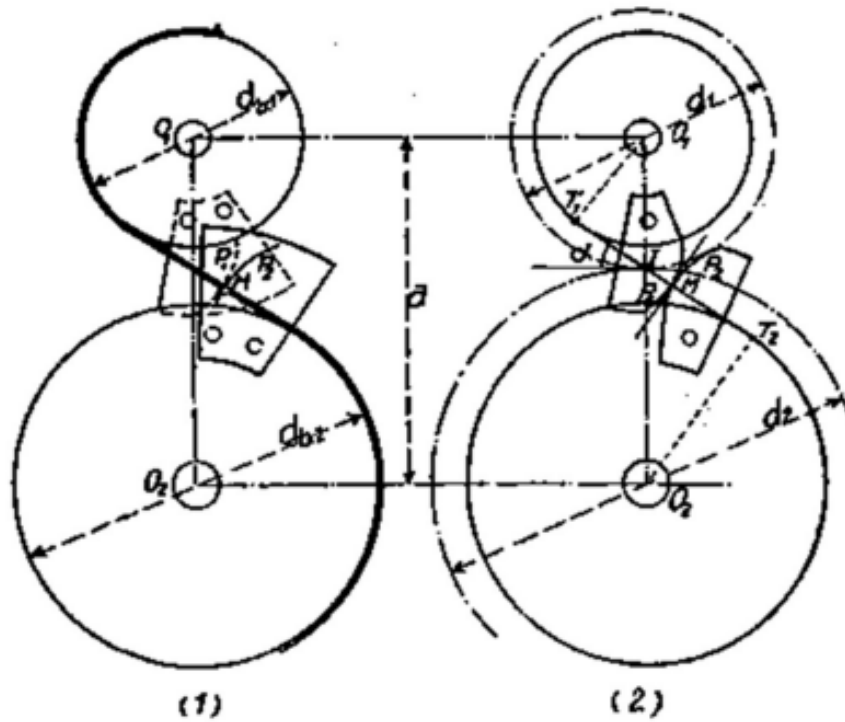


Figura 5: (1) sistema cinghia-puleggia corrispondente all'ingranaggio parallelo esterno (2) accoppiamento profili coniugati [3].

Il punto in cui la linea d'azione interseca la congiungente i centri delle due ruote (I) è il punto in cui i due cerchi primitivi rotolano senza strisciare, da cui deriva la relazione $\frac{d_{b1}}{d_{b2}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{d_1}{d_2}$ e la velocità del punto di contatto lungo la linea di azione è pari a quella tangenziale dei cerchi di base. La tangente nel punto I ai cerchi primitivi definisce l'angolo di pressione con la congiungente i centri e coincide per costruzione geometrica all'angolo formato dalla linea d'azione e dalla tangente ai cerchi primitivi in I, come riportato in Figura 6. Pertanto, è possibile correlare il diametro di base al diametro primitivo:

$$d_b = d \cos(\alpha) \quad (5)$$

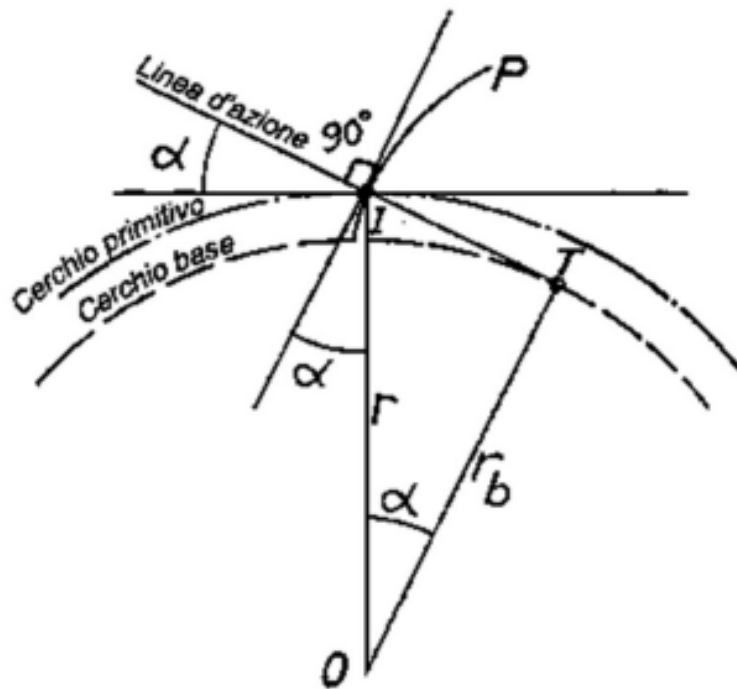


Figura 6: Definizione linea d'azione e relazione tra cerchio di base e primitivo [3].

Affinché l'ingranaggio possa girare in entrambi i sensi e per ragioni pratiche, i denti presentano forma simmetrica ossia i fianchi appartengono a due famiglie di evolventi riferite al medesimo cerchio di base e si differenziano per la direzione dell'evolvente ossia per il verso di rotazione della retta generatrice rispetto al cerchio di base Figura 4.

Come rappresentato in Figura 7(a), per gli ingranaggi esterni il cerchio di testa è quello avente diametro massimo e rappresenta la fine del dente; la distanza tra cerchio di testa e cerchio primitivo, sul raggio, viene nominata addendum. Il cerchio di piede è quello che delimita il vano e la distanza tra esso e il cerchio primitivo, sul raggio, si dice dedendum. Pertanto, l'altezza del dente è data dalla somma di addendum e dedendum. Tali definizioni variano qualora la dentatura sia interna, Figura 7(b).

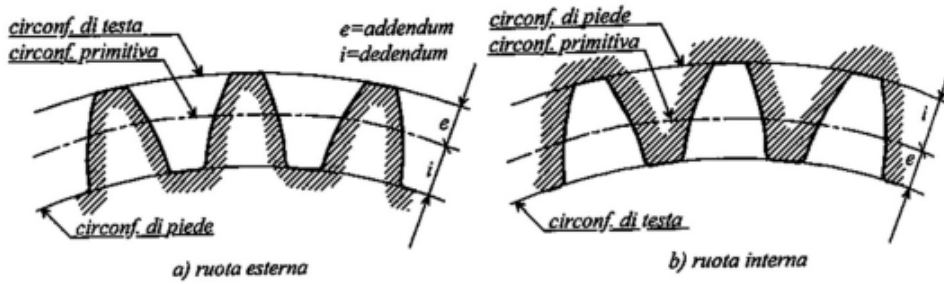


Figura 7: Definizioni relative alle ruote dentate con dentature esterne ed interne [3].

Qualora la dentatura sia dritta, il passo primitivo corrisponde alla distanza tra due profili omologhi consecutivi, lungo il cerchio primitivo; il passo base è la distanza tra due profili omologhi lungo la circonferenza di base e corrisponde alla distanza tra i due profili su una normale comune. Unendo a queste considerazioni la definizione di passo e la relazione (5) si ottiene:

$$p_b = p \cos(\alpha) \quad (6)$$

La dentatura si dice normale quando l'addendum è pari al dedendum e lo spessore dente coincide con il semi-passo, $s = \frac{\pi m}{2}$, da cui l'uguaglianza tra passo e vano, considerando nullo il gioco tra i denti. In generale per i due organi dell'ingranaggio $s_1 + e_1 = s_2 + e_2 = p$ da cui le relazioni $s_1 = e_2$, $s_2 = e_1$.

Analogamente al passo base si definisce lo spessore di base.

Ai fini del calcolo del passo di base o di qualunque altro passo definito su un qualsiasi diametro, è necessario definire la funzione involuta:

$$\text{inv}(\theta) = \tan(\theta) - \theta \quad (7)$$

Dimostrazione: per definizione $\widehat{AC} = \overline{AB}$, $\widehat{AC} = r_b \varphi = r_b(\theta + \alpha)$, $\overline{AB} = r_b \tan \alpha$ da cui semplificando, si ricava: $\tan \alpha - \alpha = \theta = \text{inv}(\alpha)$.

L'involuta dell'angolo sotteso dall'arco compreso tra un punto sull'evolvente e quello di inizio evolvente (\widehat{COB} , Figura 8), coincide con la funzione involuta di un angolo α compreso tra il medesimo punto sull'evolvente, l'origine del cerchio e il centro di curvatura dell'evolvente nel punto (\widehat{BOA} , Figura 8).

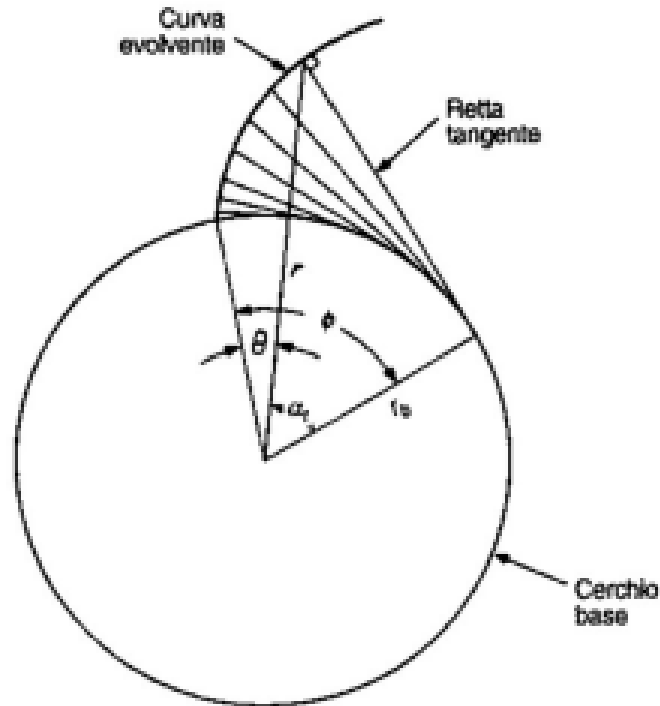


Figura 8: Rappresentazione evolvente di cerchio [3].

Sia I il punto corrispondente al diametro primitivo sul fianco sinistro del dente come in Figura 9, allora lo spessore del dente è ricavabile dall'espressione:

$$\frac{s}{2r} = \frac{s_b}{2r_b} - \text{inv}(\alpha) \quad (8)$$

Per ottenere la relazione 8 è stato utilizzato un ragionamento analogo a quello della definizione di involuta, in cui α corrisponde all'angolo di pressione. Di conseguenza:

$$\frac{s_M}{2r_M} = \frac{s_b}{2r_b} - \text{inv}(\theta_M) \quad (9)$$

$$\cos \theta_M = \frac{r_b}{r_M} \quad (10)$$

Da cui:

$$\frac{s_M}{d_M} = \frac{s}{d} - \text{inv}(\theta_M - \text{inv}(\alpha)) \quad (11)$$

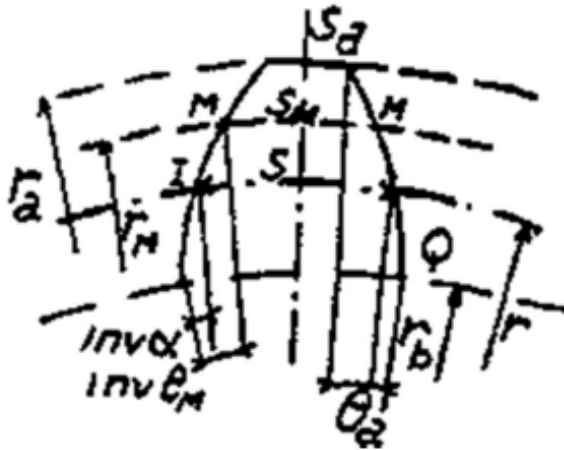


Figura 9: Sezione di un dente con profilo ad evolvente di cerchio [3].

1.3 DEENTATURA ELICOIDALE

1.3.1 Definizione dell'elica

È una curva avvolta su un cilindro tale per cui i punti aventi stessa distanza, misurata su una parallela all'asse del cilindro, sono sfasati di uno stesso angolo. Tale distanza si definisce passo dell'elica (p_z). L'angolo d'elica β è l'angolo costante tra la curva e l'asse del cilindro e secondo tale angolo l'elica si sviluppa secondo una retta come in Figura 10.

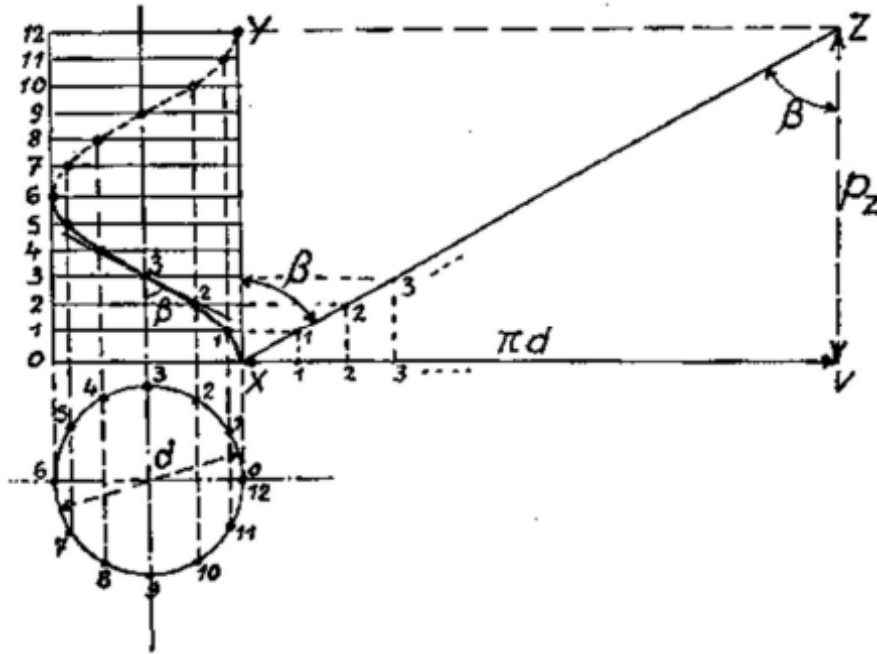


Figura 10: Costruzione geometrica per punti di un'elica e sviluppo [3].

Per costruzione valgono le seguenti relazioni:

$$\tan \beta = \frac{\pi d}{p_z} \quad (12)$$

$$p_z = \frac{\pi d}{\tan \beta} \quad (13)$$

1.3.2 Dentatura

Mentre nelle ruote cilindriche a denti dritti i fianchi si ottengono dalla traslazione del profilo secondo la direzione dell'asse della ruota, nelle ruote elicoidali i fianchi dei denti sono superfici elicoidali.

Analogamente alla dentatura dritta si definiscono i cerchi di base e quindi i cilindri di base. Inoltre, si definisce l'elica di base avente angolo β_b , che giace sul cilindro di base. Questa volta il profilo dei denti è generato da un piano tangente ai cilindri di base ma inclinato rispetto agli assi di un angolo β_b . Il piano si appoggia su ciascun cilindro di base secondo l'elica di base, come descritto in fig. 11. Il segmento \overline{MN} rappresenta la zona di contatto tra superfici coniugate. Sezionando mediante un piano normale all'asse dell'ingranaggio si ottiene un profilo ad evolvente con raggio di base r_{b1} .

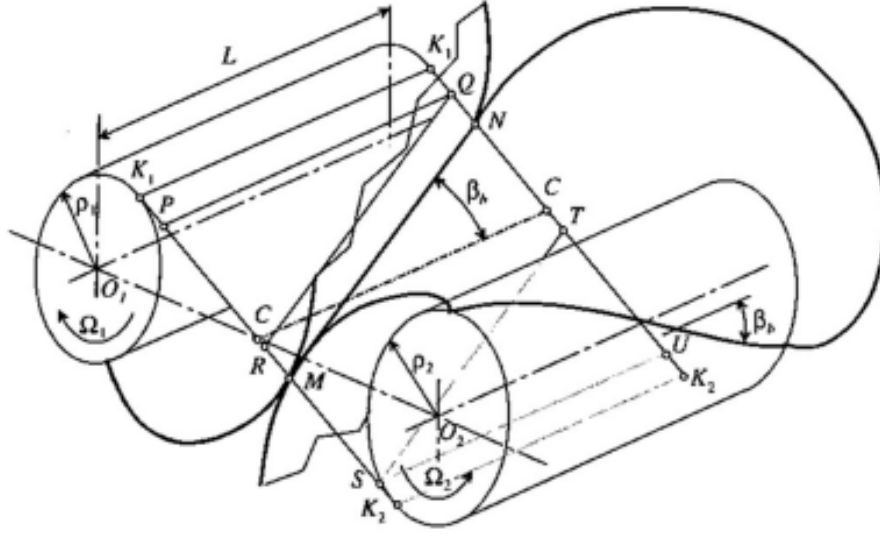


Figura 11: Generazione dei fianchi dei denti delle ruote a denti elicoidali [3].

L'elica primitiva, con inclinazione β , è l'elica tracciata sul cilindro primitivo definito dal cerchio primitivo. Affinché due eliche primitive coniugate rimangano sempre in tenenza queste devono essere di senso opposto e devono avere medesimo angolo β .

$$\tan \beta = \frac{\pi d_1}{p_{z1}} = \frac{\pi d_2}{p_{z2}} \quad (14)$$

$$p_{z1} = \frac{\pi d_1}{\tan \beta}; p_{z2} = \frac{\pi d_2}{\tan \beta} \quad (15)$$

Combinando le equazioni 14 e 15:

$$\frac{p_{z1}}{p_{z2}} = \frac{d_1}{d_2} \quad (16)$$

Considerando che tutte le eliche tracciate su una stessa dentatura hanno identico passo:

$$\tan \beta_b = \frac{\pi d_b}{p_z}, d_b = d \cos \alpha_t \quad (17)$$

Da cui:

$$\tan \beta_b = \tan \beta \cos \alpha \quad (18)$$

Si distinguono quindi gli elementi trasversali, riferiti ad un piano normale all'asse della ruota, e gli elementi normali, riferiti ad un piano normale all'elica primitiva, come riportato in Figura 12. Gli elementi sono passo, spessore e vano.

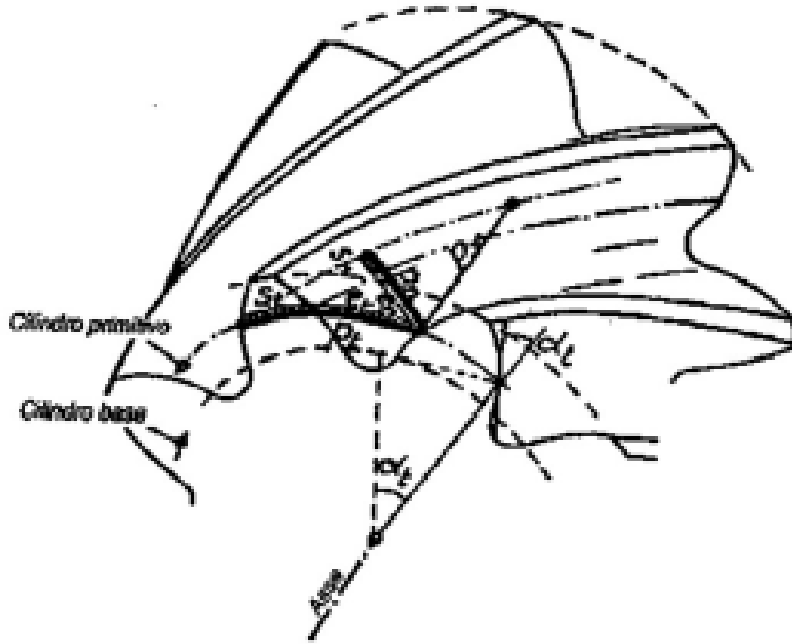


Figura 12: Elementi normali e trasversali sul cilindro primitivo [3].

Tra di essi sussistono le seguenti relazioni e si definiscono i moduli normale e trasversale:

$$\begin{cases} p_n = p_t \cos \beta \\ s_n = s_t \cos \beta \\ e_n = e_t \cos \beta \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} m_t = \frac{p_t}{\pi} \\ m_n = \frac{p_n}{\pi} \\ m_n = m_t \cos \beta \end{cases} \quad (20)$$

Il passo assiale p_x è la proiezione del passo normale lungo l'asse della ruota fig. 13a. Inoltre, si definiscono il passo di base normale e trasversale Figura 13b.

$$p_x = \frac{p_t}{\tan \beta} = \frac{p_n}{\sin \beta} = \frac{p_z}{z} \quad (21)$$

in cui p_z è il passo dell'elica fig. 10:

$$p_{bt} = p_t \cos \alpha_t \qquad p_{bn} = p_n \cos \alpha_n = p_t \cos \beta \cos \alpha_n \quad (22)$$

2 Introduzione al processo di creazione e controllo degli utensili creatori

In questa sezione, verranno espone le generalità sull'utensile creatore, descrivendo le sue caratteristiche principali e il processo di generazione del profilo del dente tramite involuppo.

Si illustrerà poi il processo di profilatura del dente, con cenni sui macchinari e sulle tecniche utilizzate per realizzare la spoglia di testa e del profilo del dente. Infine, saranno discusse le procedure di controllo qualità e le misurazioni delle tolleranze geometriche e di forma secondo le normative, con un focus sugli errori di spessore del dente e sugli scostamenti di forma del tagliente.

2.1 Generalità utensile creatore

L'utensile creatore è una fresa ricavata da una vite nella quale i denti sono ricavati interrompendo il filetto con scanalature equidistanti. Queste scanalature possono essere parallele all'asse del creatore, si parlerà di creatore affilato dritto, o possono avere una direzione normale al filetto della vite, allora si parlerà di creatori elicoidali.

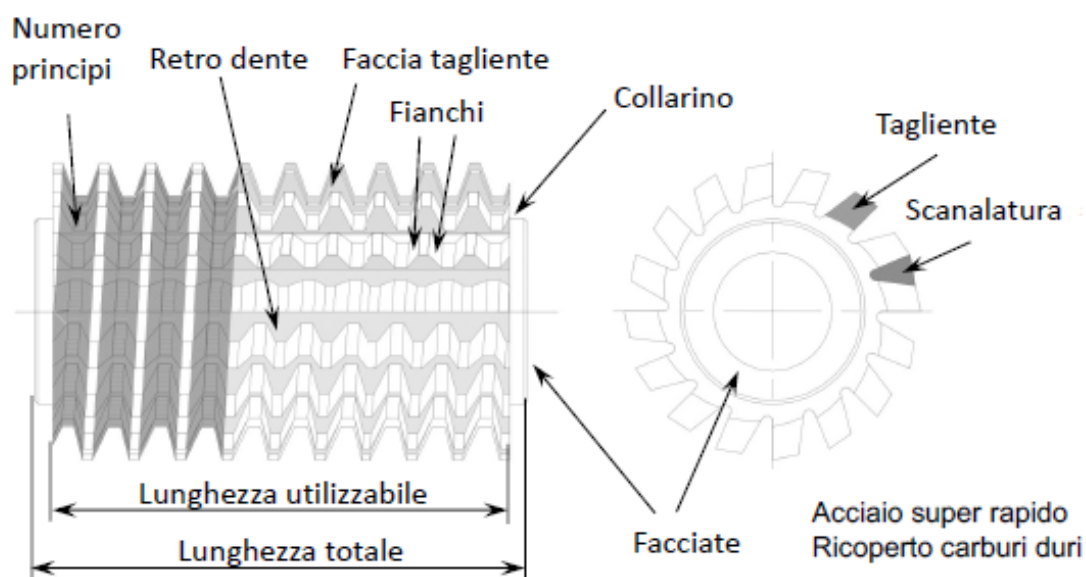


Figura 14: Nomenclatura utensile creatore.

Il creatore genera il profilo ad evolvente sul dente dell'ingranaggio con un procedimento che è detto "per involuppo" di tutte le posizioni limite, vedi Figura 15 [4].

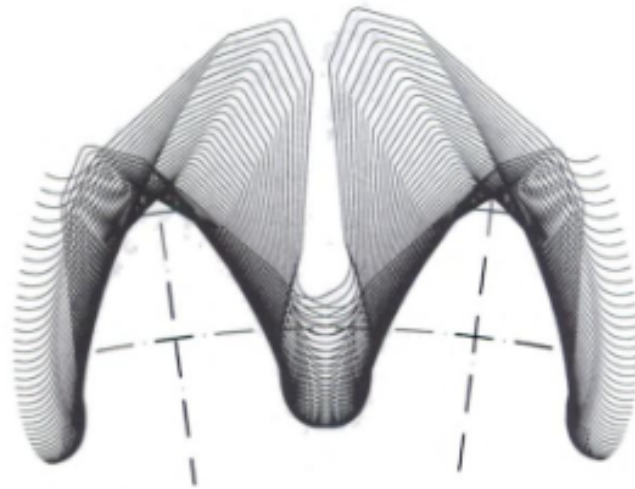


Figura 15: Generazione del profilo per involuppo.

Ogni dente del creatore, per poter lavorare correttamente, deve avere , in corrispondenza di ogni spigolo tagliente una spoglia adeguata per impedire il cosiddetto tallonamento.

Il valore della spoglia sul fianco dipende dal valore della spoglia di testa e dall'angolo di pressione. Detto:

- α_f la spoglia sui fianchi;
- α_s la spoglia di testa;
- α_{on} l'angolo di pressione normale

si ha:

$$\tan \alpha_f = \tan \alpha_s * \tan \alpha_{on} \quad (25)$$

Ad esempio se si considera un creatore con angolo di pressione 20° e con angolo di spoglia di testa di 10° , si avrà una spoglia sul fianco di circa 3.7° .

La parte di tagliente che si trova sul diametro esterno del creatore possiede una spoglia di testa, su tutto il profilo del dente, che è parte di una curva denominata spirale logaritmica. Con questo tipo di spoglia si garantisce l'invariabilità del profilo e la costanza di spoglia per tutte le affilature e la vita del creatore. Questo perchè il piano di affilatura è progettato quasi sempre per essere radiale (spoglia frontale = 0°), il profilo tagliente giace su un piano che passa per l'asse del creatore e la spirale logaritmica garantisce appunto che i profili che stanno su questa sezione normale siano costanti.

Il valore della spoglia sui fianchi dipende invece dalla spoglia di testa e dal valore dell'angolo di pressione, opportunamente correlato all'elica del creatore, al numero di principi e ad altre dimensioni della cremagliera di riferimento.

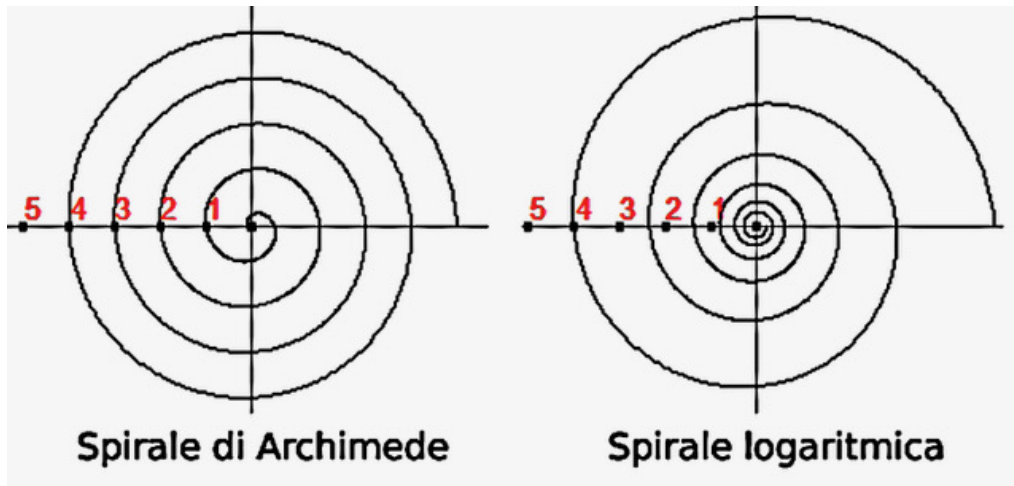


Figura 16: Spirale di Archimede e logaritmica.

Nella pratica viene utilizzata al posto della spirale logaritmica, la spirale di Archimede, perchè è di più facile esecuzione ed approssima quasi perfettamente quella logaritmica nei settori di interesse.

La spirale di Archimede è definita matematicamente come una semiretta che ruota intorno ad un punto fisso O , mentre un suo punto P si allontana da O di segmenti proporzionali agli angoli di cui la semiretta ha ruotato, il punto P descrive la spirale. La sua equazione in coordinate polari é:

$$\rho = K * \theta \quad (26)$$

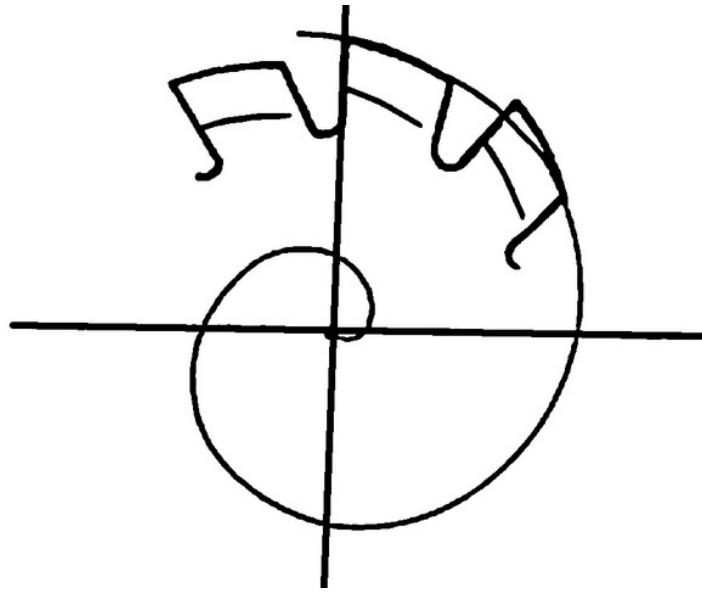


Figura 17: Spirale di Archimede per la spoglia di testa.

2.2 Processo di profilatura dente

Per realizzare la spoglia di testa, e quindi la spoglia dell'intero dente, vengono utilizzati due centri di lavoro:

1. Tornio a spogliare
2. Rettifica a spogliare (RCR)

Il tornio a spogliare, rappresentato in Figura 18, utilizza un utensile sagomato per creare il vano tra due denti. Questo tornio è dotato di un movimento alternativo per realizzare la spoglia del profilo. Il movimento alternativo segue una determinata entità di camma, che può essere meccanica o elettronica. Questo movimento trasla perpendicolarmente all'asse del creatore, di una quantità pari all'entità della camma, tra il petto di un dente e quello successivo. Questa fase viene definita fase di sgrossatura.

Per la fase di finitura, si utilizza una rettificatrice trasversale. Questo processo prevede l'uso di mole abrasive a disco, realizzate in materiali diversi a seconda del tipo di materiale di cui l'utensile è costituito. Le mole vengono profilate e riprofilate da un disco diamantato per ottenere la forma corretta per la lavorazione del profilo del dente. Anche in questo caso, la mola esegue un movimento alternativo simile a quello del tornio a spogliare.

Questa lavorazione è cruciale nel processo di creazione di un utensile creatore ed è il fulcro dell'elaborato che segue.

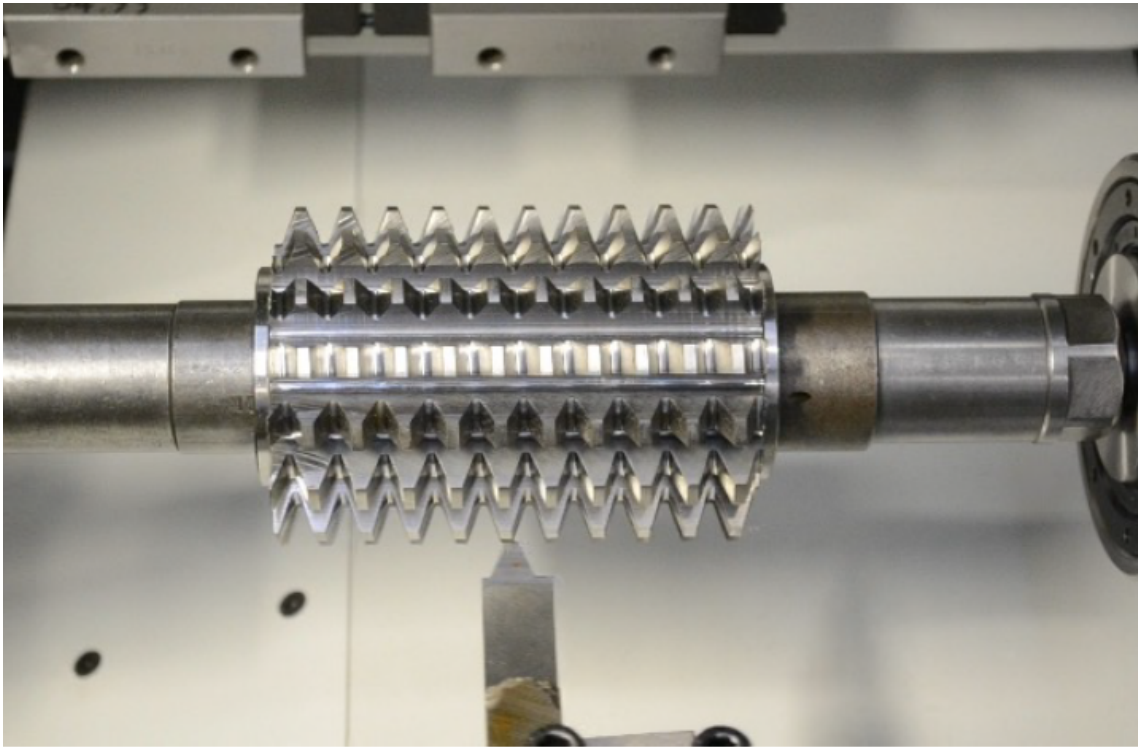


Figura 18: Tornio a spogliare.

2.3 Controllo degli utensili creatori

Durante il processo produttivo e prima della consegna al cliente, i creatori sono controllati su apparecchiature di misura (Klingelnberg) in grado di certificare, per ogni dimensione, il rispetto delle tolleranze geometriche e di forma secondo le normative UNI 6016 [1] e DIN 3968 [2]. Esistono cinque classi di tolleranza che identificano il grado di precisione:

1. la Classe AA corrisponde a un profilo rettificato di grande precisione;
2. la Classe A a un profilo rettificato di precisione;
3. la Classe B a un profilo rettificato normale;
4. la Classe C e D a un profilo non rettificato;

Le tabelle DIN 3968 si riferiscono a creatori ad un principio e non considerano le tolleranze su profili speciali quali: con protuberanza, con semi-topping, ecc. Nell'uso comune i creatori a più principi sono considerati come quelli standard ad un principio.

I controlli che andremo ad effettuare per l'analisi della variazione di profilo tra l'inizio e la fine vita includono l'errore di spessore dente e lo scostamento di forma di un tagliente.

2.3.1 Errore di spessore dente

L'errore di spessore dente f_s di un dente di fresa è la differenza tra la misura reale e la misura nominale dello spessore del dente sul cilindro di riferimento nella sezione normale.

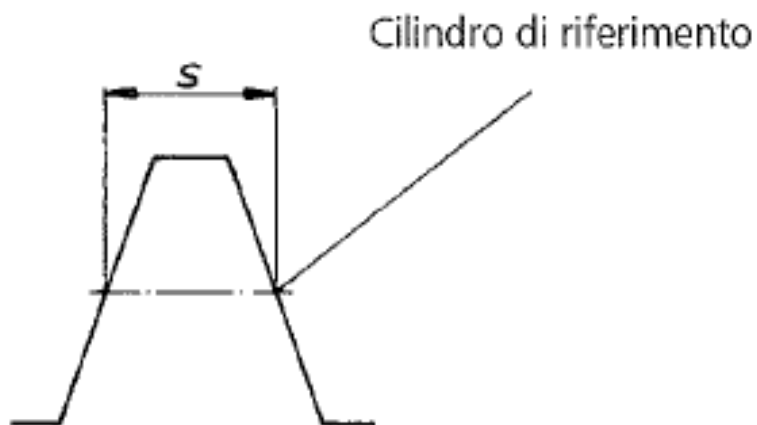


Figura 19: Errore di spessore dente.

2.3.2 Scostamento di forma di un tagliente

Lo scostamento della forma dei fianchi (F_{fs}) di un tagliente è la differenza tra la posizione reale di un punto del tagliente e la sua posizione nominale sulla vite di involuppo. Gli scostamenti vengono determinati nel piano di misura perpendicolare al contorno del profilo. La differenza tra lo scostamento massimo e minimo dei punti di misura dalla loro posizione nominale rappresenta la misura F_{fs} dello scostamento di forma del tagliente.

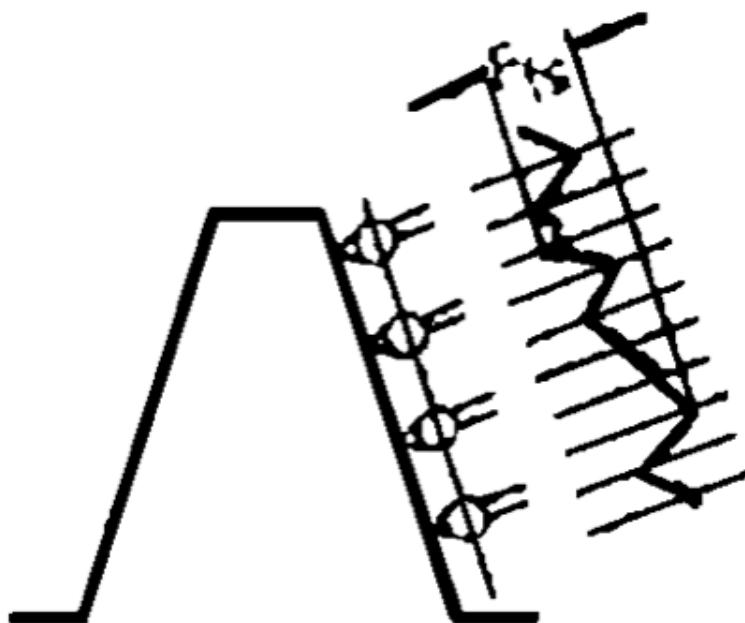


Figura 20: Scostamento di forma.

3 Software 3D di simulazione cinematica diretta: determinazione dei profili utensile a inizio e fine vita

Durante l'attività di tirocinio è stato ideato un programma che simula il movimento relativo tra creatore e mola per definire la geometria del profilo dell'utensile ad inizio e fine vita. Come ambiente di simulazione è stato scelto il modellatore 3D *Autodesk Inventor*. Al software è stata aggiunta un'applicazione mediante la definizione di una nuova libreria, che gestisce la definizione delle parti e dei parametri della simulazione, nonché la simulazione stessa. La libreria e quindi l'applicazione sono state realizzate mediante un progetto in *VisualStudio*.

Lanciando il programma si avvierà *Inventor* con il quale sarà possibile accedere all'interfaccia di gestione e definizione dei parametri necessari alla simulazione, riportata in Figura 21.

The screenshot shows a software interface titled "Form1" with a light gray background. At the top left, there are two buttons: "MODELLO CREATORE" and "MODELLO MOLA". Below them is a larger button labeled "REALIZZA ASSIEME". To the right of these buttons is a section titled "dati INPUT" containing several numerical input fields with up/down arrows: "Ang. elica rettificata" (0.00000), "Camma" (0.000), "Taglienti" (0), "D_Mola" (0.00000), "D_Creatore" (0.00000), "H_tot dente (H1W)" (0.0000000), "Offset rotazione" (0.000), "Offset traslazione" (0.0000000), "TOSW (P_ass)" (0.0000000), and "Offset interasse" (0.00000). Below the input fields is a section titled "DIREZIONE ELICA DI FILETTO" with two radio buttons: "DESTRO" and "SINISTRO". To the right of this section is a red button labeled "RESET DATI". In the lower-left area, there is a section titled "dati SIMULAZIONE" with four input fields: "angolo di inizio" (0.0000), "angolo di fine" (0.0000), "STEP simulazione" (0.0000), and "angolo attuale" (0.0000). Below this section is a button labeled "START SIMULAZIONE". At the bottom right, there is a "Log TextBox" label above a large empty rectangular box.

Figura 21: Interfaccia applicazione per la simulazione cinematica.

Precedentemente, l'utente deve aver sviluppato tramite il software *Inventor* due modelli essenziali per l'analisi.

Il primo modello è l'utensile creatore grezzo, mentre il secondo è la mola abrasiva, entrambi fondamentali per il successivo processo di assemblaggio.

Nel pannello adiacente, designato come "dati INPUT", sono elencati tutti i parametri necessari per stabilire l'orientamento relativo tra l'utensile e la mola abrasiva. Nella sezione "simulazione", sono raggruppati i parametri per l'emulazione del processo.

Manipolando individualmente ciascun parametro, si procede a definire con precisione la posizione di ogni componente nell'assemblaggio. Tale metodologia punta a replicare accuratamente le condizioni operative della macchina utensile impiegata nel processo di rettifica (RCR).

Cliccando il pulsante "START SIMULAZIONE", si darà il via all'intero processo. Durante questa fase, avviene una sottrazione booleana in ogni passo di simulazione, con la mola abrasiva che modifica progressivamente la forma del pezzo grezzo, replicando così fedelmente l'operatività reale.

Infine, per monitorare l'esito delle iterazioni, nella casella di Log saranno registrate le singole sottrazioni, evidenziando sia i risultati positivi che quelli negativi.

3.1 Definizione del modello creatore

Un primo passo cruciale nel processo di progettazione dell'utensile creatore consiste nel disegnare il grezzo iniziale tramite il software *Inventor*. Questo componente deve essere progettato in conformità con i requisiti specificati nel Documento di Definizione del Lavoro (DDL) fornito dai sistemi informatici aziendali preesistenti. È fondamentale garantire che il creatore soddisfi i parametri richiesti, specialmente il diametro esterno e la lunghezza utile affilabile.

Inizialmente, la concezione del creatore prevedeva la realizzazione di un cilindro pieno su cui individuare i piani di inizio e fine della vita utile per i successivi rilevamenti. Tuttavia, questo approccio è stato rivisto, optando invece per due spicchi di spessore approssimativo di 0.5 mm ciascuno. Questa scelta è stata motivata dalla maggiore efficienza nei calcoli iterativi e dalla facilità di estrazione del profilo, garantendo al contempo un risultato conforme alle specifiche richieste.

Una volta progettato il creatore, il processo avanza con il caricamento del modello all'interno dell'ambiente di sviluppo di *Inventor*. Questa fase consente di integrare il componente principale nell'interfaccia del software.

L'utente avvia il caricamento del modello cliccando sul pulsante designato, il quale apre un dialogo di selezione file che consente di individuare e selezionare il file del creatore in formato .ipt. Una volta selezionato il file, il percorso viene acquisito e il modello 3D viene importato nell'ambiente di lavoro di *Inventor* utilizzando il metodo *Documents.Open()*.

Per garantire un processo fluido, il codice è progettato per gestire eventuali errori durante l'apertura del documento attraverso un blocco *Try - Catch*, che cattura ed elabora le eccezioni che potrebbero verificarsi durante l'operazione. In caso di successo,

il modello dell'utensile viene caricato correttamente nell'interfaccia di *Inventor* e può essere utilizzato per ulteriori operazioni di progettazione e simulazione.

3.2 Definizione del modello mola

Il secondo passo consiste nella realizzazione, in ambiente virtuale, della geometria effettiva della mola abrasiva. Per realizzarla, è stato necessario iniziare dal percorso di profilatura che il disco diamantato esercita sulla mola abrasiva, al fine di estrapolarne il profilo. Per supportare questa fase, ho utilizzato un software aziendale, che non è altro che il programma impiegato dalla macchina a controllo numerico per la rettifica dei creatori (Figura 22).

In particolare, i principali parametri della macchina per la rettifica e quindi per il calcolo del profilo sono i seguenti:

- modulo di pressione normale
- numero di taglienti
- diametro esterno creatore
- diametro mola
- numero di principi
- entità di camma
- passo assiale
- angolo elica di rettifica
- spessore primitivo normale del vano
- altezza totale dente (nal caso di utensile semitopping)
- H1W (nel caso di utensile non semitopping)
- raggio di semitopping
- angolo di pressione normale
- angolo di pressione normale del semi-topping
- addendum
- raggio di testa: raccordo di fondo

- raggio di fondo: raccordo di testa

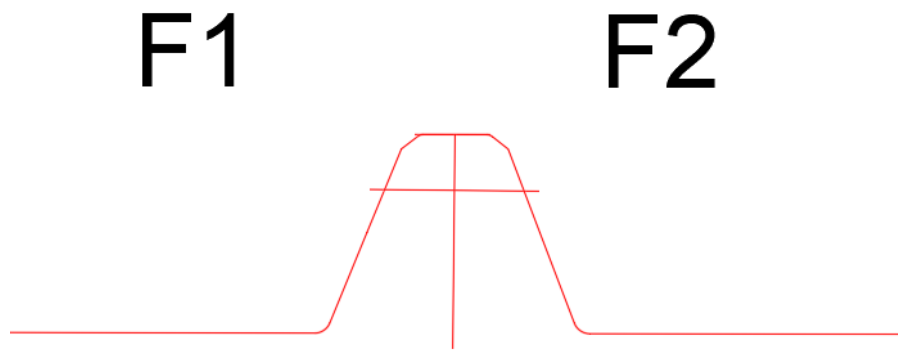


Figura 22: Profilo mola derivante da percorso di profilatura.

Infine, utilizzando questo profilo, sarà possibile realizzare il modello 3D della mola mediante la tecnica della rivoluzione di corpi in *Inventor*.

Per quanto riguarda la fase di caricamento del modello della mola, il procedimento è del tutto simile al precedente consentendo di integrare il componente nell'ambiente virtuale (Figura 24).

Una volta selezionato il file, il percorso viene acquisito e il modello 3D della mola viene importato nell'ambiente di lavoro. Anche in questa fase, è stata implementata una gestione degli errori tramite un blocco *Try-Catch* per affrontare eventuali problematiche durante l'apertura del documento.

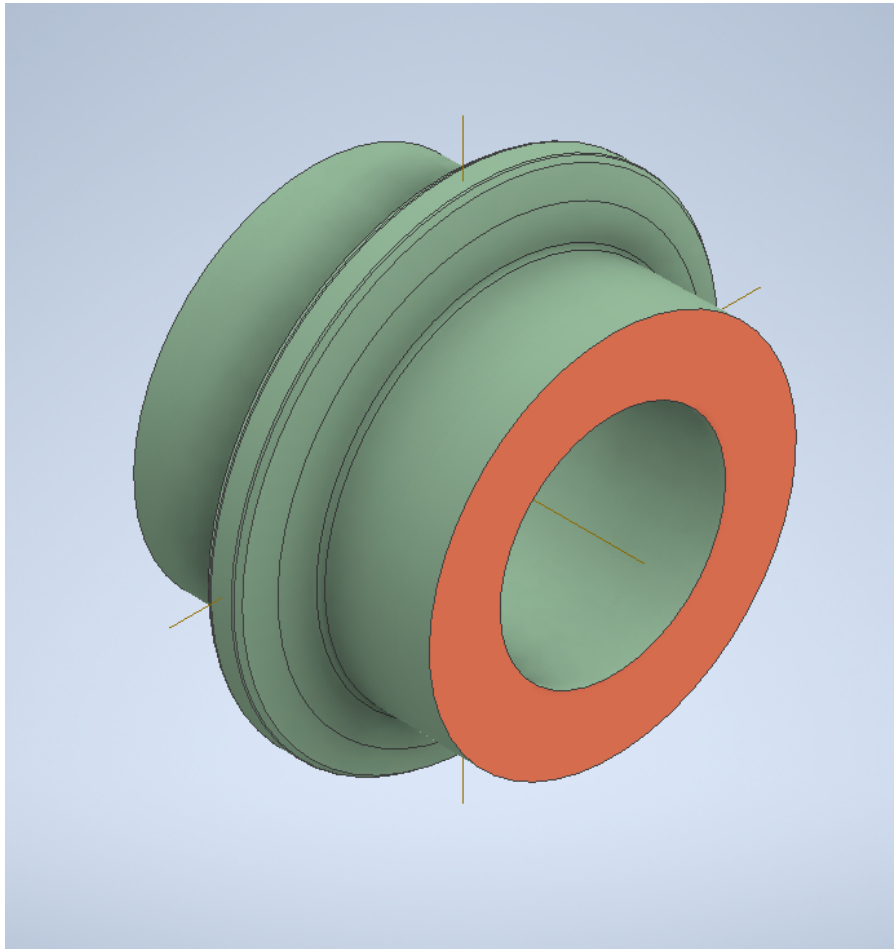


Figura 23: Modello 3D di una mola.

3.3 Processo di creazione dell'assieme virtuale

Le parti precedentemente definite vengono integrate in un assieme, vincolate a una parte fissa costituita da due sistemi di riferimento parametrizzati in base alla simulazione cinematica descritta nei successivi paragrafi. Questi parametri determinano le posizioni relative e gli orientamenti dei due sistemi di riferimento, come ad esempio la posizione dell'asse della mola rispetto a quella del creatore e l'inclinazione del primo rispetto al secondo.

Questo processo avviene attraverso diverse fasi: inizialmente, viene creato un nuovo documento di tipo "assieme" (*AssemblyDocumentObject*) che funge da contenitore per tutte le parti coinvolte nell'assieme virtuale dei componenti.

Successivamente, vengono definiti i parametri utente necessari per modellare correttamente gli assiemi.

Una volta definiti i parametri, il codice procede con l'aggiunta delle occorrenze dei due componenti principali dell'assieme: *HobPath* e *molaPath*. Queste occorrenze rappresentano le repliche virtuali dei componenti reali all'interno dell'assieme e sono aggiunte utilizzando le rispettive geometrie di percorso, specificando così la posizione e l'orientamento dei componenti nell'assieme.

Successivamente, il codice applica vincoli e relazioni geometriche tra i vari componenti per garantire il corretto comportamento dell'assieme. Ad esempio, vengono definiti vincoli di rotazione e traslazione per assicurare che i componenti si muovano in modo appropriato durante le simulazioni successive.

In sintesi, il codice offre un approccio strutturato e automatizzato per la creazione di un assieme virtuale complesso all'interno di *Inventor*. Sfruttando il linguaggio di programmazione *VisualBasic.NET* e le funzionalità avanzate di modellazione di *Inventor*, è possibile semplificare e ottimizzare il processo di progettazione e simulazione, riducendo così il tempo e gli errori associati alla progettazione manuale.

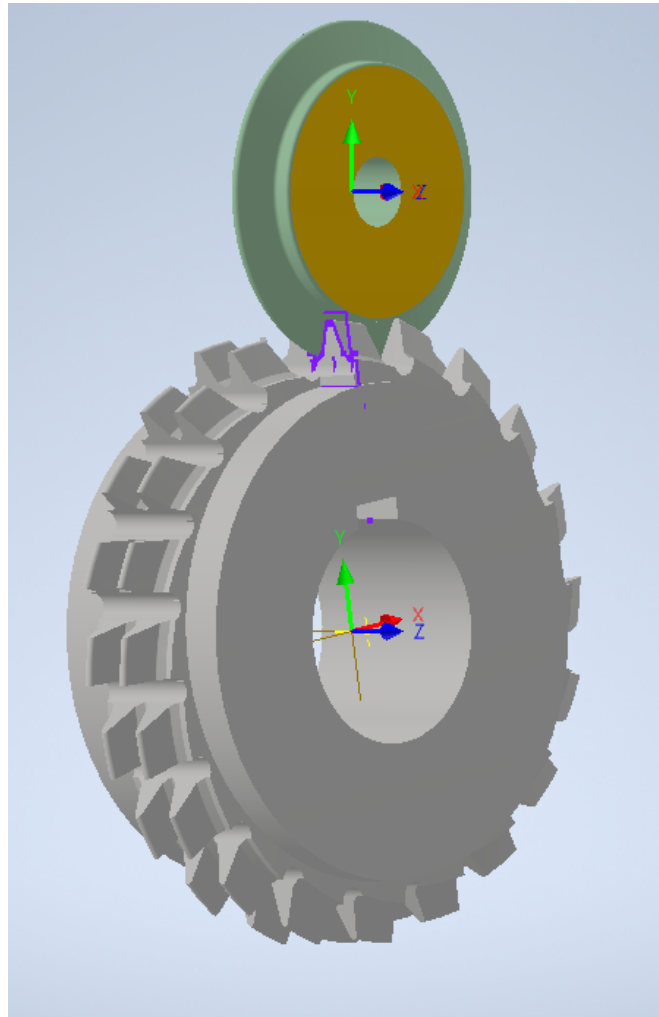


Figura 24: Assieme virtuale.

3.4 Parametri utente

L'elenco dei parametri circoscritti al riquadro denominato "dati INPUT" sono utili a definire il ruolo delle parti nella simulazione. I movimenti contemplati sono tre ossia la rotazione del creatore attorno al proprio asse e la traslazione lungo lo stesso. Il terzo movimento è quello di traslazione della mola lungo la direttrice individuata dall'interasse dei due componenti.

Di seguito andremo ad analizzare in che modo i parametri utente intervengono sul movimento reciproco di creatore e mola per simulare il processo di rettifica della macchina RCR.

3.4.1 Moto roto-traslatorio dell'utensile creatore

Come anticipato, la fase riguardante il movimento del creatore richiede una combinazione di rotazione attorno al suo asse e traslazione in accordo con parametri specifici.

Per quanto riguarda la rotazione attorno al proprio asse, l'utente deve selezionare nell'area denominata "Dati SIMULAZIONE" sia l'angolo di inizio che di fine della simulazione, oltre allo step di discretizzazione tra i due estremi. Il codice sviluppato guida il processo di rotazione del modello creatore, compreso tra i due estremi di angolazione, attraverso un ciclo *while* controllato dalla variabile *angolo_now*, che rappresenta l'angolazione corrente del creatore.

All'interno di questo ciclo, l'angolo corrente viene incrementato di un valore pari allo step selezionato, e viene applicata la trasformazione corrispondente alla parte. In particolare, la rotazione effettiva è ottenuta modificando il parametro utente *ang_CR*, il quale viene aggiornato in base all'angolazione corrente convertita in radianti e con un segno negativo per garantire la rotazione destrorsa.

Per quanto riguarda la traslazione della parte, sarà essenziale coordinare i due movimenti utilizzando il passo assiale e l'angolo corrente del creatore. Inoltre l'utente dovrà selezionare nella casella apposita la direzione dell'angolo di filetto, specificando se è destro (Equazione 27) o sinistro (Equazione 28).

$$Avanz_{CR} = \frac{P_{ass}}{360} * ang_{CR} + Offset_{traslazione} \quad (27)$$

$$Avanz_{CR} = -\frac{P_{ass}}{360} * ang_{CR} + Offset_{traslazione} \quad (28)$$

Dunque, il creatore traslerà di una lunghezza pari al passo assiale ogni 360°, mentre l'*Offset_traslazione* è una costante arbitraria selezionabile tramite un'interfaccia di tipo *NumericUpDown*, finalizzata a posizionare le parti nella maniera più appropriata.

3.4.2 Moto di avanzamento della mola abrasiva

Per orchestrare il posizionamento e il movimento del modello della mola abrasiva all'interno dello spazio tridimensionale, sono state definite delle coordinate utente (UCS) alle quali vengono ancorate le coordinate della parte stessa. Questa definizione ha comportato la creazione di una matrice di trasformazione, che consente alla mola di spostarsi lungo gli assi X, Y e Z.

Inoltre, è stata elaborata una logica di controllo che regola i movimenti della mola in base ai parametri specificati dall'utente. Questa logica di controllo gestisce il flusso dei dati e delle istruzioni necessarie per garantire che la mola segua fedelmente il percorso della spirale di Archimede, fondamentale per la rastremazione della testa del dente.

Il cinematismo della mola è determinato da una entità di camma la quale corrisponde all'avanzamento radiale tra un dente e il successivo.

Selezionando tramite l'interfaccia numerica l'entità della camma e il numero di taglianti, il programma calcola la costante di Archimede utilizzando l'Equazione (29):

$$K_{Archimede} = \frac{Camma}{\frac{360}{Taglienti}} \quad (29)$$

Al fine di definire correttamente i ruoli delle due parti nell'assieme di simulazione, sono necessari altri parametri costanti per l'interasse:

- Diametro esterno del creatore [mm]
- Diametro esterno della mola [mm]
- Altezza totale del dente o H1W [mm]

Quindi l'espressione della variazione di interasse lungo la direzione Y della UCS è la seguente:

$$Interasse = \frac{D_{creatore}}{2} + \frac{D_{mola}}{2} - H1W - K_{Archimede} * ang_{CR} \quad (30)$$

Grazie al parametro ang_{CR} , otteniamo un movimento sincronizzato tra rotazione e traslazione del creatore, come descritto nelle equazioni (27) e (28), e una corretta penetrazione della mola nell'utensile, con andamento descritto nell'equazione (30).

4 Simulazioni

Avviando la simulazione l'utensile creatore ruota di un angolo pari allo step e trasla di una quantità proporzionale ad esso, secondo il passo assiale. Nel mentre la mola penetra con moto di avanzamento proporzionale all'ampiezza dell'angolo a cui si trova l'utensile.

I movimenti corrispondono ad un cambio di orientamento dei sistemi di riferimento, che causano quindi il cinematismo degli oggetti solidali ad essi. Segue quindi la sottrazione booleana dei volumi ossia la superficie della mola abrasiva taglia il volume dell'utensile compenetrante.

Al termine della simulazione si apre il file relativo alla parte creatore ed è possibile selezionare la superficie da proiettare su un piano normale all'asse, per ottenere quindi il profilo del tagliente ad inizio e fine vita, esportati mediante un file DXF su *AutoCAD*.

4.1 Validazione del software

Di seguito sono presentati i risultati di sei simulazioni, per ciascuna delle quali è stata verificata la validità. La validazione è stata ottenuta confrontando direttamente i risultati con quelli del programma di progettazione aziendale, eseguito in ambiente *AutoCAD*.

Il profilo assiale di inizio vita, derivante dalla simulazione nell'ambiente virtuale, è stato sovrapposto al corrispondente profilo di riferimento. Tale sovrapposizione è stata realizzata allineando la quota dell'addendum e l'intersezione di quest'ultimo con il profilo del dente, come illustrato nell'esempio della Figura 25. In figura, il profilo di riferimento, generato dal software di progettazione aziendale, è rappresentato in rosso, mentre il profilo ottenuto dalla simulazione è mostrato in nero.

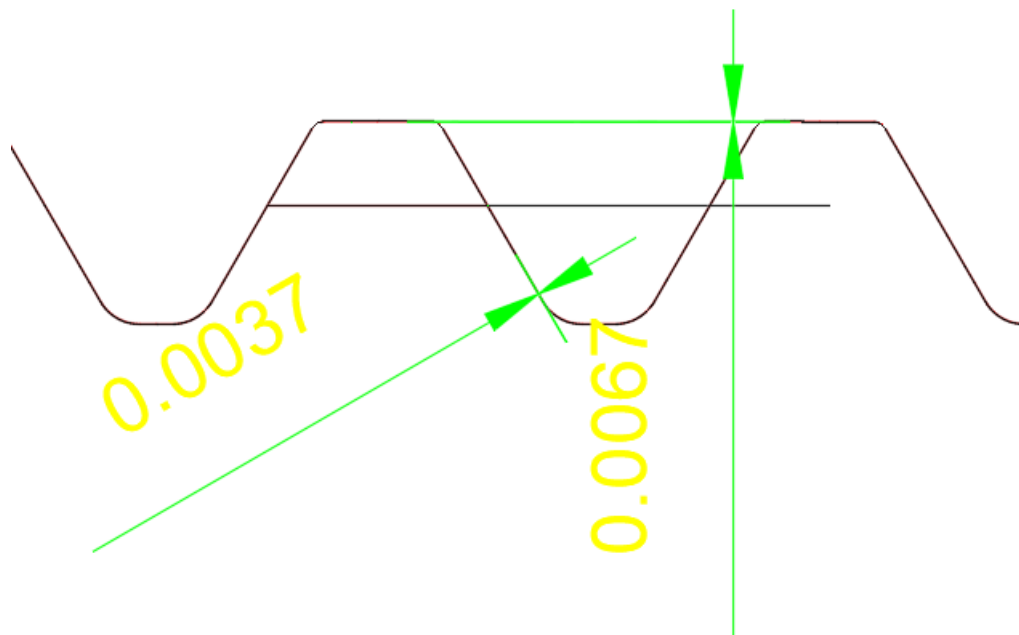


Figura 25: Dettaglio: confronto tra i profili.

Vengono controllati la forma del profilo, l'eventuale posizione del semi-topping e il diametro della circonferenza esterna.

Il fianco del dente è stato verificato tramite la sovrapposizione dei profili e il confronto con la misura del diametro primitivo.

Per ciascuna simulazione, è stata eseguita prima la validazione del modello. In caso di esito positivo, si è proceduto al confronto del profilo tra l'inizio e la fine della vita utile dell'utensile.

Le simulazioni sono state condotte utilizzando i parametri di progetto già presenti in azienda. Cinque simulazioni hanno avuto esito positivo, mentre una ha avuto esito negativo, la quale verrà analizzata in dettaglio successivamente. Ogni simulazione è stata eseguita con un passo angolare di 0.1° , per una rotazione variabile in base alla lunghezza utile affilabile. Questo approccio è stato adottato considerando il profilo individuale di un dente come punto di interesse principale.

4.2 Impatto delle variazioni parametriche sul profilo a fine vita

Per ogni creatore analizzato, sono state eseguite diverse prove al fine di valutare l'impatto di variazioni parametriche sul profilo risultante a fine vita. Le simulazioni sono state condotte variando i seguenti parametri di progetto:

- Il progetto di riferimento, con diametro nominale della mola.
- Aumento del diametro della mola.
- Riduzione del diametro della mola.
- Aumento dell'entità di camma.
- Aumento della lunghezza utile affilabile.
- Aumento del diametro esterno del creatore.
- Aumento del numero di principi.

Queste variazioni sono state studiate per comprendere il loro impatto sul profilo del dente alla fine del suo ciclo di vita.

4.2.1 Simulazione 1

Questa simulazione riguarda un utensile creatore affilato dritto di modulo 2.5. I dati relativi all'utensile da realizzare sono riportati in Tabella 1.

DATI CREATORE	
Modulo normale	2.5
Angolo di pressione normale	30°
Numero di principi	2
Inclinazione filetti	3.7166°
Verso di inclinazione dei filetti	Destro
Passo assiale	15.7411 mm
Numero di taglienti	17
Tipo di affilatura	Dritta
Entità di camma	2.5
Diametro esterno	80 mm
DATI MOLA	
Diametro esterno	44.220 mm

Tabella 1: Dati di riferimento modulo 2.5

Il profilo della mola è illustrato nella Figura 26. È importante notare la presenza di due lati distinti nella mola; ciò è dovuto al fatto che il lato destro della mola interagisce con il lato sinistro del dente del creatore e viceversa.

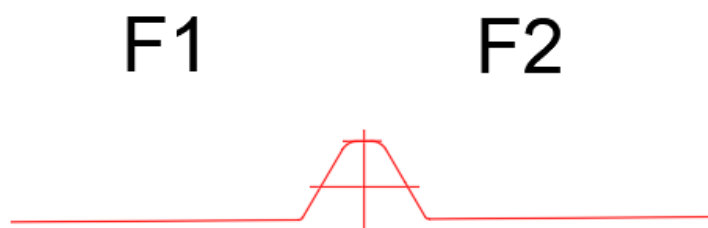


Figura 26: Profilo mola diametro 44.22 mm.

Per la fase di validazione è stata eseguita la sovrapposizione dei profili assiali. La Figura 27 mostra la sovrapposizione del profilo creatore ad inizio vita con il profilo di riferimento, nero e rosso.

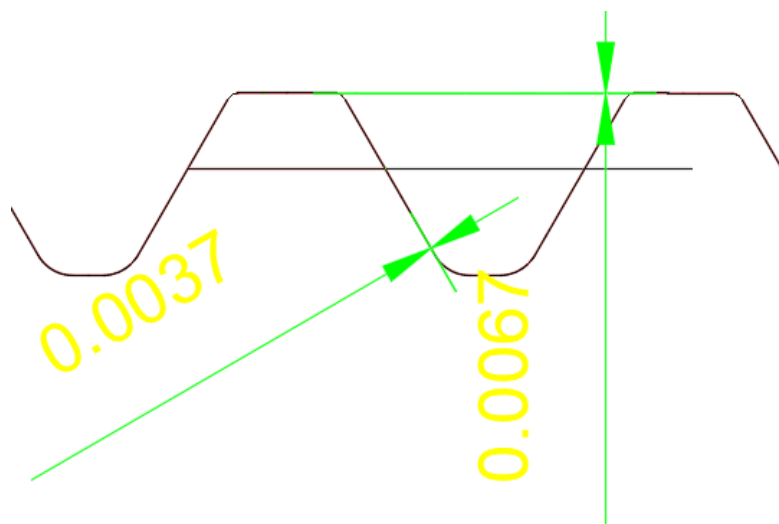


Figura 27: Validazione creatore modulo 2.5

Per il confronto tra il profilo del dente all'inizio e alla fine della sua vita utile, sono stati variati diversi parametri mantenendo costante il modulo e la forma del dente. Le misurazioni sono state effettuate sullo spessore primitivo del dente e sulla variazione dell'angolo di pressione normale. Per valutare questa variazione, i due profili sono stati sovrapposti all'altezza del dente $H1W$, e utilizzando AutoCAD sono state ottenute le misurazioni delle quote rilevanti in mm.

In Tabella 1 sono riportate le variazioni di profilo su spessore e forma dei due fianchi.

	modulo 2.5			CLASSE	
	ΔS	Ffs_sx	Ffs_dx	spessore	profilo dx
ideale	0	0	0	AA	AA
D mola = 44.2 mm	0.0033	0.0001	0.0025	AA	AA
D mola = 34.2 mm	0.0034	0.0002	0.0006	AA	AA
D mola = 64.2 mm	0.0002	0	0.0025	AA	AA
camma = 5	0.0105	0.006	0.0172	AA	B
LU affilabile	0.0013	0.0001	0.0041	AA	AA
D_Cr = 70 mm	0.0006	0.0005	0.0032	AA	AA
N° principi = 4	0.0002	0.0002	0.0055	AA	AA

Tabella 2: Raccolta dati modulo 2.5

Inoltre, ipotizzando la necessità di certificare l'utensile creatore sia all'inizio che alla fine della sua vita utile, secondo le specifiche della normativa DIN 3968 [2], è stato determinato il grado di tolleranza.

Al fine di rappresentare graficamente l'andamento dell'errore sul profilo del dente, i dati sono stati esportati su un foglio Excel, dal quale è stato generato un grafico a barre (Figura 28) per consentire un confronto immediato.

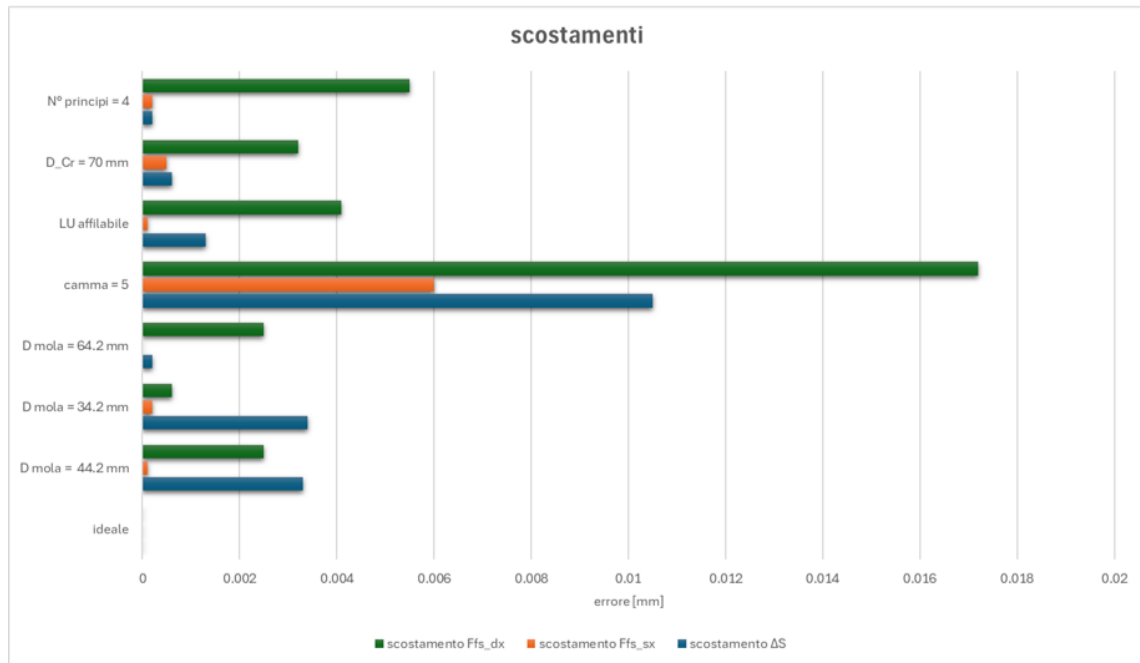


Figura 28: Scostamenti a fine vita creatore modulo 2.5.

Nel grafico rappresentato in Figura 29, si riporta il lato del dente che evidenzia le maggiori discrepanze in termini di Ffs .

Nel caso ideale, in cui non ci siano variazioni di forma nel profilo tra l'inizio e la fine della vita utile, ci si aspetterebbe una retta verticale che coincide con l'asse delle ordinate (rappresentata in blu).

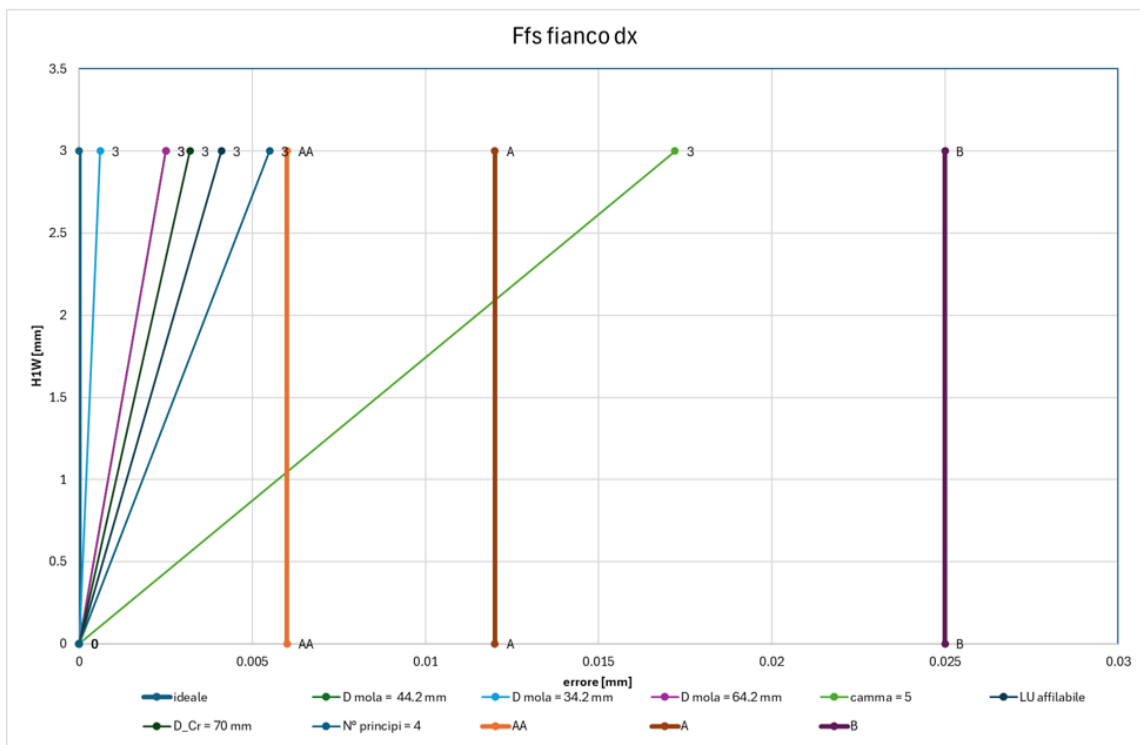


Figura 29: Scostamenti del fianco destro a fine vita creatore modulo 2.5.

4.2.2 Simulazione 2

Questa simulazione riguarda un utensile creatore dritto di modulo 3.05227 con semi-topping. I dati relativi all'utensile da realizzare sono riportati in Tabella 3.

DATI CREATORE	
Modulo normale	3.05227
Angolo di pressione normale	21.25°
Numero di principi	2
Inclinazione filetti	4.1°
Verso di inclinazione dei filetti	Destro
Passo assiale	19.22721 mm
Numero di taglienti	21
Tipo di affilatura	Dritta
Entità di camma	2.5
Diametro esterno	95 mm
DATI MOLA	
Diametro esterno	51.634 mm

Tabella 3: Dati di riferimento modulo 3.05227

Il profilo della mola è illustrato nella Figura 30.

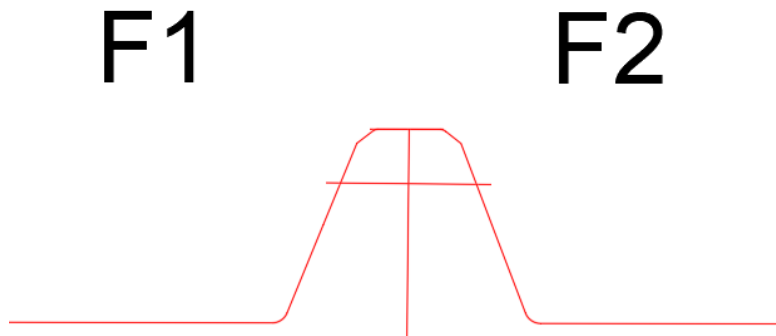


Figura 30: Profilo mola diametro 51.634 mm.

Il profilo di inizio vita dell'utensile, derivato dalla simulazione, è rappresentato nella Figura 31, dove viene sovrapposto al profilo di riferimento.

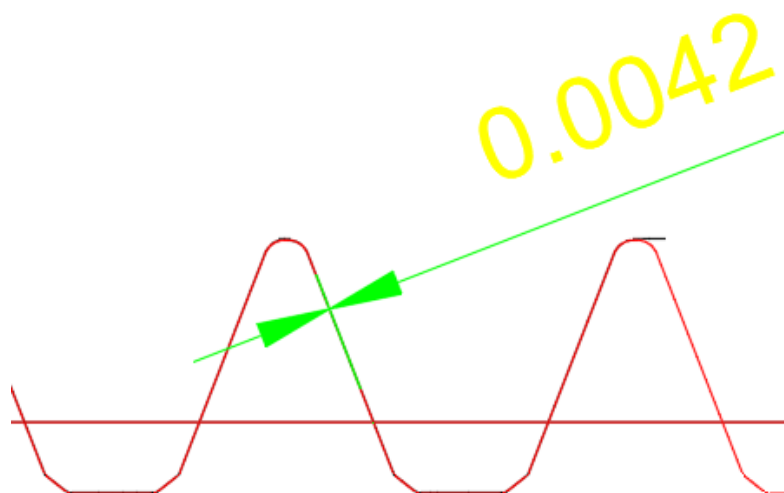


Figura 31: Validazione creatore modulo 3.05227

Per il confronto tra il profilo del dente all'inizio e alla fine della sua vita utile, sono stati variati diversi parametri come nel caso precedente, ma con entità adeguate al progetto di partenza.

Per valutare le variazioni, i due profili sono stati sovrapposti a una quota corrispondente allo stacco del semi-topping. Successivamente, utilizzando *AutoCAD*, sono state rilevate e misurate le quote significative.

In Tabella 3 sono riportate le variazioni di profilo su spessore e forma dei due fianchi.

Possiamo notare come secondo la normativa DIN 3968, raddoppiare l'entità di camma comporta un declassamento di due classi sulla forma del tagliente.

modulo 3.05227				CLASSE	
	ΔS	Ffs_sx	Ffs-dx	spessore	profilo dx
ideale	0	0	0	AA	AA
D mola = 51.634 mm	0.0037	0.001	0.0026	AA	AA
D mola = 31.634 mm	0.0056	0.0044	0.0055	AA	AA
D mola = 71.634 mm	0.0013	0.0004	0.0042	AA	AA
camma = 5	0.0211	0.069	0.0229	A	B
LU affilabile	0.005	0.001	0.0091	AA	A
D_Cr = 85 mm	0.0014	0	0.0039	AA	AA
N° principi = 4	0.0057	0.001	0.0069	AA	AA

Tabella 4: Raccolta dati modulo 3.05227

Gli andamenti in termini assoluti dell'errore di profilo dente a fine vita sono mostrati in Figura 32.

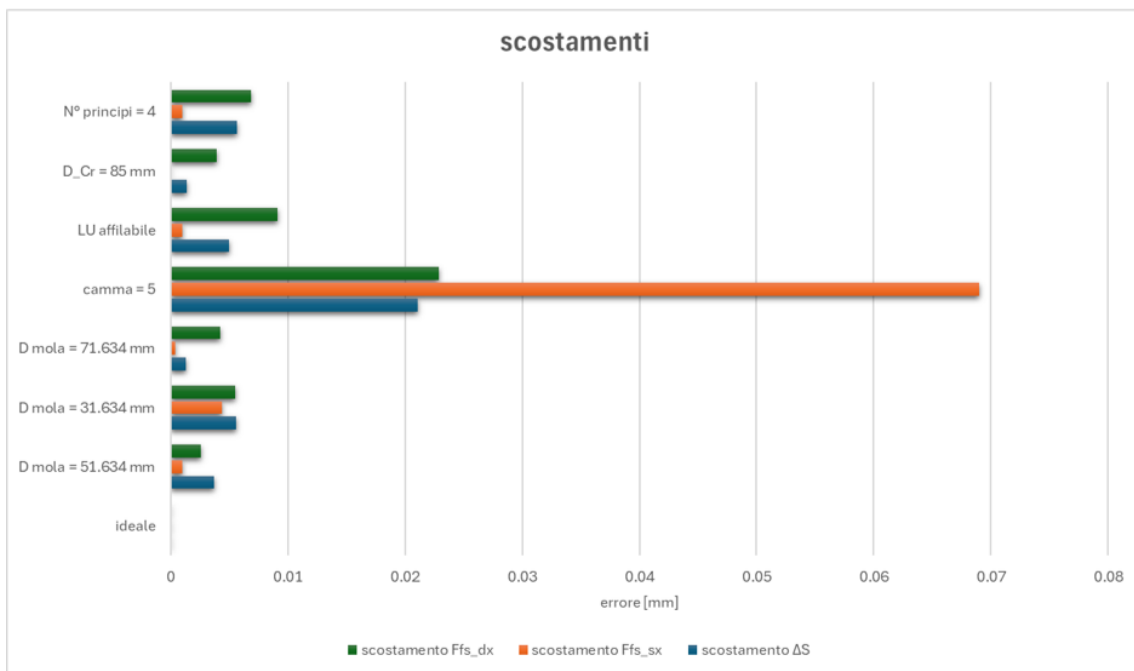


Figura 32: Scostamenti a fine vita creatore modulo 3.05227.

Nel grafico rappresentato in Figura 33, si riporta l' $F-fs$ del fianco destro.

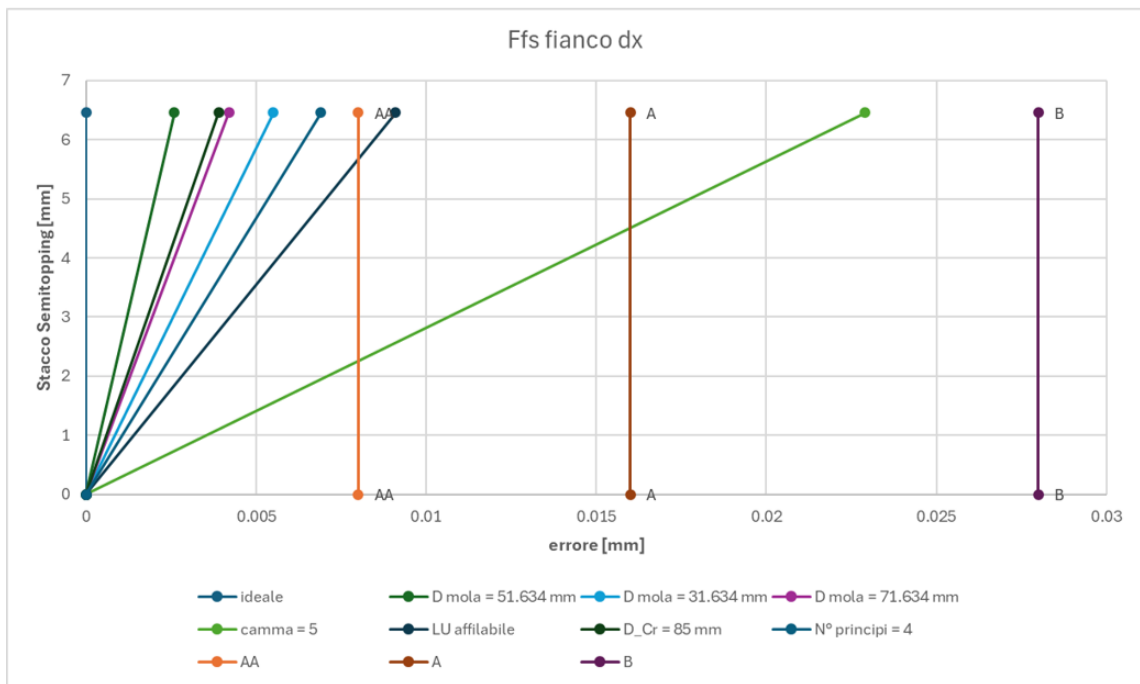


Figura 33: Errore sul tagliente di destra del creatore di modulo 3.05227.

4.2.3 Simulazione 3

Questa simulazione riguarda un utensile creatore ad affilatura dritta di modulo 5.82 con semi-topping e protuberanza. I dati relativi all'utensile da realizzare sono riportati in Tabella 5.

DATI CREATORE	
Modulo normale	5.82
Angolo di pressione normale	19°
Numero di principi	1
Inclinazione filetti	3.208056°
Verso di inclinazione dei filetti	Destro
Passo assiale	18.31277 mm
Numero di taglienti	16
Tipo di affilatura	Dritta
Entità di camma	4.25
Diametro esterno	120 mm
DATI MOLA	
Diametro esterno	68.022 mm

Tabella 5: Dati di riferimento modulo 5.82

Il profilo della mola è illustrato nella Figura 34.

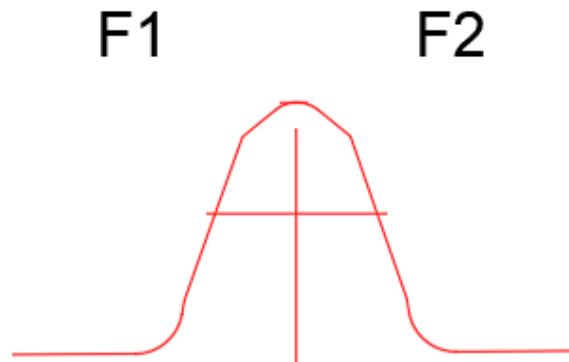


Figura 34: Profilo mola diametro 68.022 mm.

La sovrapposizione finalizzata alla validazione della prova è mostrata in Figura 35.

Utilizzando il medesimo metodo dei casi precedenti, è stata creata una tabella che elenca le variazioni di profilo a fine vita per tutti i progetti con lo stesso modulo esaminati.

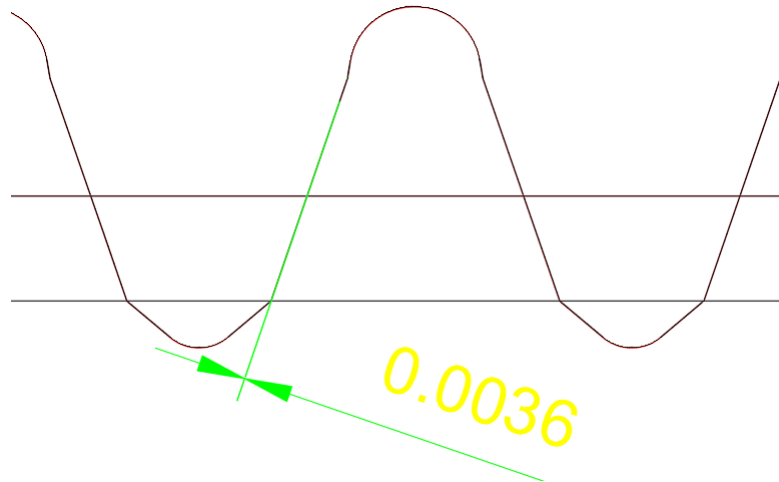


Figura 35: Validazione creatore modulo 5.82

modulo 5.82				CLASSE	
	ΔS	Ffs_sx	Ffs-dx	spessore	profilo dx
ideale	0	0	0	AA	AA
D mola = 68.022 mm	0.0083	0.0018	0.0117	AA	A
D mola = 48.022 mm	0.0127	0.0063	0.0132	AA	A
D mola = 88.022 mm	0.0047	0.0008	0.0088	AA	AA
camma = 8.5	0.0482	0.0152	0.0554	B	C
LU affilabile	0.0086	0.0018	0.0176	AA	B
D_Cr = 100 mm	0.0014	0.0013	0.0091	AA	A
N° principi = 3	0.0021	0.0221	0.0229	AA	B

Tabella 6: Raccolta dati modulo 5.82

In Tabella 5 sono riportate le variazioni di profilo su spessore e forma dei due fianchi.

Si inizia a notare una certa ricorrenza tra causa ed effetto, ad esempio si nota immediatamente come una variazione dell'entità di camma implica una caduta netta della classe del creatore, in linea con le precedenti simulazioni.

Gli andamenti in termini assoluti dell'errore di profilo dente a fine vita sono mostrati in Figura 36.

Nel grafico rappresentato in Figura 37, si riporta l' Ffs del fianco destro.

Si può notare che quasi tutte le modifiche di progetto apportate comportano un peggioramento del profilo a fine vita tale per cui l'utensile cambia di classe.

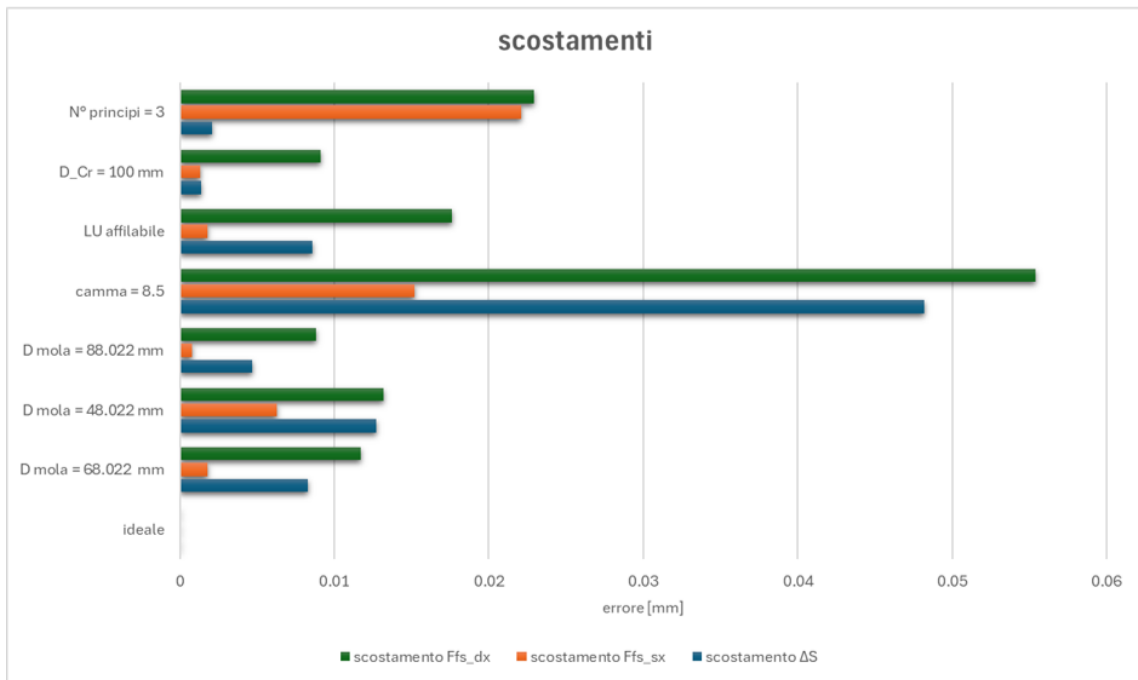


Figura 36: Scostamenti a fine vita creatore modulo 5.82.

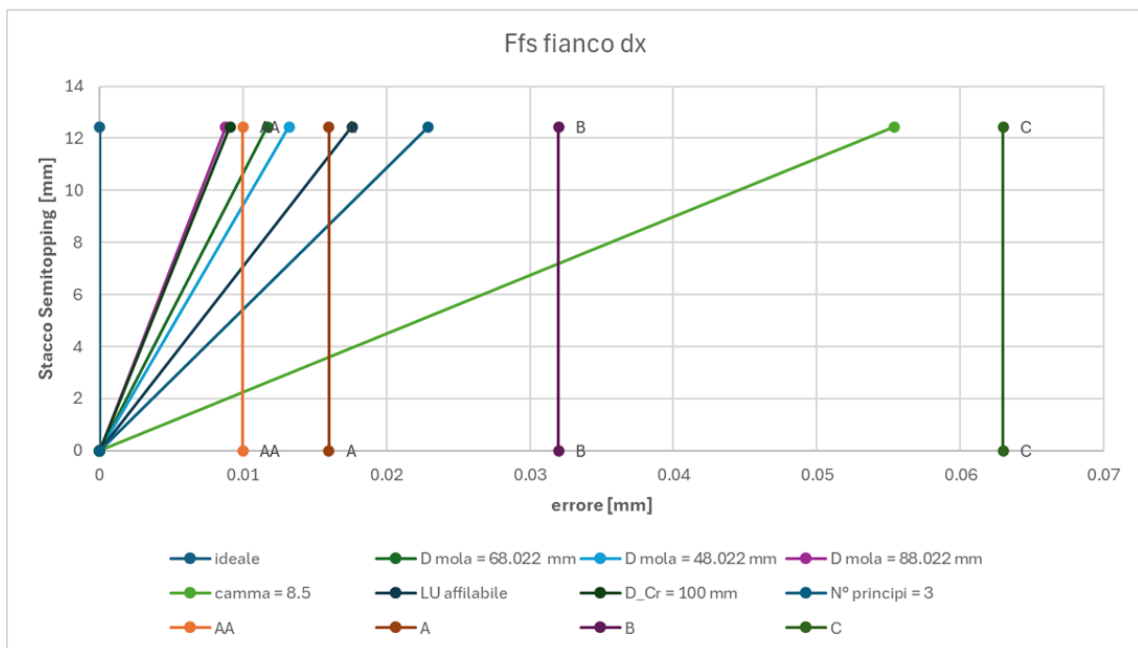


Figura 37: Errore sul tagliente di destra del creatore di modulo 5.82.

4.2.4 Simulazione 4

Continuando ad aumentare il modulo degli utensili presi in considerazione, il successivo è un creatore di modulo 8 ad affilatura dritta. I dati fondamentali dell'utensile da realizzare sono riportati in Tabella 7.

DATI CREATORE	
Modulo normale	8
Angolo di pressione normale	20°
Numero di principi	1
Inclinazione filetti	3.6883°
Verso di inclinazione dei filetti	Destro
Passo assiale	25.1888 mm
Numero di taglienti	15
Tipo di affilatura	Dritta
Entità di camma	5.5
Diametro esterno	140 mm
DATI MOLA	
Diametro esterno	78.76 mm

Tabella 7: Dati di riferimento modulo 8

Il profilo della mola è illustrato nella Figura 38.

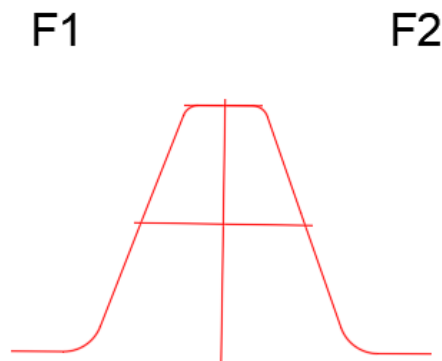


Figura 38: Profilo mola diametro 78.76 mm.

La sovrapposizione finalizzata alla validazione della prova è mostrata in Figura 39.

Utilizzando il medesimo metodo dei casi precedenti, è stata creata una tabella che elenca le variazioni di profilo a fine vita per tutti i progetti con lo stesso modulo esaminati.

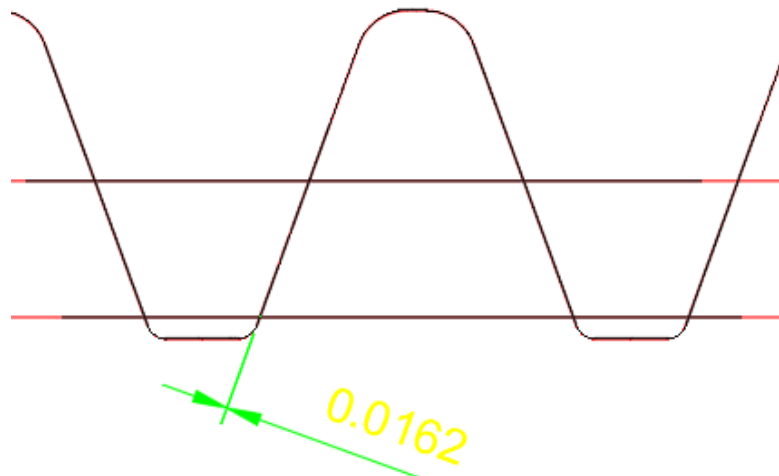


Figura 39: Validazione creatore modulo 8

modulo 8				CLASSE	
	ΔS	Ffs _{sx}	Ffs <sub-dx< sub=""></sub-dx<>	spessore	profilo dx
ideale	0	0	0	AA	AA
D mola = 78.760 mm	0.0077	0.0001	0.0194	AA	A
D mola = 58.760 mm	0.0107	0.0049	0.0216	AA	B
D mola = 98.760 mm	0.0021	0.0012	0.0201	AA	A
camma = 10	0.0496	0.0184	0.0933	A	D
LU affilabile	0.0087	0.0033	0.0295	AA	B
D_Cr = 130 mm	0.0038	0.001	0.0238	AA	B
N° principi = 3	0.0024	0.0102	0.0474	AA	C

Tabella 8: Raccolta dati modulo 8

In Tabella 8 sono riportate le variazioni di profilo su spessore e forma dei due fianchi.

Anche in questa simulazione si osserva che l'aumento dell'entità della camma e del numero di principi provoca una deviazione del profilo a fine vita significativamente maggiore rispetto a quella rilevata con altri parametri.

Gli andamenti in termini assoluti dell'errore di profilo dente a fine vita sono mostrati in Figura 40.

Nel grafico rappresentato in Figura 41, si riporta l' $F-fs$ del fianco destro.

Si può notare che quasi tutte le modifiche di progetto apportate comportano un peggioramento del profilo a fine vita tale per cui l'utensile cambia di Classe.

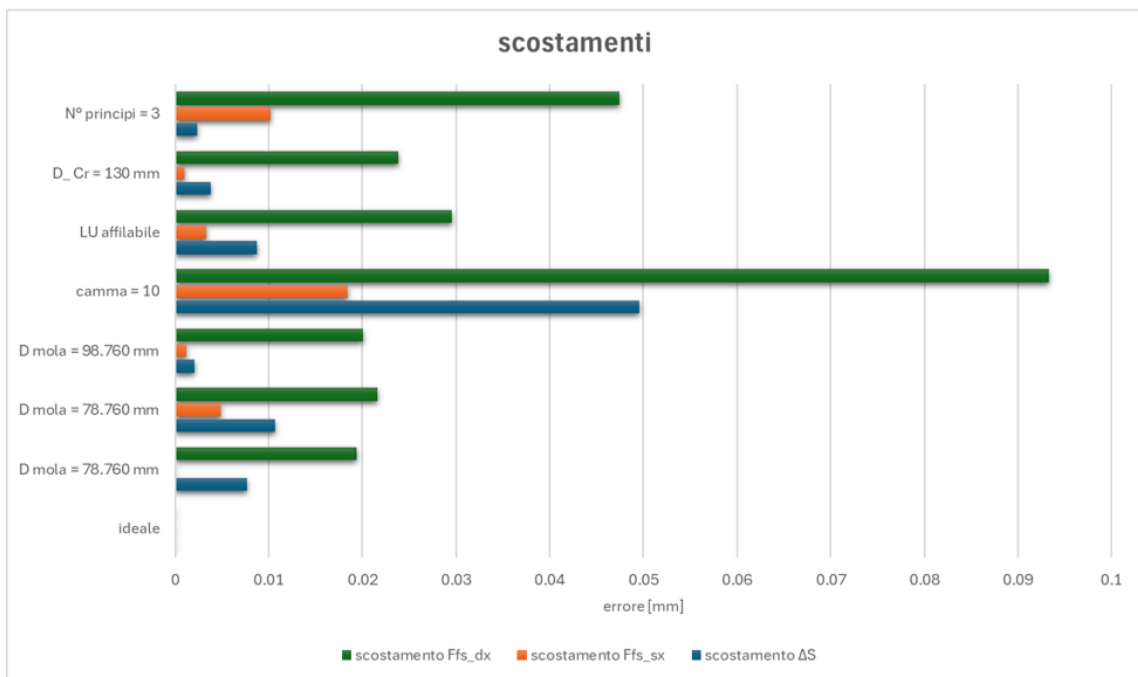


Figura 40: Scostamenti a fine vita creatore modulo 8.

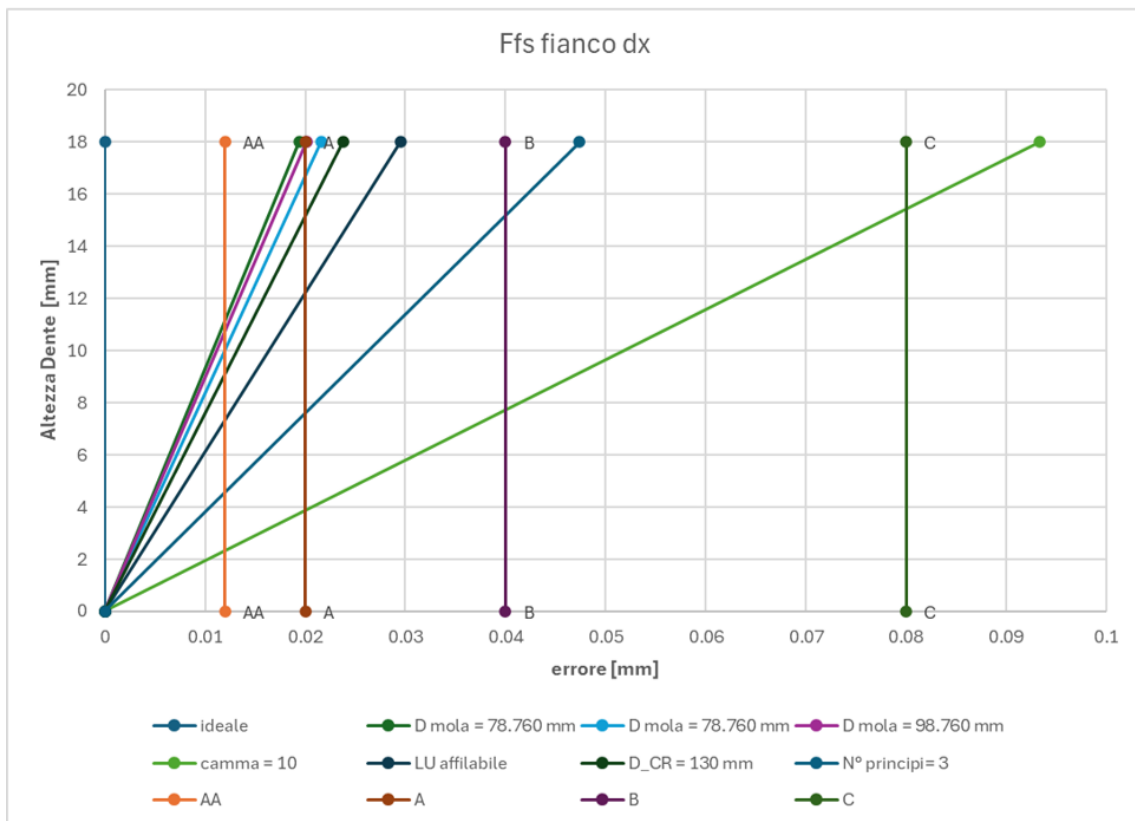


Figura 41: Errore sul tagliente di destra del creatore di modulo 8.

4.2.5 Simulazione 5

L'ultima simulazione eseguita con esito positivo della validazione è un creatore semi-topping di modulo 10 ad affilatura dritta. I dati caratteristici dell'utensile da realizzare sono riportati in Tabella 9.

DATI CREATORE	
Modulo normale	10
Angolo di pressione normale	20°
Numero di principi	1
Inclinazione filetti	3.6991°
Verso di inclinazione dei filetti	Destro
Passo assiale	31.4815 mm
Numero di taglienti	15
Tipo di affilatura	Dritta
Entità di camma	7
Diametro esterno	180 mm
DATI MOLA	
Diametro esterno	88.649 mm

Tabella 9: Dati di riferimento modulo 10

Il profilo della mola è illustrato nella Figura 42.

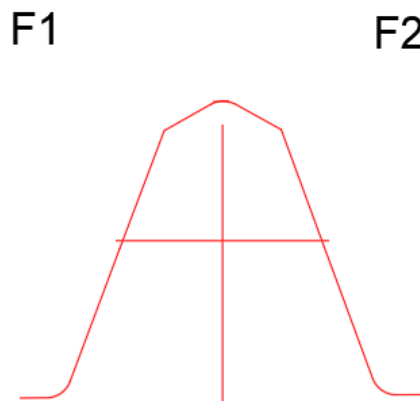


Figura 42: Profilo mola diametro 88.649 mm.

La sovrapposizione finalizzata alla validazione della prova è mostrata in Figura 43.

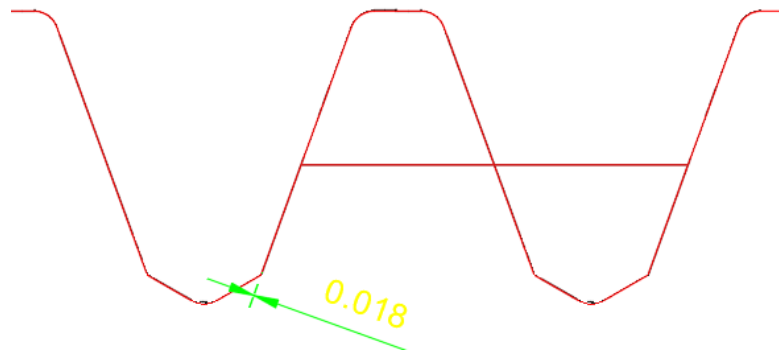


Figura 43: Validazione creatore modulo 10.

modulo 10				CLASSE	
	ΔS	Ffs_sx	Ffs-dx	spessore	profilo dx
ideale	0	0	0	AA	AA
D mola = 88.649 mm	0.0085	0.0004	0.022	AA	A
D mola = 68.649 mm	0.0061	0.0015	0.0204	AA	A
D mola = 108.649 mm	0.0085	0.0005	0.031	AA	B
camma = 14	0.0347	0.0006	0.1335	A	D
LU affilabile	0.0155	0.0004	0.0343	AA	B
D_Cr = 170 mm	0.0354	0.0008	0.0284	A	B
N° principi = 3	0.0082	0.0006	0.0278	AA	B

Tabella 10: Raccolta dati modulo 10

Utilizzando lo stesso metodo dei casi precedenti, è stata redatta una tabella che riporta le variazioni di profilo a fine vita per tutte le modifiche apportate ai parametri progettuali.

In Tabella 10 sono riportate le variazioni di profilo su spessore e forma dei due fianchi.

Si nota, come nei casi precedenti, una tendenza al peggioramento del profilo a fine vita al variare dei parametri progettuali, con entità crescente in accordo con l'aumentare del modulo. Infatti, possiamo osservare che già nella simulazione con $D_{mola} = 88.649$ mm, ovvero il progetto di riferimento aziendale, si ha un declassamento della tolleranza del creatore a fine vita rispetto all'inizio vita.

Gli andamenti in termini assoluti dell'errore di profilo dente a fine vita sono mostrati in Figura 44.

Nel grafico rappresentato in Figura 45, si riporta l'Ffs del fianco destro.

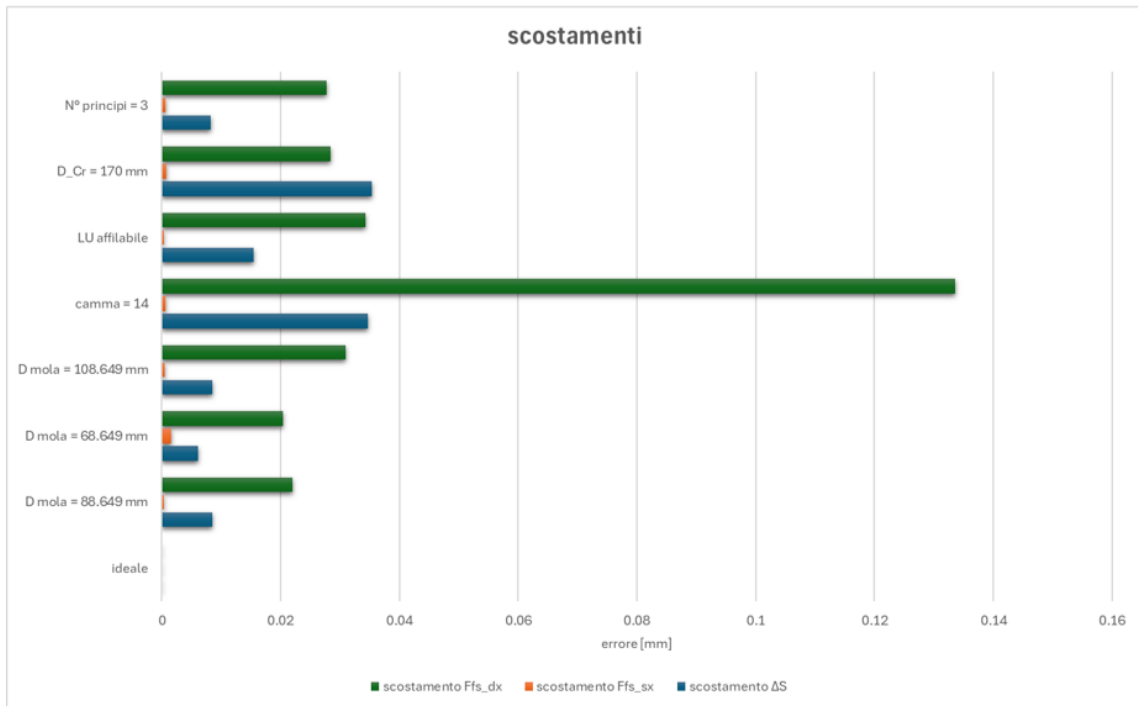


Figura 44: Scostamenti a fine vita creatore modulo 10.

Inoltre, osserviamo nuovamente che la variazione della forma del profilo misurata sul fianco destro comporta scostamenti dal profilo di inizio vita nettamente maggiori rispetto al lato sinistro. Questo fenomeno viene confermato anche nei controlli di qualità effettuati in produzione.

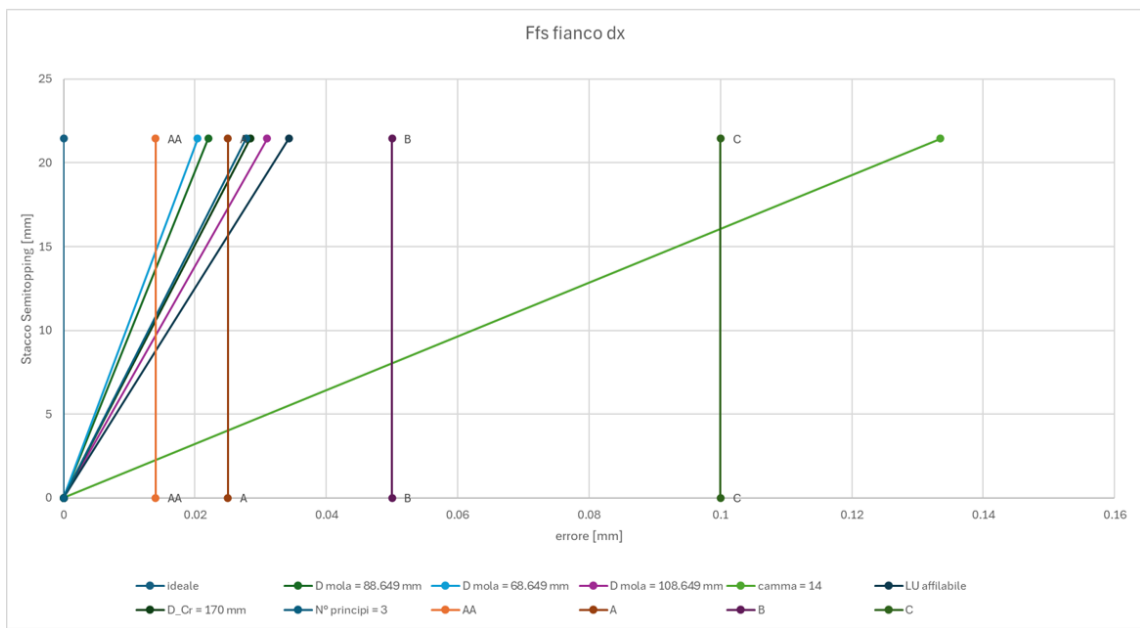


Figura 45: Errore sul tagliente di destra del creatore di modulo 10.

4.3 Simulazione 6

In questa simulazione viene preso in esame il processo di profilatura di un utensile creatore di modulo 10 con affilatura elicoidale. I dati caratteristici dell'utensile da realizzare sono riportati in Tabella 11.

DATI CREATORE	
Modulo normale	10
Angolo di pressione normale	20°
Numero di principi	2
Inclinazione filetti	8.85°
Verso di inclinazione dei filetti	Destro
Passo assiale	63.58891 mm
Numero di taglienti	12
Tipo di affilatura	spirale
Passo elica di affilatura	2623 mm
Entità di camma	7
Diametro esterno	155 mm
DATI MOLA	
Diametro esterno	89.320 mm

Tabella 11: Dati di riferimento modulo 10 affilatura elicoidale.

Il profilo della mola è illustrato nella Figura 46.

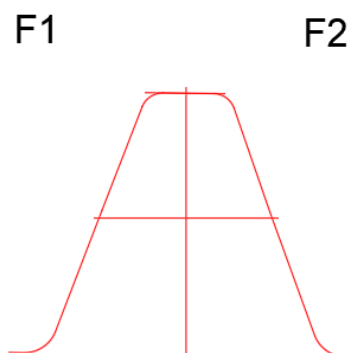


Figura 46: Profilo mola diametro 89.320 mm.

Ai fini della validazione, non è stato possibile identificare un unico piano di affilatura per il creatore derivante dalla simulazione, poiché si tratta di un utensile con affilatura a

spirale. Di conseguenza, non è stato possibile applicare il procedimento utilizzato finora. In particolare, il piano normale al petto del tagliente non è inclinato dell'angolo d'elica, ma ad ogni diametro corrisponde un'inclinazione del piano definita dall'Equazione 12.

Nella pratica, questo controllo viene effettuato al proiettore inclinando il creatore dell'angolo d'elica e ruotando gradualmente il pezzo per mettere a fuoco l'intero profilo del dente in modo da verificare la corretta sovrapposizione con il profilo di riferimento.

Per simulare le operazioni che avvengono in officina, si è pensato di partire dal profilo assiale, deducibile dai programmi aziendali, per costruire la filettatura semplice dell'utensile creatore. Successivamente, per simulare l'affilatura a spirale, si è eseguita un'estrusione per rimuovere il materiale in eccesso seguendo il passo della spirale, come illustrato nelle Figure 47. In questo modo è stato possibile ottenere il petto del tagliente normale al filetto della vite.

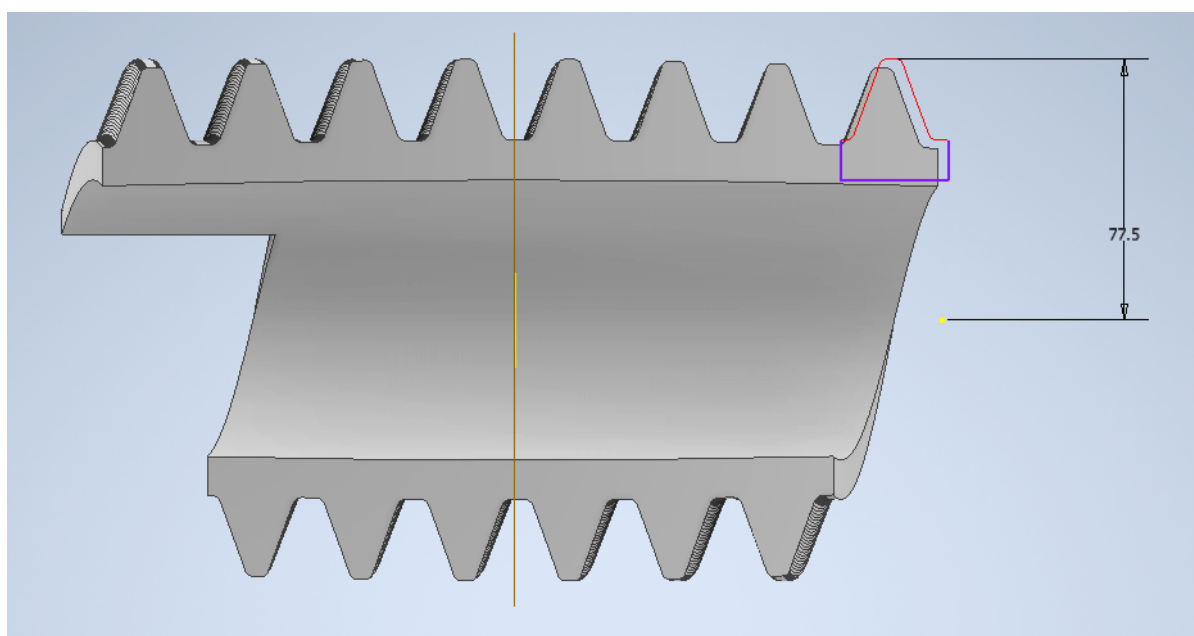


Figura 47: Costruzione del creatore di riferimento.

A differenza degli utensili ad affilatura dritta, le facce di taglio dei denti del creatore risultano dal taglio di canali elicoidali perpendicolari ai filetti, ossia inclinati dell'angolo della vite rispetto all'asse della stessa.

Il software di simulazione non contempla la rotazione del creatore in modo tale che l'interasse tra i due modelli sia sempre normale al petto del dente nel caso di utensili ad affilatura a spirale, come descritto dalle equazioni 29 e 30.

Per superare questa limitazione, si esegue la simulazione e l'analisi non sull'intero dente, ma solo sulla cava.

Facendo coincidere la linea di mezzeria del fondo cava da analizzare con il piano normale all'interasse dei due modelli, dovrebbe essere possibile aggirare la problematica sopra descritta.

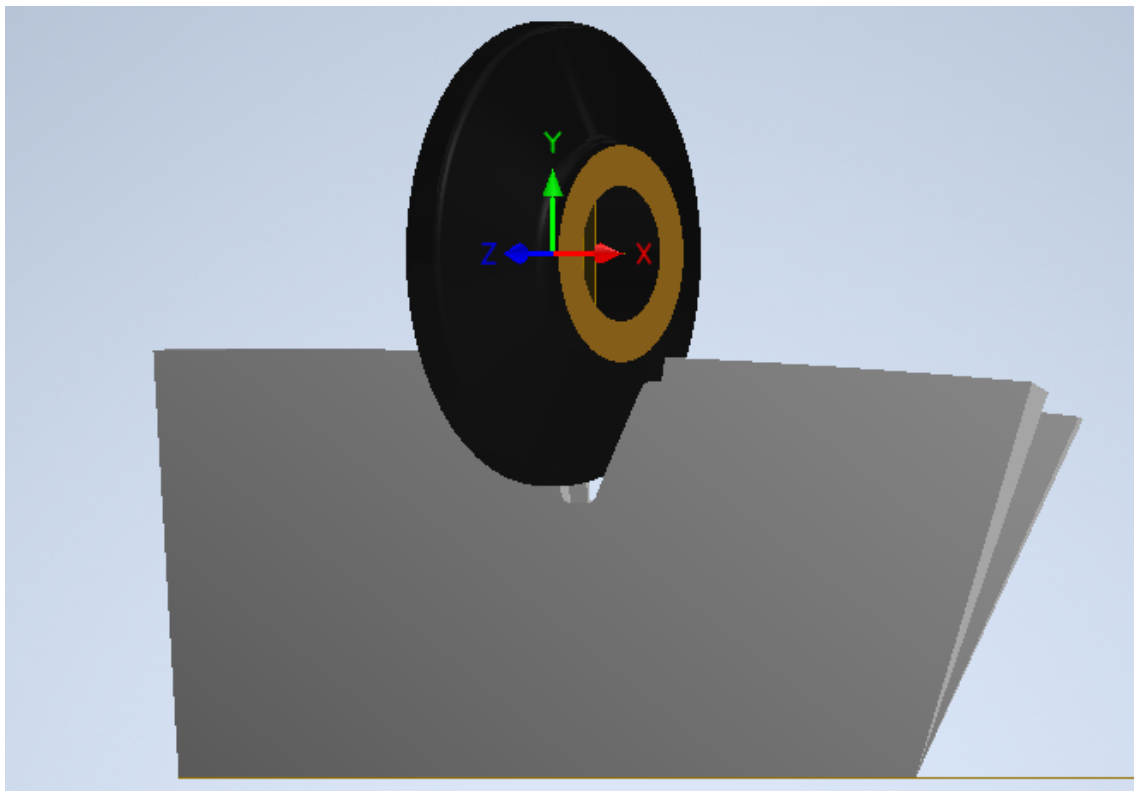


Figura 48: Simulazione profilatura cava.

Avviando la simulazione con i parametri progettuali appropriati, otteniamo l'impronta lasciata dalla mola, che definisce il fianco destro e il fianco sinistro del tagliente, come mostrato in Figura 48.

A questo punto, possiamo sovrapporre il creatore di riferimento, precedentemente modellato, con il profilo del creatore ottenuto dalla simulazione. Questa sovrapposizione avviene facendo coincidere il punto di incrocio dei due modelli, identificato dall'intersezione dell'asse di mezzeria della cava con la linea di fondo.

Dalla Figura 50 si nota visivamente che i due profili non sono perfettamente coincidenti. Questo impedisce la validazione della simulazione.

Sebbene ai fini dello studio della variazione di profilo tra inizio e fine vita si possa ammettere un errore costante, poiché il nostro zero di riferimento diventa il profilo iniziale, una discrepanza così marcata rende la simulazione non veritiera e di fatto impossibile proseguire con ulteriori simulazioni e analisi per questo tipo di creatore.

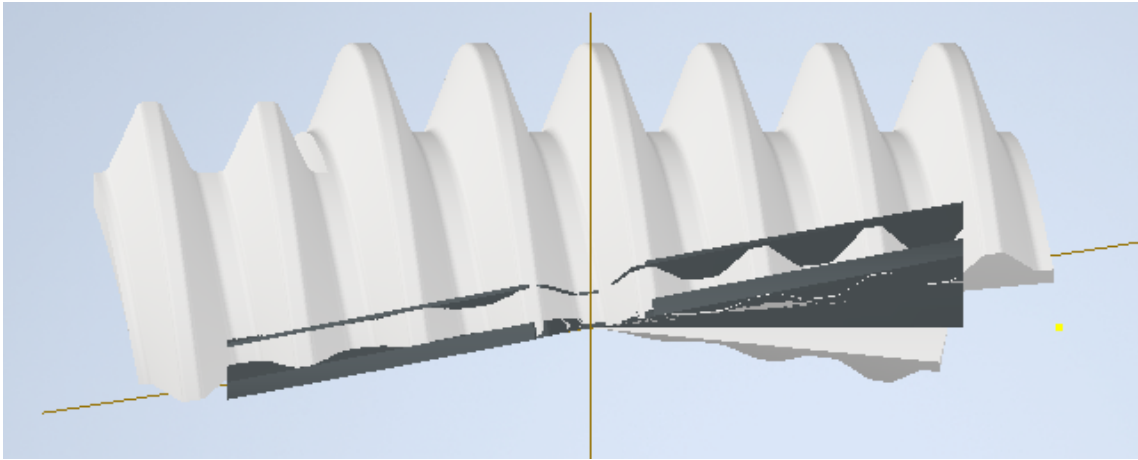


Figura 49: Sovrapposizione dei profili vista dall'alto.

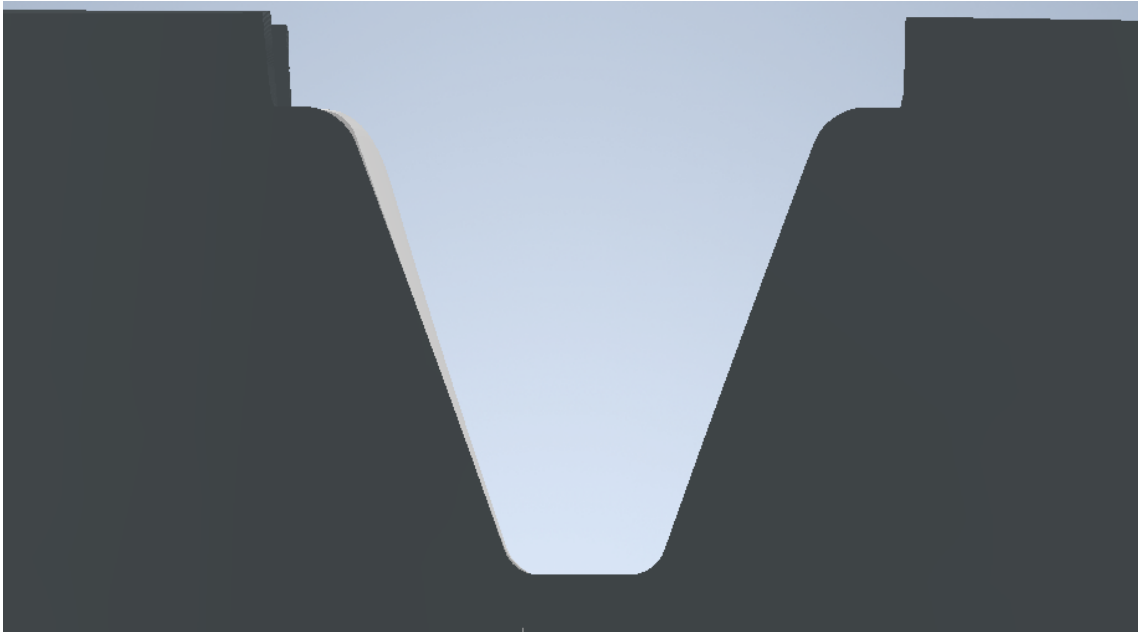


Figura 50: Sovrapposizione dei profili vista petto tagliente.

4.4 Osservazioni

Il metodo di simulazione cinematica utilizzato per la validazione del profilo di inizio vita dell'utensile è stato efficace, confermando risultati coerenti con studi precedenti come quello di N. Sabkhi et al. [5], che ha considerato valido il modello con errori di 0.2 mm.

Il software sviluppato è attualmente capace di gestire creatori con affilatura dritta, ma necessita di ulteriori ottimizzazioni per quelli con affilatura a spirale.

Le simulazioni hanno evidenziato che un diametro maggiore della mola produce risultati migliori per i moduli 3.05227, 5 e 8, sebbene nella pratica possano insorgere problemi di tallonamento e di sella. Per i moduli 2.5 e 10, invece, l'uso di una mola di diametro maggiore ha portato a differenze di profilo più marcate rispetto a una mola di diametro ridotto, suggerendo la necessità di ulteriori studi sulla linea di contatto tra mola e utensile.

L'analisi dell'entità di camma ha mostrato che aumentare questo parametro peggiora il profilo a fine vita, evidenziando l'importanza di bilanciare l'angolo di spoglia di testa.

Infine, si è osservato che variazioni nel diametro esterno del creatore e nel numero di principi influiscono significativamente sul profilo dell'utensile, con il fianco destro del tagliente maggiormente soggetto a variazioni di forma durante la vita utile.

Queste osservazioni sottolineano la necessità di ulteriori studi per ottimizzare la gestione dei parametri progettuali e garantire la costanza del profilo in tutte le condizioni operative.

5 Conclusioni

La presente tesi ha analizzato la variazione del profilo di utensili creatori a seguito di affilature durante la loro vita utile, tramite simulazioni cinematiche. A tal fine, è stato sviluppato un software capace di gestire i modelli 3D dell'utensile creatore e della mola abrasiva, simulando la cinematica del processo e ottenendo il profilo del dente dell'utensile creatore mediante sottrazione booleana di volumi.

Il software è stato validato per ciascuna simulazione eseguita, confrontando i profili risultanti con quelli generati da un programma di progettazione 2D. Gli errori rilevati sono stati compatibili con quelli descritti dalla letteratura, confermando la validità del software e allineandosi con studi precedenti, come quello di N. Sabkhi et al. [5], che ha considerato valido il modello cinematico con un margine di errore di 0.2 mm.

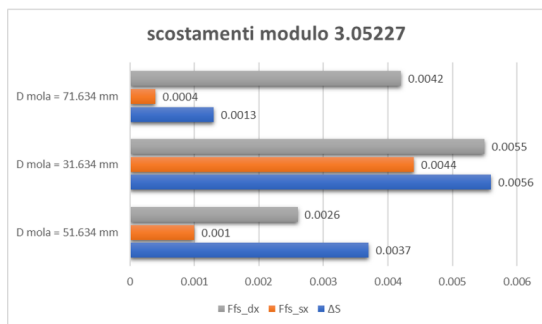
Le simulazioni hanno rivelato che il software è attualmente in grado di gestire creatori con affilatura dritta, mentre necessita di ulteriori ottimizzazioni per quelli con affilatura a spirale, in quanto quest'ultimi hanno dato un risultato negativo al momento della validazione. Nel confronto tra i profili di inizio vita e fine vita degli utensili, l'attenzione principale è stata rivolta alle variazioni dei parametri progettuali e alla loro influenza misurata sullo spessore del dente e sull'angolo di pressione normale, quindi sullo scostamento di forma del tagliente.

Per le simulazioni di utensili creatori con moduli 3.05, 5 e 8, le misurazioni effettuate a seguito della variazione del diametro della mola hanno indicato risultati migliori con un diametro maggiore della mola, rispetto ad una diminuzione del diametro da quello di riferimento. Come mostrato in Figura 51 si nota come i diametri mola maggiorati di 20 mm rispetto a quello di riferimento causano errori sul profilo inferiori. Tuttavia, nella pratica, l'uso di una mola di diametro maggiore potrebbe non essere fattibile a causa di fenomeni di tallonamento e di sella. Inoltre, non sarà sempre possibile mantenere la mola a un diametro ottimale, poiché si consuma durante l'utilizzo. Sebbene il profilo venga ricalcolato ogni volta che la mola lo richiede, possiamo affermare che ci sarà un possibile peggioramento del profilo del dente a causa di questa usura.

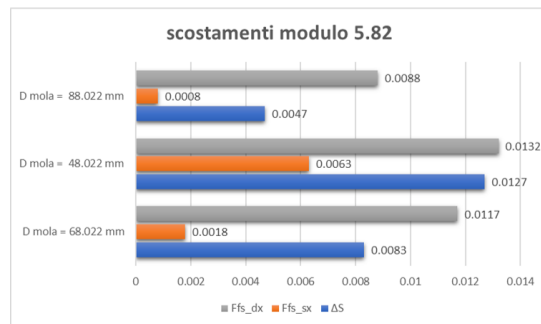
Le simulazioni con modulo 2.5 e 10 hanno mostrato un comportamento diverso: in questi casi, una mola di diametro maggiore ha prodotto una differenza più marcata tra il profilo iniziale e finale rispetto a una mola di diametro ridotto, come mostrato in Figura 52.

Questi risultati sono inaspettati poiché si credeva che mole di diametro più piccolo, avendo una linea di contatto inferiore, causassero meno differenze sul profilo. Probabilmente esiste una linea di contatto ottimale tra mola e dimensioni del dente, che necessita di ulteriori studi per essere compresa a fondo.

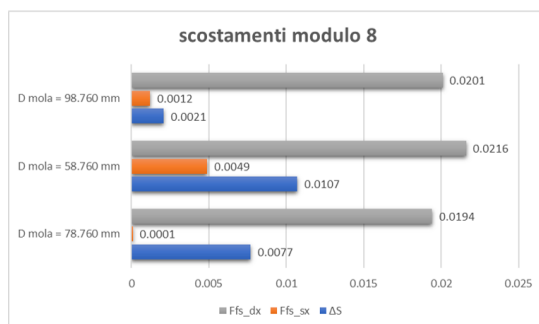
L'analisi dell'entità di camma ha mostrato che un aumento di questo parametro peggiora drasticamente il profilo a fine vita, evidenziando la necessità di bilanciare l'angolo di spoglia di testa; vedi Figura 53. Queste variazioni di profilo causano nella totalità delle simulazioni prese in esame una perdita di almeno due classi di tolleranza, ciò evidenzia



(a) Simulazione 2

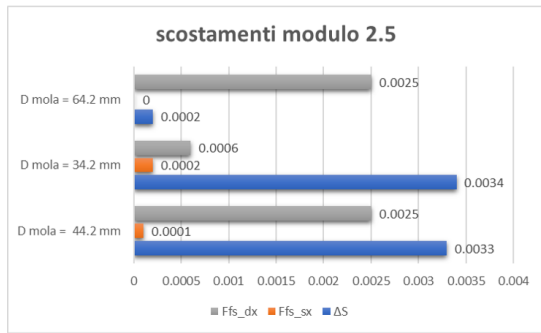


(b) Simulazione 3

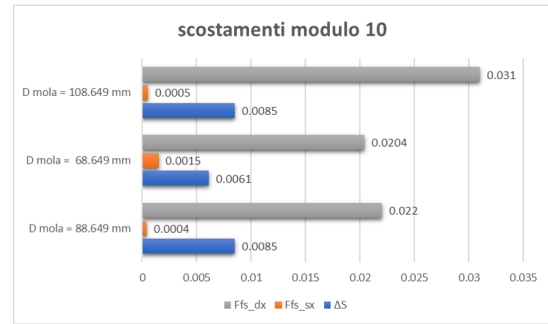


(c) Simulazione 4

Figura 51: Andamento degli scostamenti di forma e spessore a seguito della variazione del diametro della mola per i moduli: 3.05, 5 e 8.



(a) Simulazione 1



(b) Simulazione 5

Figura 52: Andamento degli scostamenti di forma e spessore a seguito della variazione del diametro della mola per i moduli 2.5 e 10.

quanto sia fondamentale questo parametro in fase di progettazione e più ci allontaniamo dalla condizione di spoglia di testa secondo la spirale logaritmica, più gli errori di forma diventano importanti.

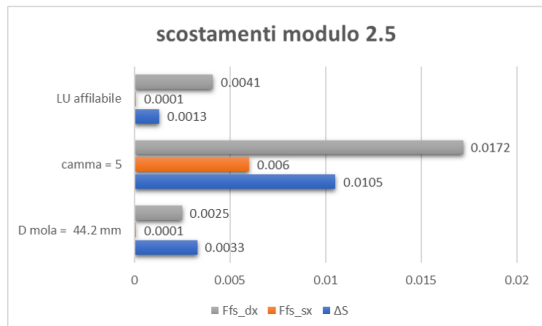
L'incremento della lunghezza utile affilabile ha confermato che un tratto più ampio della curva a spirale di Archimede comporta una maggiore differenza di profilo a fine vita. Questo avviene perché, allungando il tratto della spirale di Archimede, ci si allontana sempre di più dalla condizione ideale della spirale logaritmica. Pertanto, in fase di progettazione, è necessario bilanciare attentamente la lunghezza utile affilabile con gli scostamenti di forma del profilo che ne derivano.

Inoltre, la variazione del diametro esterno del creatore e del numero di principi influenza significativamente il profilo dell'utensile. Un angolo di elica più accentuato, ottenuto aumentando il numero di principi, ha un impatto maggiore sul profilo del tagliente, con il fianco destro maggiormente soggetto a variazioni di forma durante la vita utile, riscontrate anche nella pratica; vedi Figura 54.

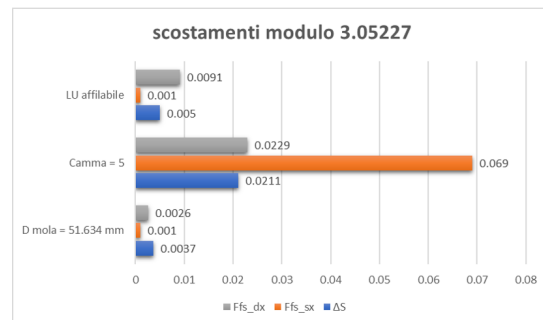
In conclusione, si può affermare che i software di progettazione aziendali mirano a ottenere risultati ottimali; tuttavia, con l'aumentare del modulo, le variazioni di profilo diventano sempre più marcate.

Grazie al programma realizzato e descritto in questa tesi, sarà possibile, durante la fase di progettazione, eseguire simulazioni del processo di profilatura del dente e analizzare gli scostamenti alle diverse affilature. Confrontando questi risultati con la normativa DIN 3968 [2], si può determinare se vi sia un cambiamento nella classe di tolleranza. Questo permette di prevedere quando, dopo un certo numero di affilature, sarà necessaria una riprofilatura per riportare il profilo alle condizioni iniziali.

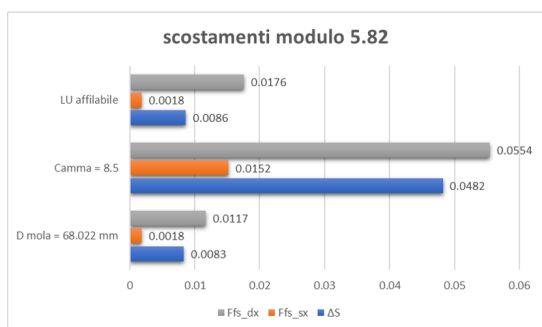
I risultati suggeriscono la necessità di ulteriori studi e ottimizzazioni per migliorare la gestione dei parametri progettuali e garantire la costanza del profilo in tutte le condizioni operative.



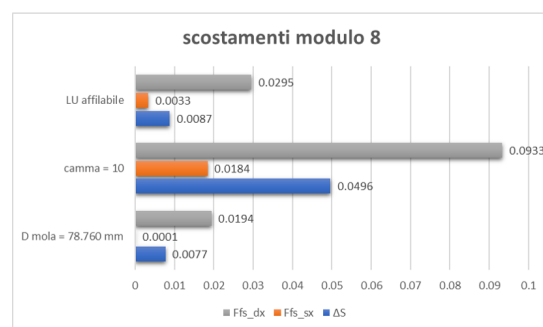
(a) Simulazione 1



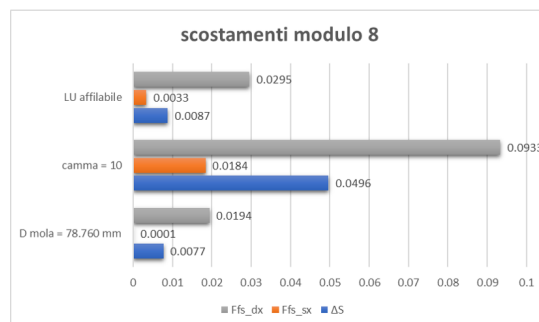
(b) Simulazione 2



(c) Simulazione 3

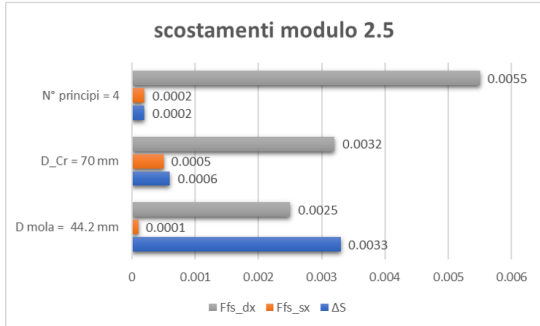


(d) Simulazione 4

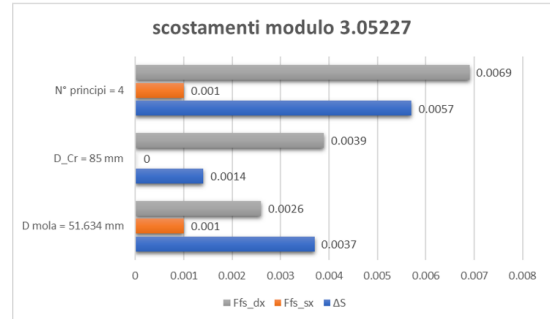


(e) Simulazione 5

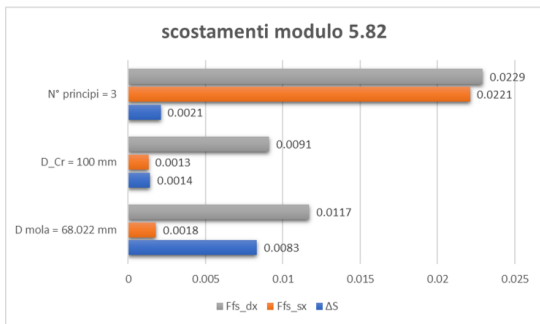
Figura 53: Andamento degli scostamenti di forma e spessore a seguito della variazione dell'entità di camma e della lunghezza utile affilabile.



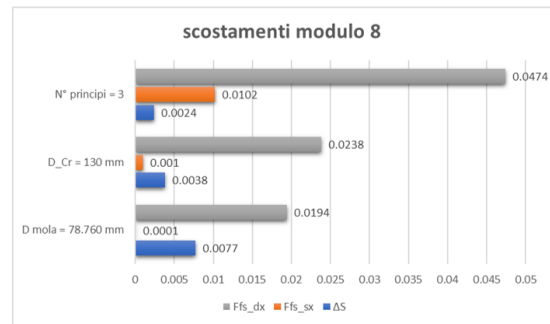
(a) Simulazione 1



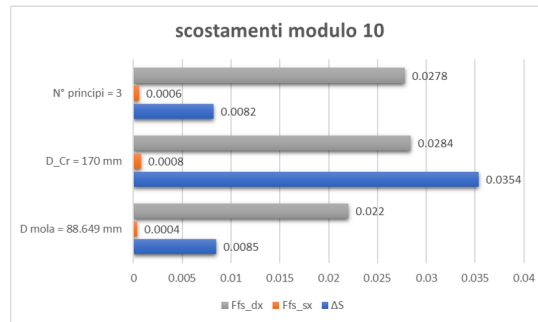
(b) Simulazione 2



(c) Simulazione 3



(d) Simulazione 4



(e) Simulazione 5

Figura 54: Andamento degli scostamenti di forma e spessore a seguito della variazione del numero di principi e del diametro esterno del creatore.

6 Sviluppi futuri

Si conclude lo studio suggerendo possibili sviluppi futuri:

- **Ottimizzazione per Affilatura a Spirale:** Continuare lo sviluppo del software per gestire efficacemente creatori con affilatura a spirale, migliorando l'accuratezza della simulazione per questa tipologia di utensili.
- **Valutazione Pratica delle Mole:** Approfondire la valutazione pratica dell'uso di mole di diametro maggiore e minore, considerando i fenomeni di tallonamento e di sella, per identificare soluzioni praticabili che migliorino la costanza del profilo.
- **Affinamento del Modello Cinematico:** Migliorare il modello cinematico del software, includendo ulteriori parametri progettuali e condizioni operative, per garantire una simulazione più realistica e accurata.
- **Analisi della linea di contatto:** Intraprendere uno studio approfondito sulla linea di contatto tra mola e utensile, per comprendere meglio le cause della variazione del profilo.

Questo lavoro rappresenta una base solida per la progettazione di utensili creatori con profili ottimizzati e offre indicazioni preziose per future ricerche nel campo della simulazione cinematica e della validazione dei profili degli utensili. I risultati ottenuti permettono di prevedere quando sarà necessaria una riprofilatura del dente a seguito di n affilature, contribuendo così a una gestione più efficiente del ciclo di vita degli utensili.

Elenco delle figure

1	Pullegge con cinghia incrociata; Ruote di frizione; Ingranaggio parallelo esterno [3].	6
2	Ruote di frizione; Ingranaggio parallelo interno [3].	6
3	Dentatura: (1)dritta; (2)elicoidale; (3)bielicoidale [3].	8
4	Costruzione geometrica dell'evolvente di cerchio [3].	9
5	(1) sistema cinghia-puleggia corrispondente all'ingranaggio parallelo esterno (2) accoppiamento profili coniugati [3].	10
6	Definizione linea d'azione e relazione tra cerchio di base e primitivo [3].	11
7	Definizioni relative alle ruote dentate con dentature esterne ed interne [3].	12
8	Rappresentazione evolvente di cerchio [3].	13
9	Sezione di un dente con profilo ad evolvente di cerchio [3].	14
10	Costruzione geometrica per punti di un'elica e sviluppo [3].	15
11	Generazione dei fianchi dei denti delle ruote a denti elicoidali [3].	16
12	Elementi normali e trasversali sul cilindro primitivo [3].	17
14	Nomenclatura utensile creatore.	20
15	Generazione del profilo per involuppo.	21
16	Spirale di Archimede e logaritmica.	22
17	Spirale di Archimede per la spoglia di testa.	23
18	Tornio a spogliare.	24
19	Errore di spessore dente.	25
20	Scostamento di forma.	26
21	Interfaccia applicazione per la simulazione cinematica.	28
22	Profilo mola derivante da percorso di profilatura.	31
23	Modello 3D di una mola.	32
24	Assieme virtuale.	34
25	Dettaglio: confronto tra i profili.	39
26	Profilo mola diametro 44.22 mm.	41
27	Validazione creatore modulo 2.5	42
28	Scostamenti a fine vita creatore modulo 2.5.	43
29	Scostamenti del fianco destro a fine vita creatore modulo 2.5.	44
30	Profilo mola diametro 51.634 mm.	45
31	Validazione creatore modulo 3.05227	46
32	Scostamenti a fine vita creatore modulo 3.05227.	47
33	Errore sul tagliente di destra del creatore di modulo 3.05227.	48
34	Profilo mola diametro 68.022 mm.	49
35	Validazione creatore modulo 5.82	50
36	Scostamenti a fine vita creatore modulo 5.82.	51
37	Errore sul tagliente di destra del creatore di modulo 5.82.	51
38	Profilo mola diametro 78.76 mm.	52

39	Validazione creatore modulo 8	53
40	Scostamenti a fine vita creatore modulo 8.	54
41	Errore sul tagliente di destra del creatore di modulo 8.	55
42	Profilo mola diametro 88.649 mm.	56
43	Validazione creatore modulo 10.	57
44	Scostamenti a fine vita creatore modulo 10.	58
45	Errore sul tagliente di destra del creatore di modulo 10.	59
46	Profilo mola diametro 89.320 mm.	60
47	Costruzione del creatore di riferimento.	61
48	Simulazione profilatura cava.	62
49	Sovrapposizione dei profili vista dall'alto.	63
50	Sovrapposizione dei profili vista petto tagliente.	63
51	Andamento degli scostamenti di forma e spessore a seguito della variazione del diametro della mola per i moduli: 3.05, 5 e 8.	67
52	Andamento degli scostamenti di forma e spessore a seguito della variazione del diametro della mola per i moduli 2.5 e 10.	68
53	Andamento degli scostamenti di forma e spessore a seguito della variazione dell'entità di camma e della lunghezza utile affilabile.	69
54	Andamento degli scostamenti di forma e spessore a seguito della variazione del numero di principi e del diametro esterno del creatore.	70

Elenco delle tabelle

1	Dati di riferimento modulo 2.5	41
2	Raccolta dati modulo 2.5	42
3	Dati di riferimento modulo 3.05227	45
4	Raccolta dati modulo 3.05227	46
5	Dati di riferimento modulo 5.82	49
6	Raccolta dati modulo 5.82	50
7	Dati di riferimento modulo 8	52
8	Raccolta dati modulo 8	53
9	Dati di riferimento modulo 10	56
10	Raccolta dati modulo 10	57
11	Dati di riferimento modulo 10 affilatura elicoidale.	60

Riferimenti bibliografici

- [1] *UNI 6016: [Ingranaggi cilindrici a denti dritti - Terminologia]*. Rapp. tecn. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 1980.

- [2] *DIN 3968: [Ingranaggi cilindrici - Norme per la rappresentazione, la costruzione e il calcolo]*. Rapp. tecn. Deutsches Institut für Normung (DIN), 1988.
- [3] Georges Henriot. *Manuale pratico degli ingranaggi: Tecniche nuove*. Tecniche nuove, 1993.
- [4] Franco Rabezzana. *Manuale degli utensili*. Tecniche Nuove, 2001.
- [5] Naoual Sabkhi et al. «Prediction of the hobbing cutting forces from a thermomechanical modeling of orthogonal cutting operation». In: *Journal of Manufacturing Processes* 23 (2016), pp. 1–12.