



# UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

## FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

### SVILUPPO DI UN METODO PER IL CONTROLLO QUALITÀ DI RUOTE DENTATE A PROFILO CICLOIDALE

Relatore: Ing. Marco Mandolini

Tesi di Laurea di: Gabriele Colasurdo

Anno Accademico 2019/2020

# Sommario

1	Introduzione .....	4
1.1	Contesto di Lavoro .....	4
1.2	Obiettivi.....	4
1.3	Attività Svolte .....	4
1.4	Risultati raggiunti .....	4
1.5	Problematiche e attività future.....	4
2	Riduttori cicloidali.....	6
2.1	Metodo di realizzazione delle camme .....	7
2.1.1	Il profilo epicicloidale.....	7
2.1.2	Lavorazione .....	11
2.1.3	Normative .....	13
2.2	Scansione delle camme.....	16
3	Metodo per il controllo qualità di camme con profilo cicloidale .....	19
3.1	Preparazione iniziale e prima importazione in Excel .....	20
3.1.1	Centraggio dei profili .....	20
3.1.2	Orientamento circonferenziale.....	22
3.2	Rilevazione delle misure.....	24
3.2.1	Campionamento .....	25
4	Calcolo dei parametri in Excel .....	27
4.1	Parametri di Profile Deviation.....	29
4.2	Inclinazione dell'asse del vano .....	32
4.3	Asimmetria del Vano.....	33
4.4	Runout.....	34
4.5	Analisi multilivello ed errore sull'angolo di elica .....	35
4.6	Riepilogo dati.....	38
5	Casi studio e risultati .....	41
5.1	Presentazione dei casi studio.....	41

5.2	Grafici riepilogativi .....	43
5.3	Discussione dei risultati.....	47
5.4	Analisi di una camma proveniente da lotto di produzione.....	48
5.5	Analisi del profilo di una mola.....	50
6	Conclusioni.....	53
7	Bibliografica .....	54

# 1 Introduzione

Gli aspetti principali del progetto saranno presentati in questo capitolo. Il contesto di lavoro e gli obiettivi del progetto saranno esposti nei seguenti sub-capitoli, dando una chiara immagine del prodotto e del problema posto.

## 1.1 Contesto di Lavoro

Il progetto è stato svolto in cooperazione con la Omme Gears di Falconara Marittima (AN). La compagnia è specializzata nella realizzazione di trasmissioni cicloidali e nella produzione di ingranaggi di medie e grandi dimensioni. La trasmissione di tipo cicloidale trova largo impiego come riduttore in vari settori industriali (chimica, petrolchimica, alimentare, robotica), sebbene questo non sia il suo unico campo di applicabilità.

## 1.2 Obiettivi

Il traguardo che si vuole raggiungere è l'ottenimento di un metodo che assegni una classe di qualità alle camme (componente del riduttore epicicloidale) realizzate e scansionate. Si vuole che questo strumento di analisi sia completamente automatizzato, in modo da effettuare questo controllo di qualità in tempi brevi e permettere ad un operatore di effettuare correzioni in maniera rapida e mirata sul processo produttivo.

## 1.3 Attività Svolte

Nella fase iniziale, per comprendere al meglio come la componente presa in esame viene realizzata, sono state studiati vari articoli scientifici (Zhang & Zhu, 2016), in modo da comprendere a pieno tutte le varie problematiche che circondano la progettazione e realizzazione di camme a profilo cicloidale. Siccome per le ruote dentate a profilo cicloidale non esiste una normativa in vigore, sono state prese come riferimento le normative in vigore per le ruote dentate a profilo evolvente e dei parametri elencati, sono stati discussi quelli che potenzialmente potevano essere applicati nel nostro caso. Dopo aver steso le fondamenta teoriche sono state, in diversi step, realizzate diverse iterazioni, scartando ad ogni passaggio quelle operazioni ritenute erranee e mantenendo o migliorando le restanti.

## 1.4 Risultati raggiunti

Il risultato raggiunto è un compromesso non del tutto automatizzato costituito da un blocco di operazioni iniziali da effettuare manualmente in Rhinoceros (blocco di operazione che può tuttavia essere automatizzato tramite l'utilizzo di altri software), con una parte rimanente di operazioni effettuate in Excel in maniera autonoma. Sebbene lo strumento ottenuto non sia del tutto automatico, costituisce un buon risultato se consideriamo la semplicità dei programmi utilizzati per ottenerlo.

## 1.5 Problematiche e attività future

Come menzionato nel paragrafo precedente, l'aspetto principale da migliorare è costituito dal blocco di operazioni che al momento devono essere realizzate manualmente. Una eventuale attività futura potrebbe consistere nella realizzazione di un programma (in C+, C++, Python o Javascript) che automatizzi

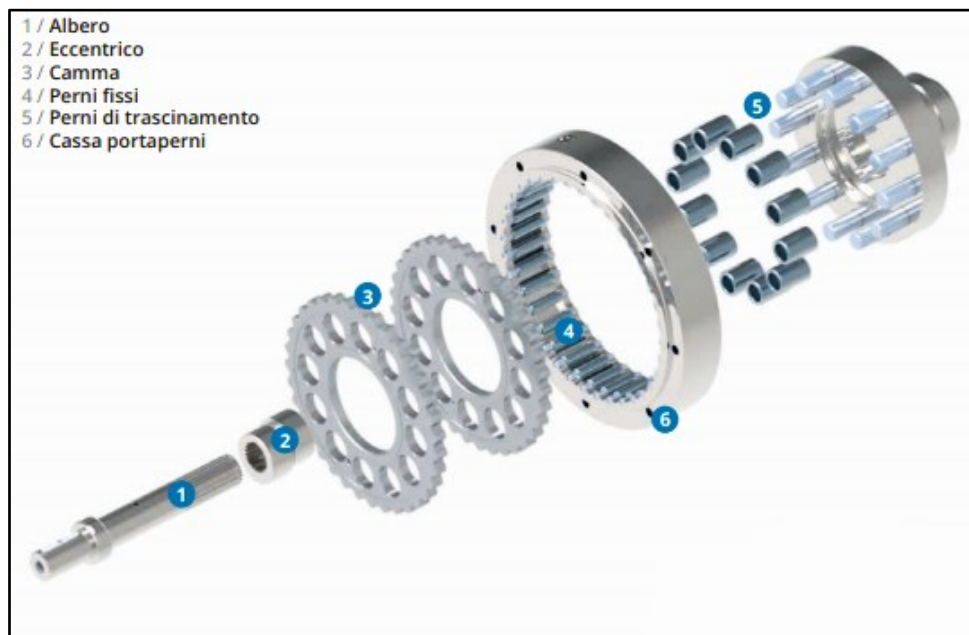
completamente tutte quelle operazioni che momentaneamente sono manuali, in modo tale che un operatore possa visualizzare i vari parametri e la classe di qualità della camma pochi secondi dopo la fine della scansione della camma. Un programma di questo tipo richiede tuttavia una ampia conoscenza degli strumenti richiesti per la sua realizzazione ed è quindi necessaria una figura professionale che possa dedicarsi interamente alla costruzione di tale software. Si tratterebbe comunque di un investimento che porterebbe a ritorni sotto forma di taglio di costi, riduzione dei tempi e scarti di produzione, un aumento di qualità del prodotto e un aumento della soddisfazione del cliente.

## 2 Riduttori cicloidali

Un riduttore cicloidale a singolo stadio è composto da sette componenti principali (Figura 1)

1. Albero di ingresso
2. Eccentrico
3. Camma/e
4. Perni fissi
5. Perni di trascinamento
6. Cassa porta-perni fissi
7. Albero di uscita

Il moto di ingresso è dato dall'elemento eccentrico tramite l'albero di ingresso. La rotazione dell'elemento eccentrico fa sì che le camme si muovano all'interno della cassa porta-perni. Il profilo cicloidale delle camme ruota senza strisciare sui perni fissi alloggiati nella cassa. Mentre l'eccentrico ruota in un verso con una determinata velocità angolare di ingresso, le camme ruotano lentamente nel verso opposto. La rotazione delle camme trasmette il moto all'albero di uscita per mezzo dei perni di trascinamento, i quali fanno presa nei fori presenti nelle camme. In questo modo si garantisce la trasmissione di coppia e si ottiene il rapporto di riduzione.



(Figura 1) Esploso di un riduttore cicloidale a singolo stadio.

*Le due camme vengono montate sfasate di 180°, così da annullare tra di loro eventuali effetti e vibrazioni generati.*

Il rapporto di riduzione dipenderà dalla dimensione delle camme e della relativa cassa. Tipicamente per un riduttore cicloidale a singolo stadio si possono raggiungere rapporti di riduzione di 122:1 con rendimenti che si attestano sul 93%, mentre per i riduttori a doppio stadio i rapporti possono salire fino a 7569:1 con rendimenti dell'86% circa.

Oltre all'altissimo rapporto di riduzione raggiungibile, i riduttori cicloidali hanno molti altri benefici:

- Giochi nulli o molto bassi, che rimangono costanti durante il ciclo di vita.
- Usura molto bassa grazie al moto di rotolamento anziché di strisciamento tra le componenti.
- Resistenza a carichi elevati.
- Ingombri molto ridotti.
- Basse vibrazioni e rumore ridotto.

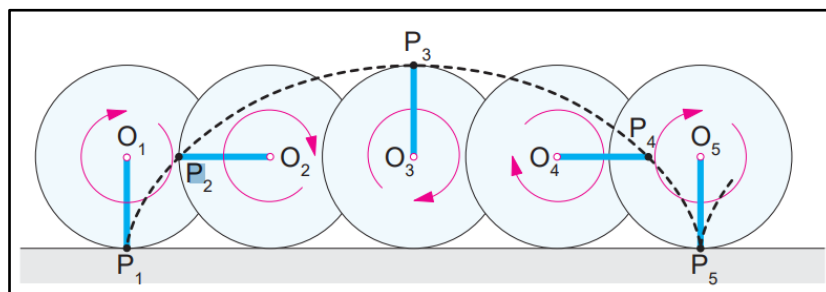
Con il fine di migliorare ulteriormente la qualità dei propri riduttori e soddisfare le altissime esigenze e specifiche richieste da settori come quello della robotica, è nata la necessità di creare un sistema per analizzare in maniera rapida ed efficace le camme, componente critico che influenza in maniera diretta la durata del ciclo di vita, la rumorosità e la precisione durante l'utilizzo. Uno strumento di analisi e controllo della qualità delle camme permetterebbe in tempi moderatamente brevi di essere al corrente di eventuali difetti presenti su un primo pezzo di un lotto, fare accorgimenti per migliorare i pezzi successivi e ridurre così la percentuale di scarti di lavorazione e costo generale di produzione, aumentando allo stesso tempo il livello di soddisfazione del cliente.

## 2.1 Metodo di realizzazione delle camme

Per poter comprendere meglio i possibili errori che possono verificarsi durante la realizzazione di una camma è necessario avere ben chiaro come il profilo viene progettato (a livello teorico e pratico) e il metodo di lavorazione.

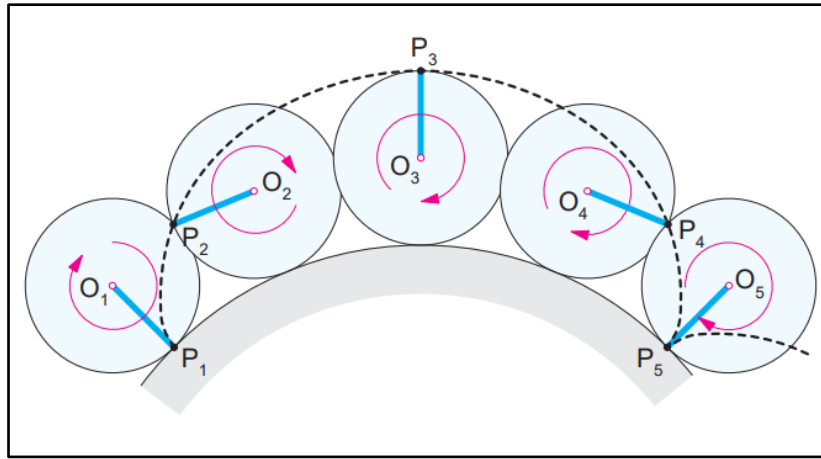
### 2.1.1 Il profilo epicicloidale

Si definisce cicloide una curva piana descritta da un punto disposto sulla circonferenza di un cerchio, detto generatore, che rotola senza strisciare lungo una retta, detta deferente (Figura 2).



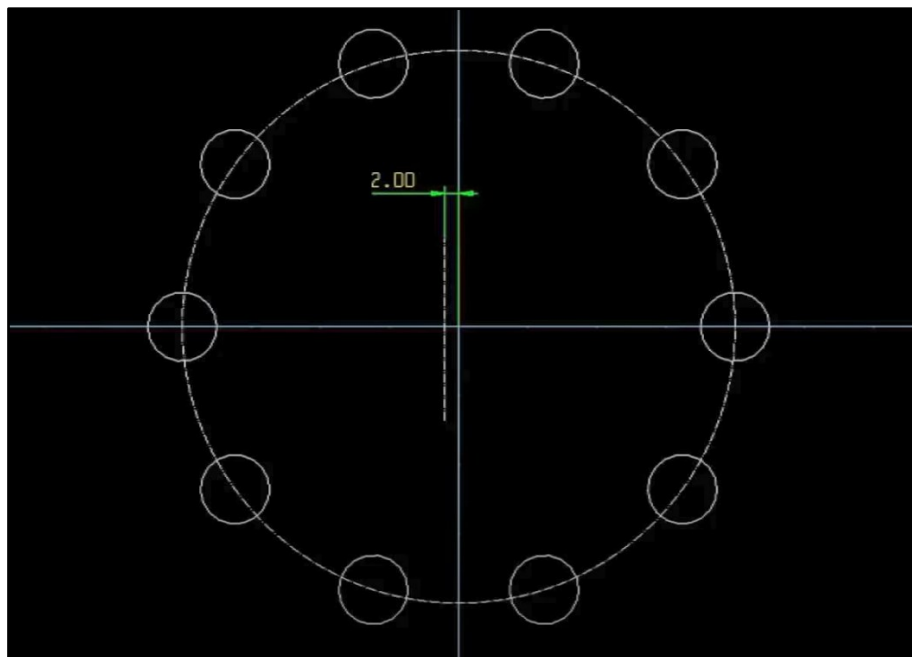
(Figura 2) Costruzione grafica della cicloide.

L'epicicloide (Figura 3), a differenza della cicloide menzionata in precedenza, è una curva piana descritta da un punto disposto sulla circonferenza di un cerchio, detto generatore, che rotola senza strisciare esternamente a un cerchio, detto deferente.



(Figura 3) Costruzione grafica della epicloide.

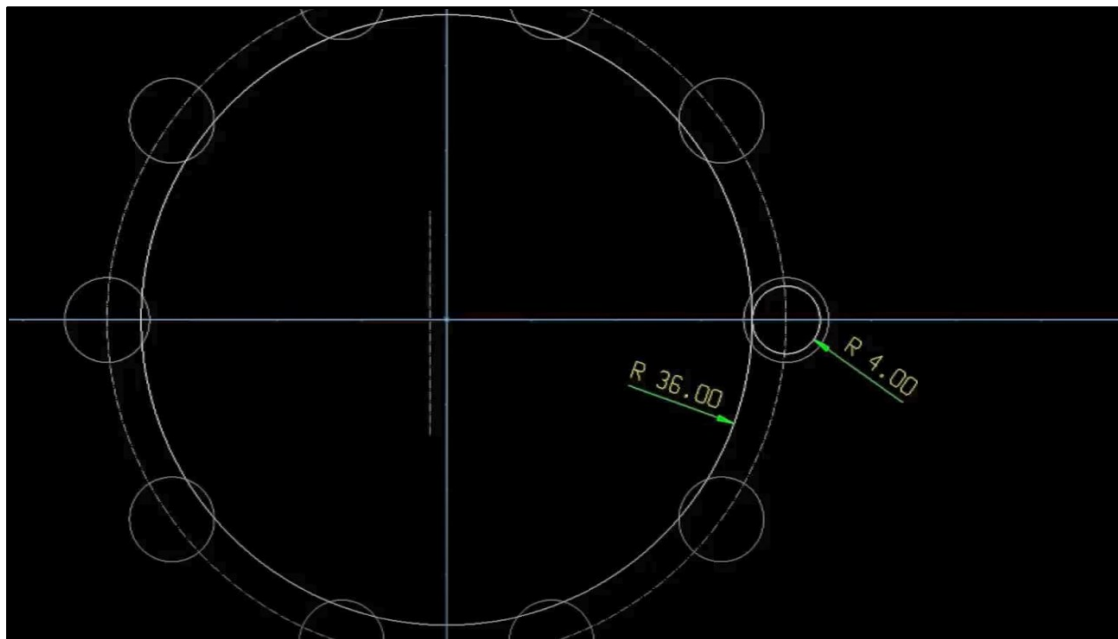
Nel caso pratico, il profilo di lavoro del dente viene realizzato tramite sistemi CAD. Si parte da una circonferenza di base (nell'esempio mostrato nelle figure,  $R_1 = 40\text{mm}$ ), dopodiché si dispongono su di essa i perni della cassa (nove in totale,  $R_2 = 5\text{mm}$ ) e infine si assegna il valore dell'eccentricità (Figura 4).



(Figura 4) Circonferenza di base e perni fissi. Il valore dell'eccentricità assegnato nell'esempio è di 2mm.

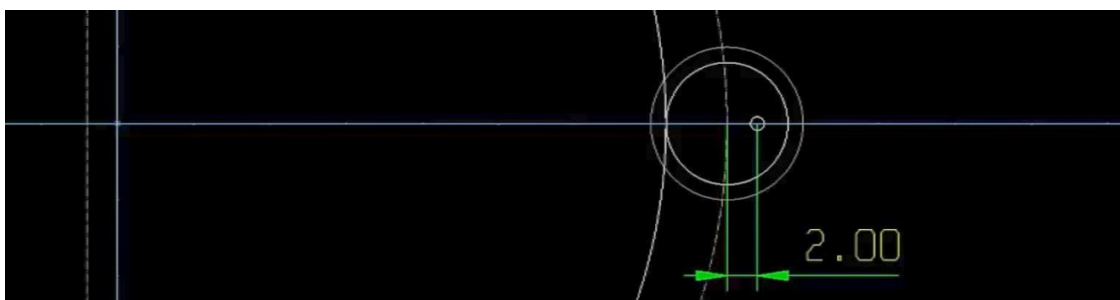
Si va ora a inserire (Figura 5) il cerchio generatore (che avrà raggio  $r_1 = R/10 = 4\text{mm}$ ) e il cerchio deferente (che avrà invece raggio  $r_2 = 9 \cdot r_1 = 36\text{mm}$ ).





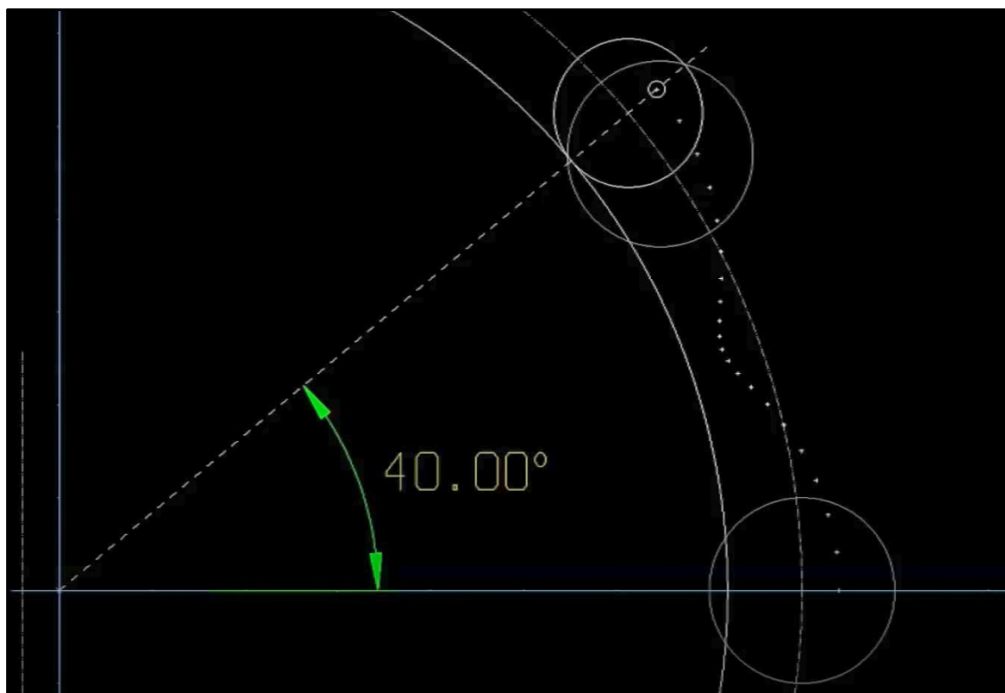
(Figura 5) Cerchio generatore e deferente.

Consideriamo ora un punto distante dal centro del cerchio generatore 2mm, quanto il valore dell'eccentricità inizialmente assegnato (Figura 6).



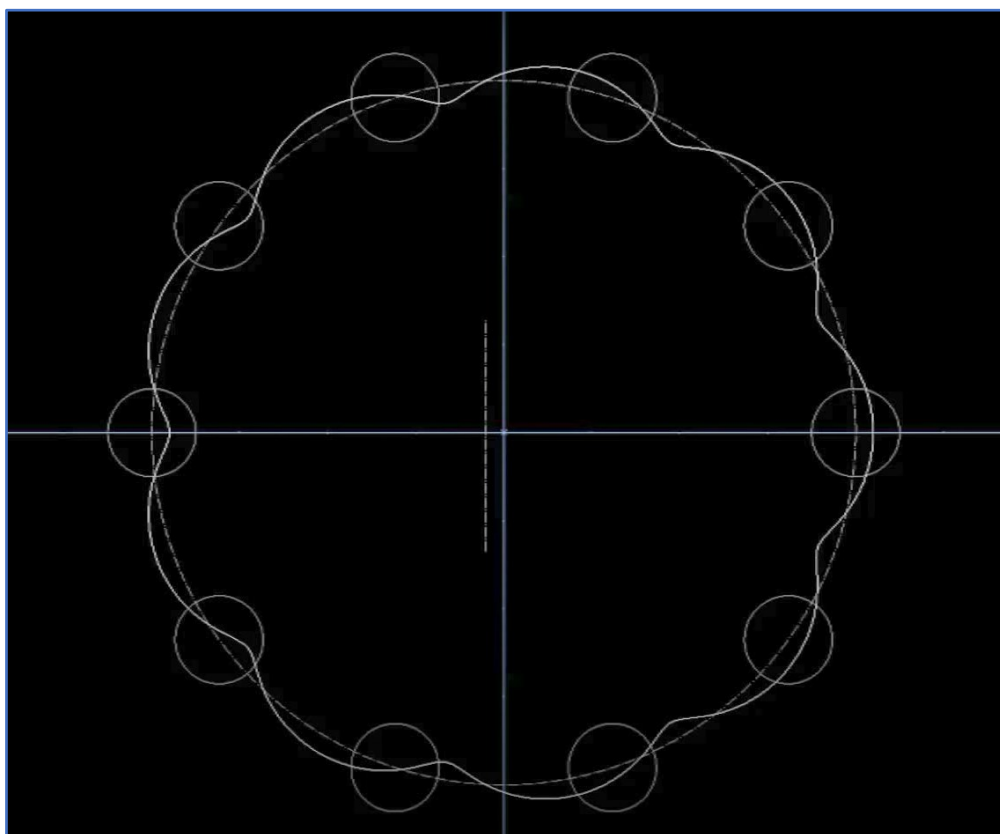
(Figura 6) Evidenziato il punto che, con la rotazione del cerchio generatore sul cerchio deferente, disegnerà la epicicloide.

Si fa ruotare ora il cerchio generatore di un giro completo (Figura 7). L'angolo che il punto considerato per la generazione del profilo formerà rispetto all'asse orizzontale sarà pari a  $360^\circ/9$  (con 9 numero di perni fissi).



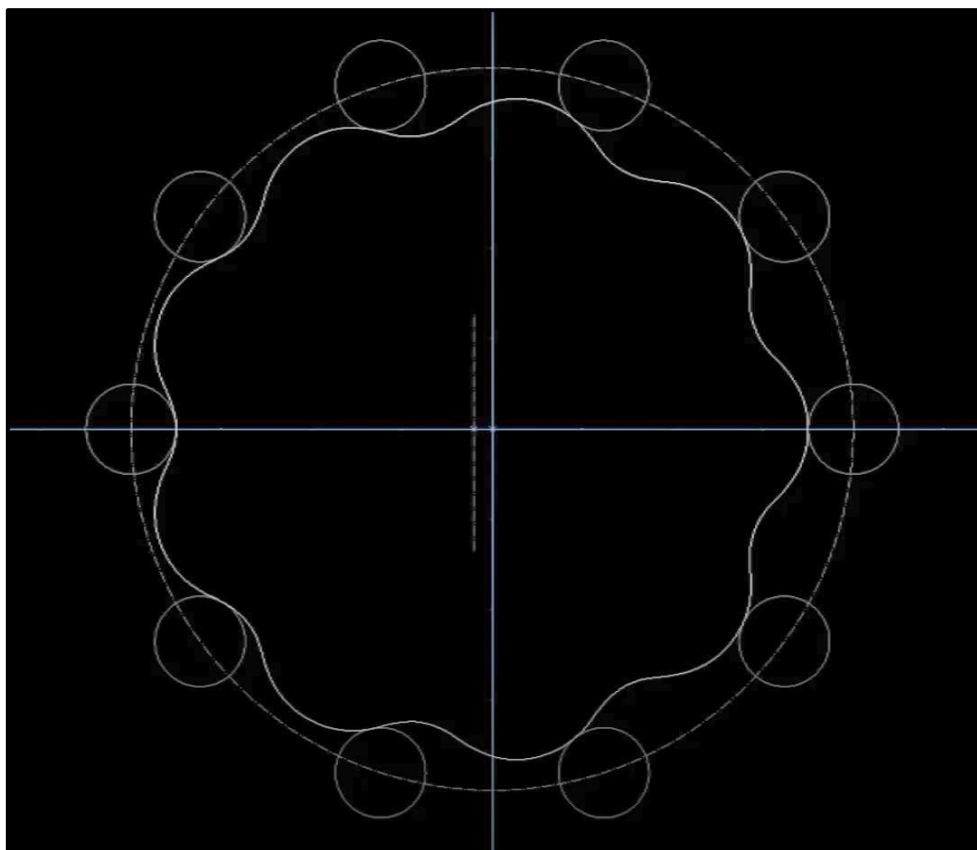
(Figura 7) Profilo di lavoro generato con la rotazione del cerchio generatore sul cerchio deferente.

Ripetendo l'operazione altre otto volte si ottiene una nuvola di punti lungo l'intera circonferenza di base. Effettuando una interpolazione, si ottiene il profilo di lavoro della camma (Figura 8).



(Figura 8) Profilo epicicloidale della camma.

Per completare l'operazione, si genera una curva parallela a quella costruita con un offset pari a  $R_2/2 = 2.5\text{mm}$  e infine la si trasla di un valore pari a quello dell'eccentricità in modo da avere un profilo che tocca ciascun perno fisso in un unico punto. (Figura 9).



*(Figura 9) In seguito all'offset il profilo ora risulta più piccolo e traslato di 2mm in accordo con il valore di eccentricità.*

*Notiamo come ora il profilo tocca unicamente un solo punto di ciascun perno, con condizione di tangenza.*

### 2.1.2 Lavorazione

Il profilo delle camme viene realizzato su dei dischi in acciaio sui quali sono già stati effettuati tutti i trattamenti termici necessari (Figura 10). Le camme che andranno ad essere montate nello stesso riduttore vengono unite tramite l'impiego di bullonature in modo da lavorare i profili contemporaneamente (Figura 11), per poi essere separate a processo ultimato.



*(Figura 10) Camme nella fase precedente alla lavorazione.*

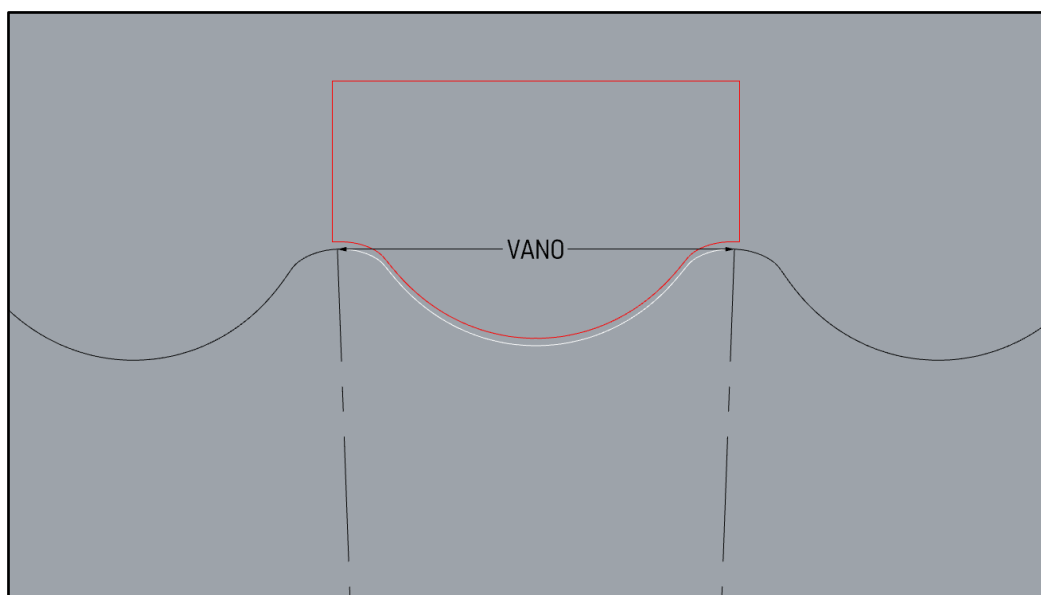


*(Figura 11) Dettaglio della mola diamantata.*

*La mola ha una forma tale da dare alla camma il profilo richiesto.*

Dalla immagine precedente (Figura 11), si può vedere in maniera molto chiara come il pezzo viene disposto in macchina e si può facilmente dedurre l'interazione che il pezzo ha con l'utensile. La mola, ruotando,

asporta materiale avanzando in direzione parallela a quella dell'asse della camma. Una volta scavato un vano, la camma ruota attorno al suo asse permettendo alla mola di realizzare il vano successivo. La mola ricopre un settore appena superiore a quello del vano stesso come raffigurato (Figura 12), garantendo continuità di forma nella zona di transizione da un vano a quello successivo.



(Figura 12) In rosso il profilo della mola. Questo ricopre un settore superiore a quello del vano per evitare che possano generarsi discontinuità geometriche tra un vano all'altro, essendo questi lavorati singolarmente.

Avendo visto come una camma viene realizzata ci è più chiaro capire come determinati errori di lavorazione possano nascere.

- Posizionamento camma in macchina: se si è fuori tolleranza di planarità e la camma da lavorare non è ortogonale con l'asse della macchina questo può risultare in un vano non perfettamente dritto lungo l'asse della camma.
- Posizionamento della mola. Se la mola è spostata o inclinata, si possono generare imperfezioni sul profilo generale che inevitabilmente porteranno allo scarto del pezzo o a un riduttore il cui ciclo di vita e performance generali saranno negativamente influenzati.

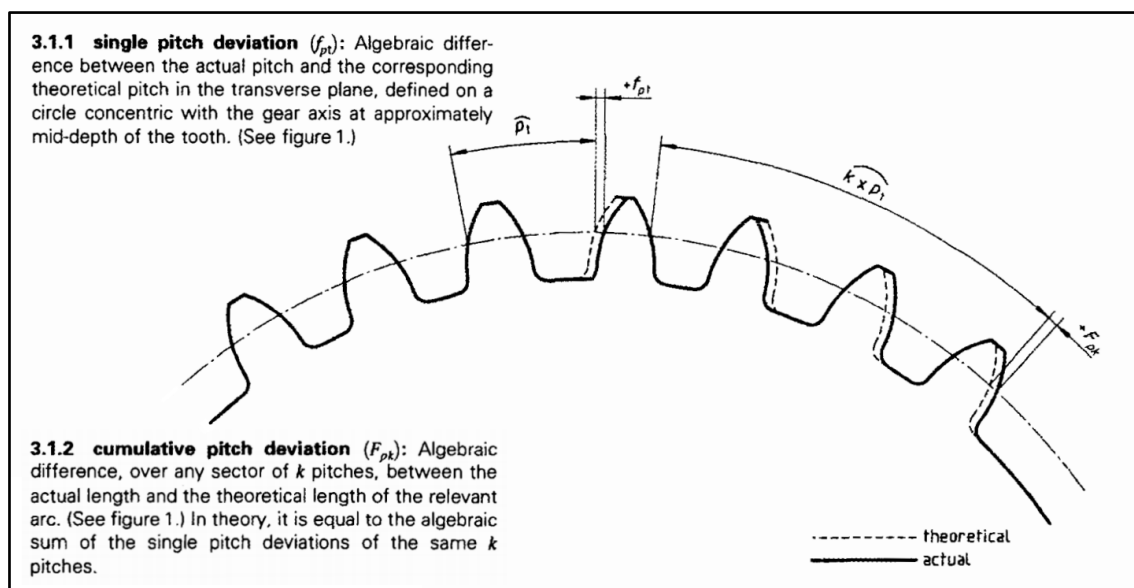
Non esistendo una normativa per le ruote dentate a profilo cicloidale è stata usata come riferimento la ISO 1328-1:1995 (normativa per i denti con profili a evolvente) per definire alcuni dei parametri.

### 2.1.3 Normative

Come menzionato nel paragrafo precedente, per definire alcuni parametri per le ruote dentate a profilo cicloidale, è stata usata come riferimento la normativa per ruote dentate con profilo a evolvente. Nella normativa ISO 1328-1:1995 sono descritti parametri che possono essere applicati, con le giuste ipotesi e

condizioni, anche ad un profilo cicloidale. La prima categoria di parametri descritta è quella che riguarda le deviazioni del passo (Figura 13).

- Single Pitch Deviation,  $f_{pt}$  : differenza algebrica, sul piano trasversale tra il passo reale del pezzo (ottenuto dopo la lavorazione) e il passo teorico. Il passo è definito su una circonferenza concentrica all'asse della ruota dentata e che passa a metà altezza del dente.
- Cumulative Pitch Deviation,  $F_{pk}$  : dato un settore con  $k$  passi, è la differenza algebrica tra la lunghezza effettiva e la lunghezza teorica di tale arco considerato. Può essere anche definito come la somma dei singoli  $f_{pt}$  per il numero di passi  $k$  considerati.
- Total Cumulative Pitch Deviation,  $F_p$  : deviazione di passo totale per tutti i denti della ruota.



(Figura 13) Estratto riguardante le deviazioni di passo della normativa ISO 1328-1:1995

La seconda categoria di parametri descritta nelle normative è quella che riguarda le deviazioni di profilo (Figura 6). È tuttavia necessario prima descrivere le variabili utilizzate, elencando le ipotesi necessarie per applicare questa seconda tipologia di parametri al caso dei profili cicloidali.

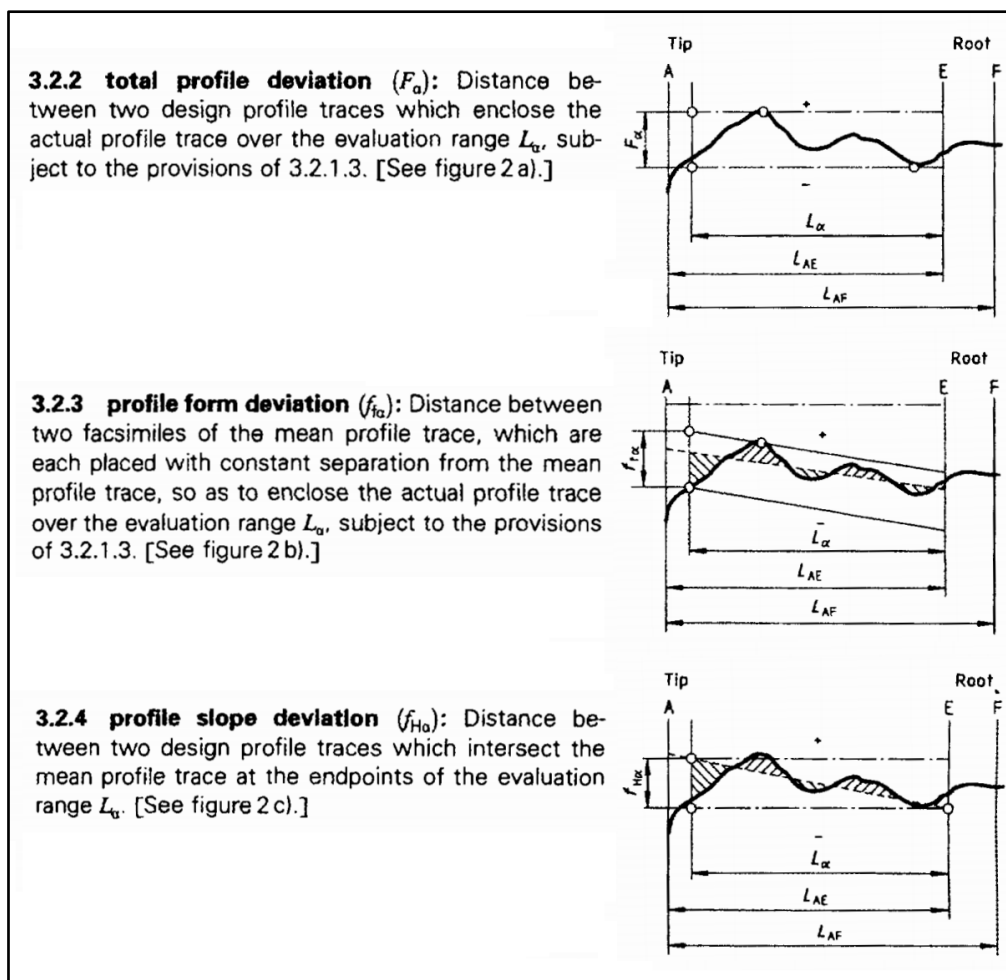
- Usable Length,  $L_{AF}$  : lunghezza totale del profilo del dente che si può utilizzare. Nel caso del profilo cicloidale è la lunghezza da un semivano all'altro.
- Active Length  $L_{AE}$  : porzione effettivamente utilizzata del profilo durante l'ingranamento, di fatto quindi è la lunghezza che va dal punto di inizio contatto al punto di fine contatto. Siccome la camma con profilo cicloidale rotola senza strisciare, ogni punto del suo profilo va ad ingranarsi con i perni fissi della cassa. Consideriamo quindi come ipotesi del caso che l'*Active Length* sia uguale all'*Usable Length*.

- I parametri di deviazione di profilo sono:

- 
- Technical drawing of a stepped shaft. The left part shows a side view with a feature control frame indicating a circular runout of  $\phi 0,03 A$  on the left step. The right part shows a similar side view with a circular runout measurement tool (a dial indicator) positioned on the same step. A circular runout symbol (a double-headed arrow) is shown on the right. Below the side view, a circular cross-section of the step is shown with a dashed circle representing the tolerance zone. The text "0,03 mm o meno" is written next to the cross-section, indicating the tolerance value.

(Figura 14) Esempio pratico sull'utilizzo della tolleranza di Runout Circolare.





(Figura 15) Estratto riguardante le deviazioni di profilo della normativa ISO 1328-1:1995

## 2.2 Scansione delle camme

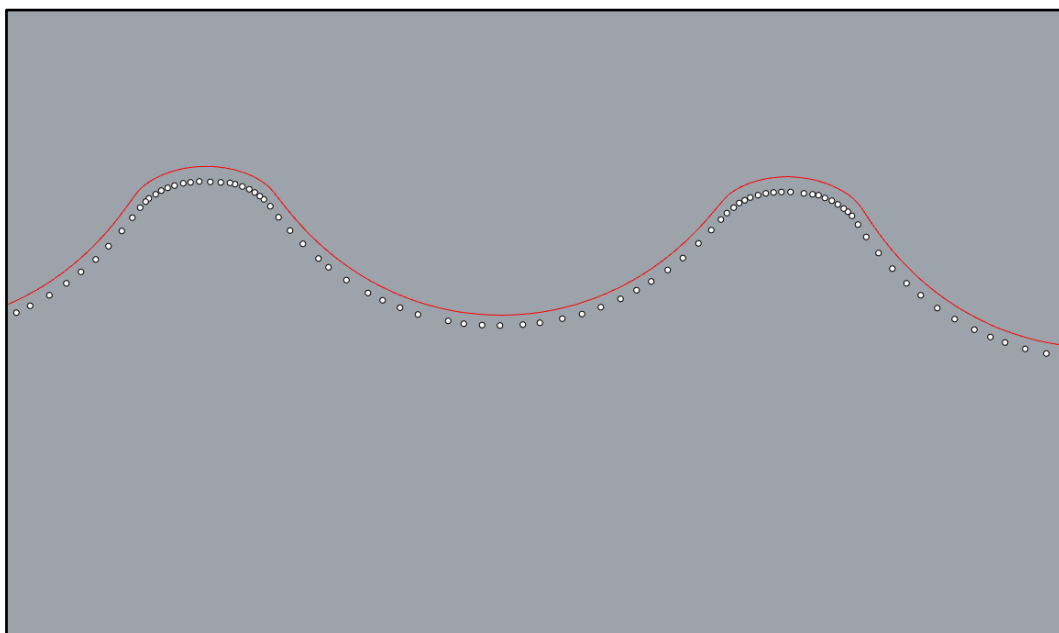
Per poter analizzare le camme, la Omme Gears ha fornito, tramite un tastatore posto in un ambiente controllato, delle scansioni (Figura 16). Il risultato di queste scansioni è una nuvola di punti (Figura 17A), che unita con la curva teorica del profilo cicloidale di lavoro, ci fornisce tutti gli elementi necessari per identificare i parametri di qualità del pezzo. Al fine di ottenere risultati più affidabili, sono state necessarie delle scansioni molto dettagliate caratterizzate da un numero di punti molto elevato, tuttavia per evitare la gestione di una mole di punti troppo elevata e per evitare di impiegare il tastatore per troppo a lungo, si è deciso di realizzare scansioni caratterizzate da un numero di punti per dente compreso tra 50 e 100. Per avere maggiori informazioni sulla qualità della camma, il profilo di quest'ultima viene scansionato più volte (almeno quattro) lungo l'altezza della camma (Figura 17B). Il file finale ricevuto da Omme Gears, in formato .dxf, è poi subito pronto all'importazione in Rhinoceros.



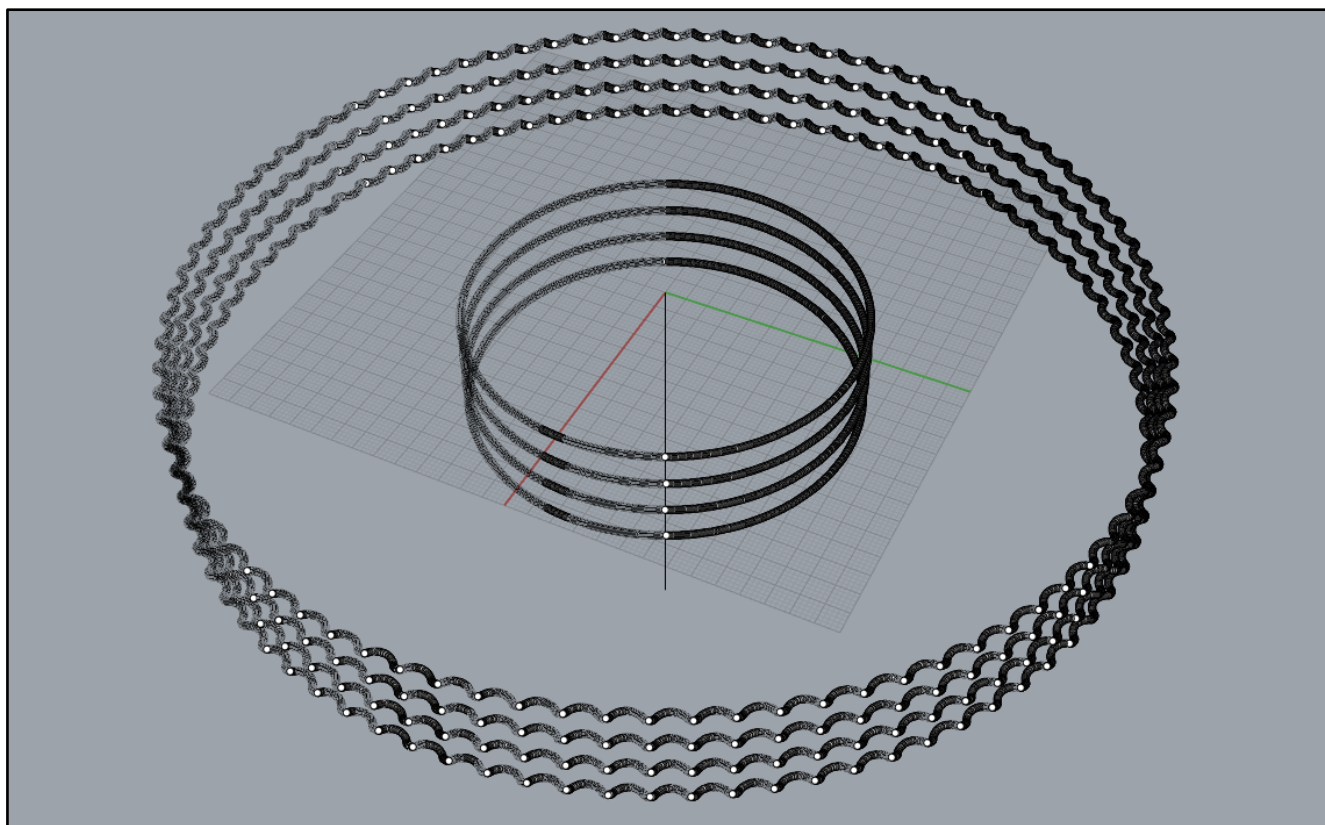


*(Figura 16) Tastatore utilizzato per le scansioni presso la Omme Gears.*

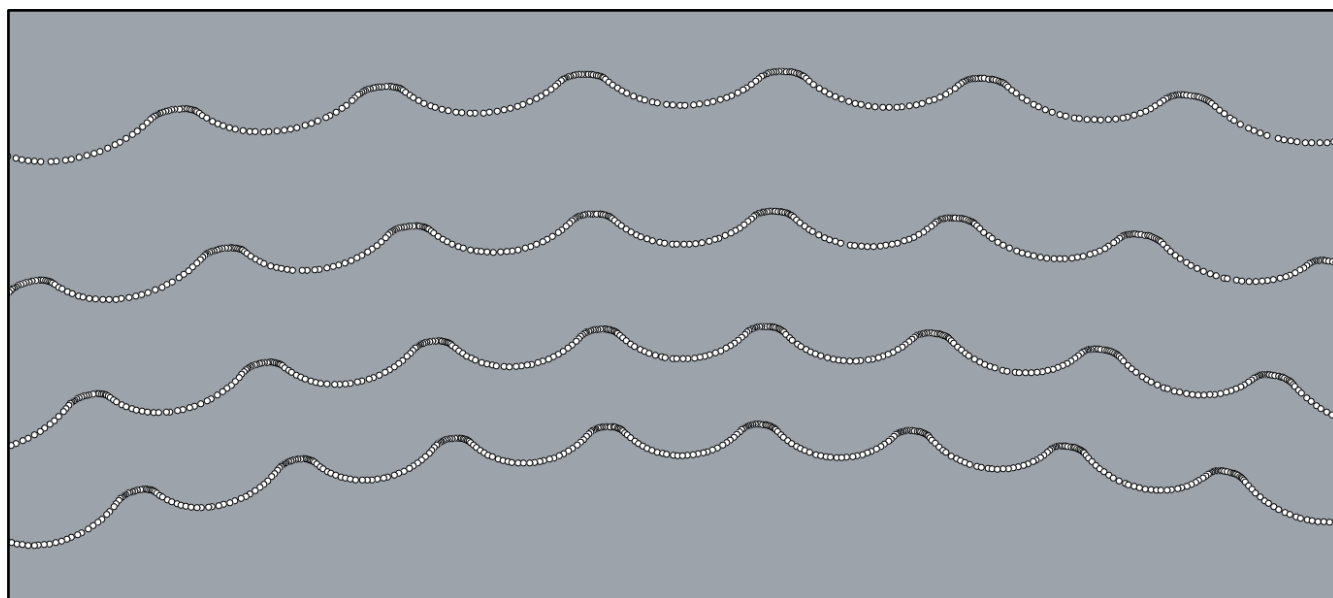
*Il tastatore è collocato in una stanza isolata, la cui temperatura viene monitorata e mantenuta costante.*



*(Figura 17A) I punti in bianco sono quelli ottenuti dalla scansione. In rosso la curva del profilo teorico, il cui metodo di realizzazione è stato illustrato nei precedenti capitoli.*



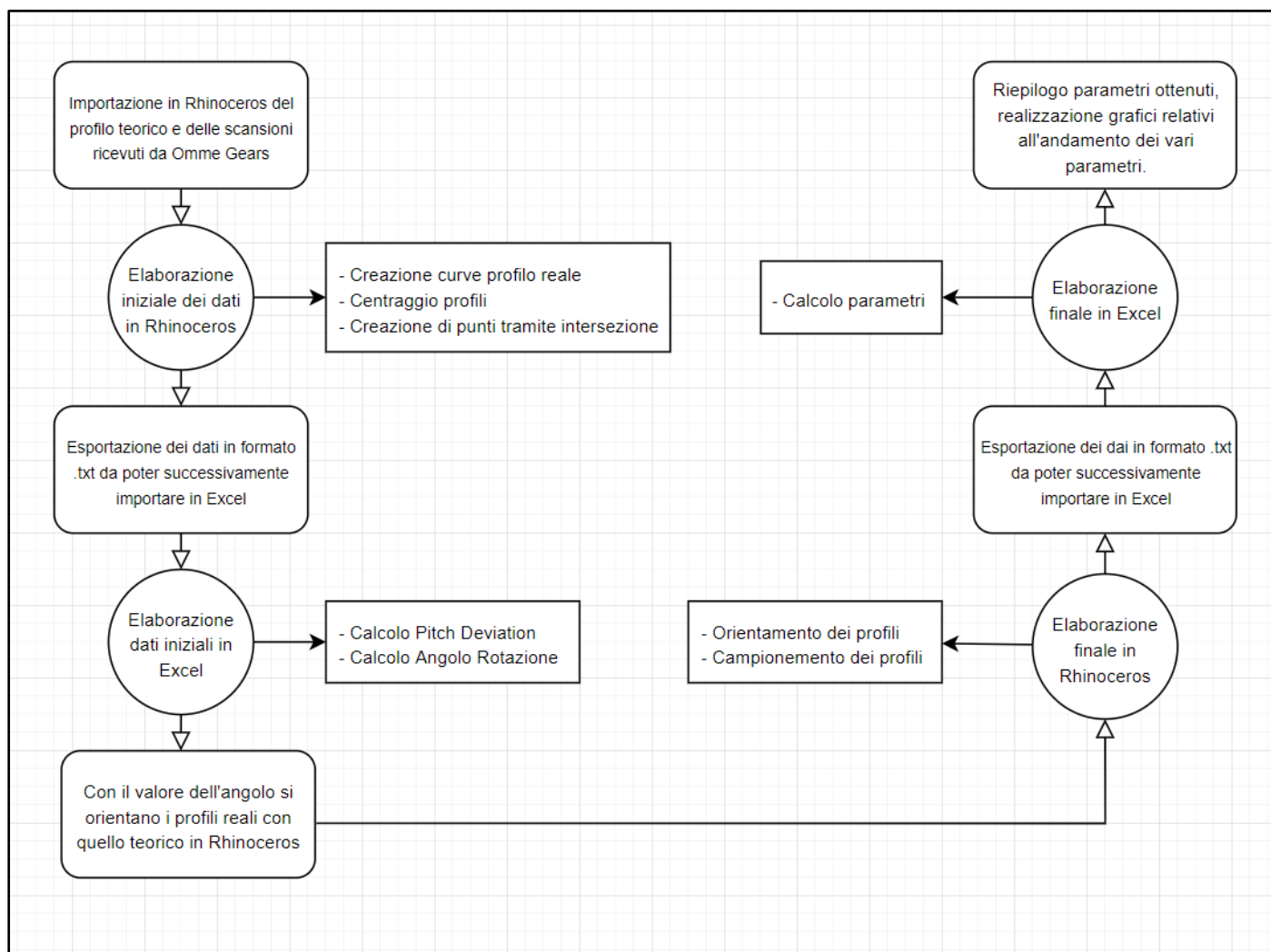
(Figura 17B) Scansione su 4 livelli di una camma. Ciascun livello contiene circa 6000 punti.



(Figura 17B) Ingrandimento della scansione. Si nota come sulla punta dei denti sono concentrati un maggior numero di punti, essendo una zona di particolare importanza ai fini della analisi.

### 3 Metodo per il controllo qualità di camme con profilo cicloidale

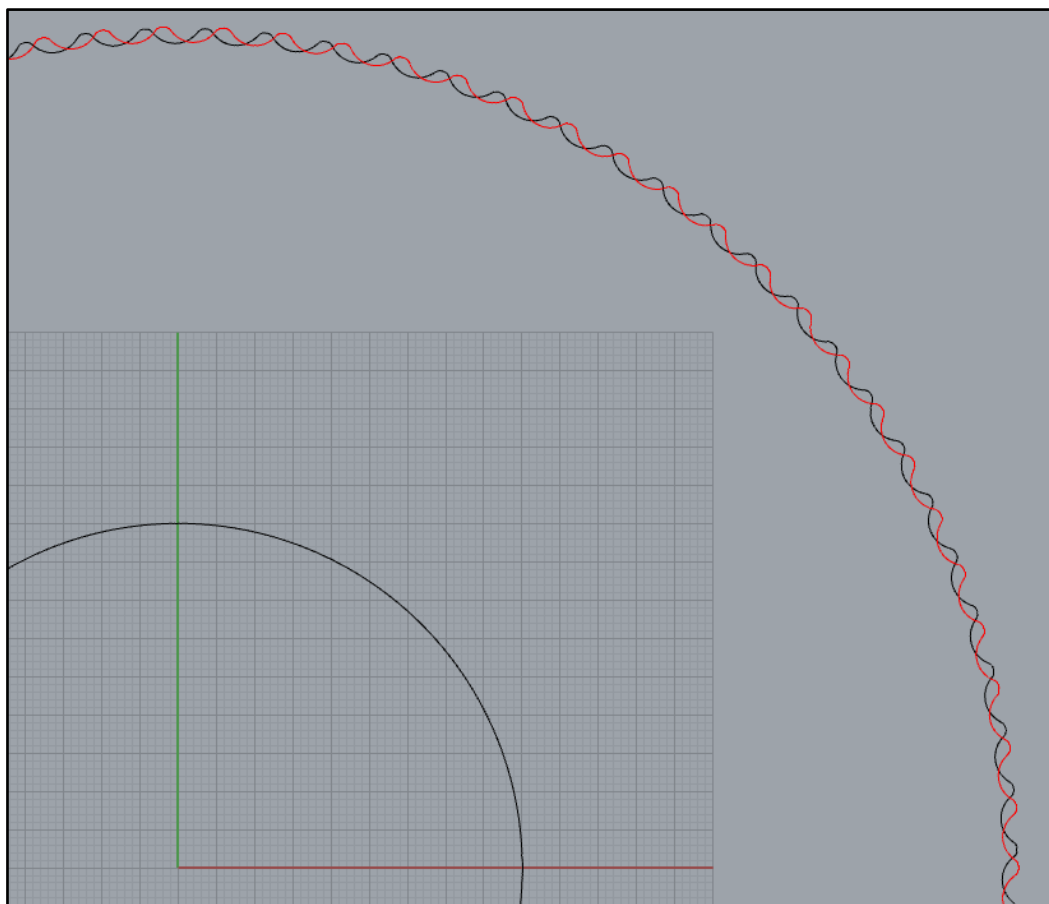
Di seguito (Figura 18) viene mostrata una flow-chart per dare una idea chiara delle varie operazioni e come queste sono ordinate. Come spiegato nella introduzione, dalla flow-chart si nota come molti passaggi della prima fase, sono da effettuare manualmente.



(Figura 18) Flowchart raffigurante il flusso di lavoro a livello generale.

### 3.1 Preparazione iniziale e prima importazione in Excel

Prima di poter elaborare i dati in Excel, è necessaria la giusta preparazione dei file ottenuti da Omme Gears. Le due operazioni principali da effettuare sono il centraggio e l'orientamento circonferenziale dei profili (teorico e reale). Si mostra un esempio di profili non orientati correttamente (Figura 19), tuttavia spesso accade che questo disallineamento non sia marcato a sufficienza da poter essere notato a occhio nudo (come mostrato nella figura 21).



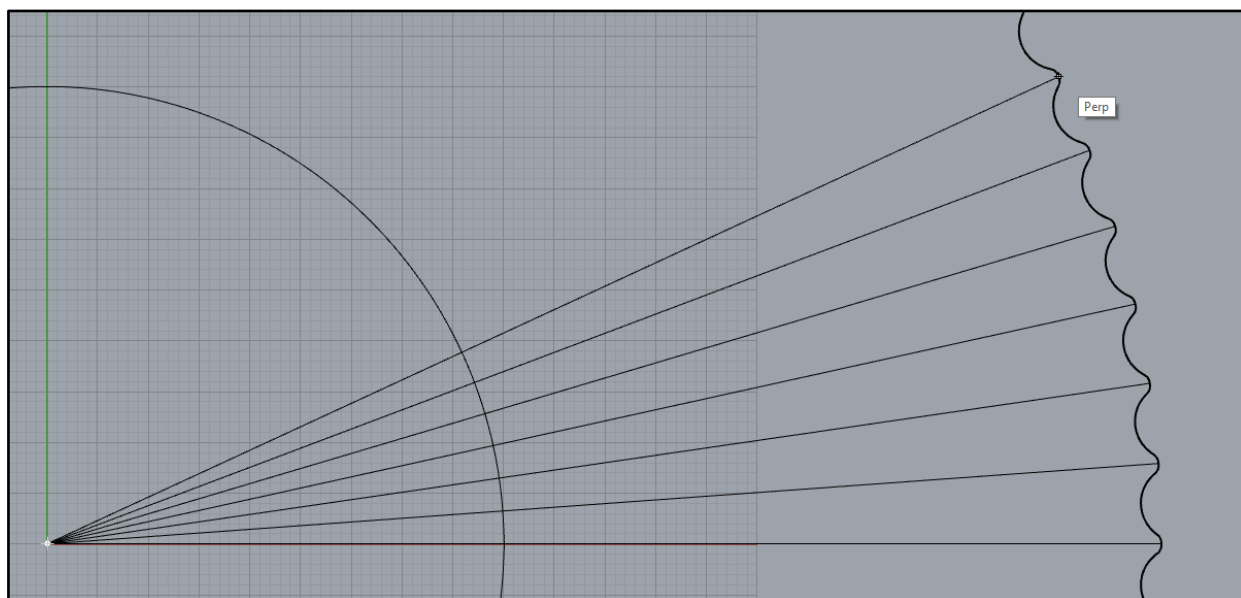
(Figura 19) In rosso il profilo teorico. In nero, il profilo reale realizzando interpolando i punti ottenuti dalla scansione. Notiamo come questi non sono perfettamente allineati. Verrà mostrato nei capitoli successivi la soluzione adottata.

#### 3.1.1 Centraggio dei profili

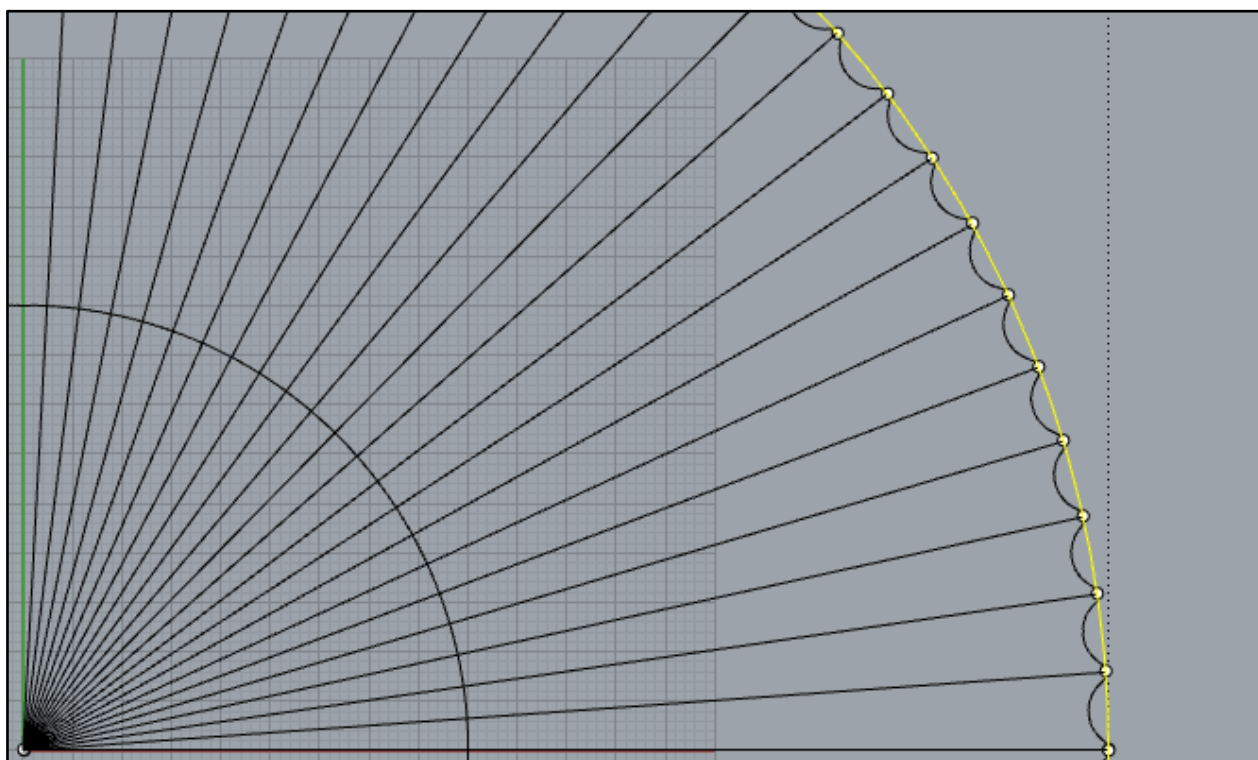
Il centraggio dei profili con l'origine degli assi in Rhinoceros viene effettuato con due metodi diversi, uno per il profilo teorico e uno per quello reale. Il profilo teorico viene centrato tracciando una circonferenza passante per tre punti. I tre punti di passaggio in questione saranno le cime di tre denti a scelta del profilo teorico. Ottenuta la circonferenza, si utilizza il suo centro come punto di partenza di una traslazione rigida effettuando così il centraggio.

Il profilo reale viene centrato con un metodo simile. Si tracciano dei raggi, che partono dall'origine e arrivano al profilo imponendo una condizione di perpendicolarità (Figura 20A). Idealmente si vuole tracciare un raggio

per ogni dente, ma essendo una operazione da effettuare a mano e quindi temporalmente dispendiosa, i raggi possono anche essere tracciati in maniera randomica cercando di ricoprire in maniera quantomeno uniforme ciascun quadrante del profilo. Dopodiché si estraggono i punti di intersezione tra i raggi tracciati e il profilo reale e si utilizzano questi punti per realizzare una circonferenza con il comando <CircleFitPoints>. Si utilizza la circonferenza ottenuta per centrare il profilo reale come già descritto (Figura 21B).



(Figura 20A)

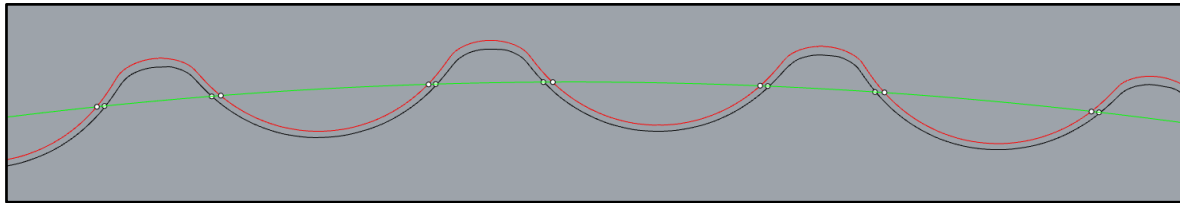


(Figura 20B) In giallo è evidenziata la circonferenza ottenuta tramite il comando CircleFitPoints.

La distanza dal centro di questa circonferenza ottenuta con l'origine ci dà l'errore di Runout.

### 3.1.2 Orientamento circonfrenziale

Per l'orientamento circonfrenziale, si prendono in considerazione i punti ottenuti dall'intersezione della circonferenza di base rispettivamente con il profilo teorico e il profilo reale (Figura 21). La circonferenza di base ha un raggio pari alla media tra i valori del raggio massimo e minimo del profilo teorico.



(Figura 21) In verde la circonferenza di base disegnata rispetto al profilo teorico, disegnato in rosso.

I punti rappresentano l'intersezione della circonferenza di base con i profili.

I due profili sembrano all'apparenza allineati, tuttavia lo sfasamento spesso può essere anche inferiore a 1°.

I punti vengono poi esportati in due file di testo: uno per i punti provenienti dal profilo reale e uno per i punti provenienti dal profilo teorico. Dopodiché vengono importati in un primo foglio Excel (Figura 22). In questo foglio, si crea un filtro che permette di distinguere e selezionare unicamente i punti che si trovano su un fianco "destro" e i punti che si trovano su un fianco "sinistro" di uno dei due profili.

D3									
=SE(D2="Destro R";"Sinistro R";"Destro R")									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	N	X Reale	Y Reale	Fianco	N	X Teorico	Y Teorico	Fianco	
2	1	31,292031	104,411367	Destro R	1	108,9896861	1,474112733	Sinistro T	
3	2	28,820288	105,120482	Sinistro R	2	108,8119439	6,394181094	Destro T	
4	3	23,675442	106,397360	Destro R	3	108,5992066	9,334721217	Sinistro T	
5	4	21,161252	106,925797	Sinistro R	4	108,0669066	14,22913862	Destro T	
6	5	15,936237	107,828387	Destro R	5	107,642541	17,14666279	Sinistro T	
7	6	13,391061	108,173953	Sinistro R	6	106,7584585	21,98991201	Destro T	
8	7	8,114467	108,697195	Destro R	7	106,1246772	24,8692096	Sinistro T	
9	8	5,545382	108,858502	Sinistro R	8	104,8934212	29,63604017	Destro T	
10	9	0,249430	108,999369	Destro R	9	104,0535283	32,46209987	Sinistro T	
11	10	-2,321874	108,974922	Sinistro R	10	102,4815182	37,12765975	Destro T	
12	11	-7,616230	108,733241	Destro R	11	101,4398926	39,88574777	Sinistro T	
13	12	-10,177995	108,523422	Sinistro R	12	99,53532399	44,4257129	Destro T	
14	13	-15,442188	107,900248	Destro R	13	98,29739624	47,10144986	Sinistro T	
15	14	-17,983658	107,505873	Sinistro R	14	96,0701987	51,49215095	Destro T	
16	15	-23,188557	106,504533	Destro R	15	94,64242277	54,0715868	Sinistro T	
17	16	-25,694060	105,927994	Sinistro R	16	92,10420788	58,29013277	Destro T	
18	17	-30,812393	104,553915	Destro R	17	90,49402753	60,75981953	Sinistro T	
19	18	-33,272250	103,797312	Sinistro R	18	87,65802837	64,78421683	Destro T	
20	19	-38,276922	102,057836	Destro R	19	85,87383833	67,13127868	Sinistro T	
21	20	-40,674786	101,126092	Sinistro R	20	82,75484048	70,94054598	Destro T	
22	21	-45,541858	99,029611	Destro R	21	80,8059427	73,15274644	Sinistro T	
23	22	-47,866150	97,927301	Sinistro R	22	77,42020718	76,72702398	Destro T	
24	23	-52,569525	95,484919	Destro R	23	75,31676231	78,79282964	Sinistro T	

(Figura 22) Si controllano le coordinate del primo punto di ciascuna lista e si assegna il fianco su cui sono collocati.

Tramite una formula viene automaticamente assegnato un fianco ai restanti punti.

Con questo filtro, si selezionano ad esempio le coordinate X dei punti collocati sul fianco destro del profilo reale (punti che ricordiamo sono stati ottenuti dall'intersezione con la circonferenza di base) e li si incollano nel foglio di lavoro successivo. La prima operazione è il passaggio a coordinate polari. Il calcolo dell'angolo



viene effettuato con la formula  $\text{ARCTAN.2}(X;Y)/(\text{PI.GRECO}()/180)$  mentre per il raggio si utilizza  $\text{RADQ}(X^2+Y^2)$ . In particolar modo ci interessa l'angolo alla quale ciascun punto è collocato (Figura 23A).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	INPUT PUNTI										
2	X Fianco SINISTRO Profilo REALE	Y Fianco SINISTRO Profilo REALE	X Fianco DESTRO Profilo REALE	Y Fianco DESTRO Profilo REALE	X Fianco SINISTRO Profilo TEORICO	Y Fianco SINISTRO Profilo TEORICO	X Fianco DESTRO Profilo TEORICO	Y Fianco DESTRO Profilo TEORICO	Fianco DX Teorico (ANGOLO)	Angolo Corretto	Angolo Ordinato (Decrescente)
3	28,820288	105,120482	31,292031	104,411367	108,989686	1,474113	108,8119439	6,394181094	3,363038552	3,363038552	359,2251075
4	21,161252	106,925797	23,675442	106,397360	108,599207	9,334721	108,0669066	14,22913862	7,500969586	7,500969586	355,0871765
5	13,391061	108,173953	15,936237	107,828387	107,642541	17,146663	106,7584585	21,98991201	11,63890062	11,63890062	350,9492454
6	5,545382	108,858502	8,114467	108,697195	106,124677	24,869210	104,8934212	29,63604017	15,77683166	15,77683166	346,8113144
7	-2,321874	108,974922	0,249430	108,999369	104,053528	32,462100	102,4815182	37,12765975	19,91476269	19,91476269	342,6733834
8	-10,177995	108,523422	-7,616230	108,733241	101,439893	39,885748	99,53532399	44,4257129	24,05269372	24,05269372	338,5354523
9	-17,983658	107,505873	-15,442188	107,900248	98,297396	47,101450	96,0701987	51,49215095	28,19062476	28,19062476	334,3975213
10	-25,694060	105,927994	-23,188557	106,504533	94,642423	54,071587	92,10420788	58,29013277	32,32855579	32,32855579	330,2595903
11	-33,272250	103,797312	-30,812393	104,553915	90,494028	60,759820	87,65802837	64,78421683	36,46648683	36,46648683	326,1216592
12	-40,674786	101,126092	-38,276922	102,057836	85,873838	67,131279	82,75484048	70,94054598	40,60441786	40,60441786	321,9837282
13	-47,866150	97,927301	-45,541858	99,029611	80,805943	73,152746	77,42020718	76,72702398	44,7423489	44,7423489	317,8457972
14	-54,808390	94,217647	-52,569525	95,484919	75,316762	78,792830	71,68194076	82,11348279	48,88027993	48,88027993	313,7078661
15	-61,465736	90,016043	-59,323972	91,441736	69,434915	84,022124	65,5699579	87,07183993	53,01821097	53,01821097	309,5699351
16	-67,801256	85,345852	-65,764880	86,924710	63,191067	88,813365	59,11612364	91,57624481	57,156142	57,156142	305,4320041
17	-73,784693	80,229320	-71,864768	81,953522	56,617769	93,141575	52,35408528	95,60321356	61,29407303	61,29407303	301,294073
18	-79,378853	74,698878	-77,590123	76,555193	49,749293	96,984187	45,31909696	99,13175141	65,43200407	65,43200407	297,156142
19	-84,562216	68,776132	-82,913694	70,754817	42,621446	100,321169	38,04783586	102,1434622	69,5699351	69,5699351	293,018211
20	-89,304625	62,494870	-87,803418	64,587031	35,271392	103,135123	30,57821096	104,6226443	73,70786614	73,70786614	288,8802799
21	-93,582446	55,886050	-92,235233	58,082584	27,737448	105,411378	22,94916542	106,5563724	77,84579717	77,84579717	284,7423489
22	-97,369979	48,989917	-96,184301	51,278699	20,058895	107,138067	15,20047356	107,9345649	81,98372821	81,98372821	280,6044179
23	-100,651483	41,835435	-99,633608	44,204852	12,275763	108,306188	7,372533473	108,7500365	86,12165924	86,12165924	276,4664868
24	-103,409149	34,459724	-102,563663	36,900130	4,428632	108,909650	-0,493843592	108,9985358	90,25959028	90,25959028	272,3285558
25	-105,625992	26,908631	-104,959325	29,401782	-3,441589	108,945308	-8,357645985	108,6787672	94,39752131	94,39752131	268,1906248
26	-107,291671	19,220354	-106,807076	21,752544	-11,293866	108,412976	-16,17787548	107,7923978	98,53545234	98,53545234	264,0526937
27	-108,399053	11,426727	-108,098206	13,989370	-19,087263	107,315428	-23,91376103	106,3440488	102,6733834	102,6733834	259,9147627
28	-108,941069	3,573251	-108,825952	6,151172	-26,781147	105,658388	-31,52497129	104,3412712	106,8113144	106,8113144	255,7768317
29	-108,915067	-4,293347	-108,986157	-1,715333	-34,335407	103,450493	-38,97182496	101,7945065	110,9492454	110,9492454	251,6389006
30	-108,321051	-12,143915	-108,578417	-9,573503	-41,710658	100,703256	-46,21549757	98,71703233	115,0871765	115,0871765	247,5009696
31	-107,162524	-19,927825	-107,604353	-17,384701	-48,868449	97,430998	-53,21822398	95,12489329	119,2251075	119,2251075	243,3630386

(Figura 23A) Sulla sinistra vediamo le coordinate dei punti per i rispettivi fianchi dei profili.

Sulla destra invece l'angolo per i punti del Fianco Destro del profilo Teorico,

l'angolo per i punti del Fianco Destro del profilo Reale, etc.

Con I dati ottenuti è possibile calcolare la differenza angolare tra i punti sul fianco destro del profilo teorico e i punti sul fianco destro del profilo reale ( $V_n-W_n$ ); e la differenza angolare tra i punti sul fianco sinistro del profilo teorico e i punti sul fianco sinistro del profilo reale ( $AE_n-AF_n$ ). È possibile calcolare la media delle differenze ( $\text{MEDIA}(Y_{n1};Y_{ni})$ ) e facendo una ulteriore media sulle medie si ottiene l'angolo con cui ruotare il profilo reale per ottenere l'allineamento circonfrenziale con il profilo teorico. Con i dati a disposizione siamo in grado di ricavare il Single Pitch Deviation sia per il fianco destro che sinistro, facendo la differenza tra il passo teorico e il passo reale (Figura 23B).

V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL
INPUT DATA 1A	INPUT DATA 1B								INPUT DATA 2A	INPUT DATA 2B						
Punti Fianco DESTRO Teorico (ANGOLO)	Punti Fianco DESTRO Reale (ANGOLO)	Differenza	Media		Passo Teorico	Passo Reale Fianco DESTRO	Single Pitch Deviation Fianco DESTRO		Punti Fianco SINISTRO Teorico (ANGOLO)	Punti Fianco SINISTRO Reale (ANGOLO)	Differenza	Media		Passo Teorico	Passo Reale Fianco SINISTRO	Single Pitch Deviation Fianco SINISTRO
359,2251	358,83467	0,39044	0,39268		4,13793	4,14097	-0,00304		356,63696	356,04961	0,58735	0,58865		4,13793	4,13821	-0,00028
355,0872	354,69370	0,39348			4,13793	4,13786	0,00007		352,49903	351,91140	0,58763			4,13793	4,13894	-0,00100
350,9492	350,55584	0,39340			4,13793	4,13731	0,00062		348,36110	347,77246	0,58864			4,13793	4,13841	-0,00048
346,8113	346,41853	0,39278			4,13793	4,13830	-0,00037		344,22317	343,63405	0,58912			4,13793	4,13678	0,00115
342,6734	342,28024	0,39315			4,13793	4,13689	0,00104		340,08524	339,49727	0,58797			4,13793	4,13851	-0,00058
338,5355	338,14334	0,39211			4,13793	4,13872	-0,00079		335,94731	335,35876	0,58854			4,13793	4,13826	-0,00032
334,3975	334,00462	0,39290			4,13793	4,13660	0,00134		331,80938	331,22051	0,58887			4,13793	4,13843	-0,00050
330,2596	329,86803	0,39156			4,13793	4,14064	-0,00271		327,67144	327,08208	0,58937			4,13793	4,13719	0,00074
326,1217	325,72738	0,39428			4,13793	4,13535	0,00258		323,53351	322,94488	0,58863			4,13793	4,13873	-0,00080
321,9837	321,59203	0,39170			4,13793	4,13829	-0,00036		319,39558	318,80615	0,58943			4,13793	4,13771	0,00022
317,8458	317,45374	0,39205			4,13793	4,13737	0,00056		315,25765	314,66844	0,58921			4,13793	4,13836	-0,00043
313,7079	313,31638	0,39149			4,13793	4,13778	0,00015		311,11972	310,53008	0,58964			4,13793	4,13039	0,00754
309,5699	309,17860	0,39134			4,13793	4,13836	-0,00043		306,98179	306,39969	0,58210			4,13793	4,14644	-0,00851
305,4320	305,04024	0,39177			4,13793	4,13827	-0,00034		302,84386	302,25325	0,59061			4,13793	4,13841	-0,00048
301,2941	300,90197	0,39210			4,13793	4,13707	0,00086		298,70593	298,11484	0,59109			4,13793	4,13680	0,00113
297,1561	296,76490	0,39124			4,13793	4,13893	-0,00100		294,56800	293,97803	0,58996			4,13793	4,13862	-0,00069
293,0182	292,62597	0,39224			4,13793	4,13768	0,00025		290,43006	289,83941	0,59065			4,13793	4,13835	-0,00042
288,8803	288,48828	0,39200			4,13793	4,13784	0,00009		286,29213	285,70106	0,59108			4,13793	4,13837	-0,00044
284,7423	284,35045	0,39190			4,13793	4,13784	0,00010		282,15420	281,56268	0,59152			4,13793	4,13689	0,00104
280,6044	280,21261	0,39181			4,13793	4,13852	-0,00059		278,01627	277,42579	0,59048			4,13793	4,13887	-0,00094
276,4665	276,07409	0,39240			4,13793	4,13822	-0,00029		273,87834	273,28692	0,59142			4,13793	4,13819	-0,00026
272,3286	271,93587	0,39269			4,13793	4,13847	-0,00054		269,74041	269,14873	0,59168			4,13793	4,13806	-0,00013
268,1906	267,79739	0,39323			4,13793	4,13748	0,00045		265,60248	265,01067	0,59181			4,13793	4,13667	0,00126
264,0527	263,65991	0,39278			4,13793	4,13904	-0,00111		261,46455	260,87400	0,59054			4,13793	4,13801	-0,00008
259,9148	259,52087	0,39389			4,13793	4,13757	0,00036		257,32662	256,73599	0,59063			4,13793	4,13826	-0,00033
255,7768	255,38330	0,39354			4,13793	4,13798	-0,00005		253,18869	252,59773	0,59095			4,13793	4,13694	0,00099
251,6389	251,24531	0,39359			4,13793	4,13856	-0,00063		249,05075	248,46079	0,58997			4,13793	4,13765	0,00028
247,5010	247,10676	0,39421			4,13793	4,13837	-0,00043		244,91282	244,32314	0,58968			4,13793	4,13842	-0,00049
243,3630	242,96839	0,39465			4,13793	4,13769	0,00025		240,77489	240,18472	0,59017			4,13793	4,13693	0,00100
239,2251	238,83070	0,39440			4,13793	4,13868	-0,00075		236,63696	236,04779	0,58917			4,13793	4,13846	-0,00053
235,0872	234,69202	0,39515			4,13793	4,13736	0,00057		232,49903	231,90933	0,58970			4,13793	4,13740	0,00053
230,9492	230,55466	0,39458			4,13793	4,13642	0,00151		228,36110	227,77193	0,58917			4,13793	4,13870	-0,00077
226,8113	226,41824	0,39307			4,13793	4,13952	-0,00159		224,22317	223,63322	0,58995			4,13793	4,13706	0,00087
222,6734	222,27872	0,39466			4,13793	4,13887	-0,00093		220,08524	219,49616	0,58908			4,13793	4,13694	0,00099
218,5355	218,13986	0,39560			4,13793	4,13765	0,00029		215,94731	215,35923	0,58808			4,13793	4,13788	0,00005
214,3975	214,00221	0,39531			4,13793	4,13715	0,00078		211,80938	211,22134	0,58803			4,13793	4,13677	0,00116
210,2596	209,86506	0,39453			4,13793	4,13723	0,00070		207,67144	207,08458	0,58687			4,13793	4,13777	0,00016
206,1217	205,72783	0,39383			4,13793	4,13837	-0,00044		203,53351	202,94680	0,58671			4,13793	4,13804	-0,00011

(Figura 23B) Nella tabella, sono mostrate le colonne relative al calcolo del Single Pitch Deviation relativo al fianco destro e sinistro.

## 3.2 Rilevazione delle misure

Ricavato il valore dell'angolo di cui ruotare il profilo reale, si torna in Rhinoceros per effettuare la rotazione e realizzare le ultime operazioni di preparazione. Per ricapitolare le operazioni effettuate finora:

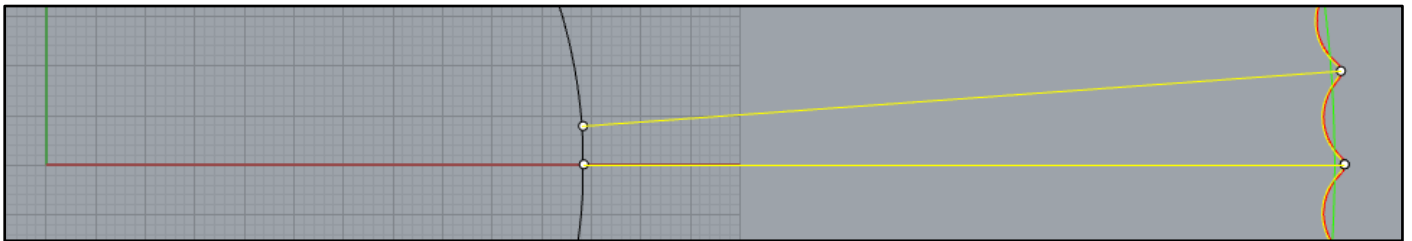
- Importazione in Rhino della curva teorica ricevuta da Omme Gears e della nuvola di punti ottenuta dalla scansione (raffigurante il profilo reale).
- Realizzazione, tramite il comando <CurveThroughPoints>, di una curva profilo reale derivante da una interpolazione della nuvola di punti.
- Centraggio tramite i metodi descritti nel paragrafo 3.1.1.
- Realizzazione della circonferenza di base rispetto al profilo teorico ed estrazione dei punti intersezione tra la circonferenza di base e le due curve profilo (paragrafo 3.1.2).
- Importazione dei punti in Excel, seguito dal calcolo dell'angolo di rotazione (paragrafo 3.1.2).
- Rotazione del profilo reale e allineamento (paragrafo 3.1.2).

Una volta che i profili sono centrati e allineati, possiamo passare alla fase di campionamento, necessaria per ottenere una nuvola di punti da poter utilizzare in Excel. Viene effettuato un campionamento sia per il profilo teorico che per il profilo reale. Il vantaggio del campionamento è che ci permette di avere un insieme di punti equi-distanziati angularmente l'uno dall'altro. Questo dettaglio è fondamentale per semplificare le operazioni di calcolo in Excel.

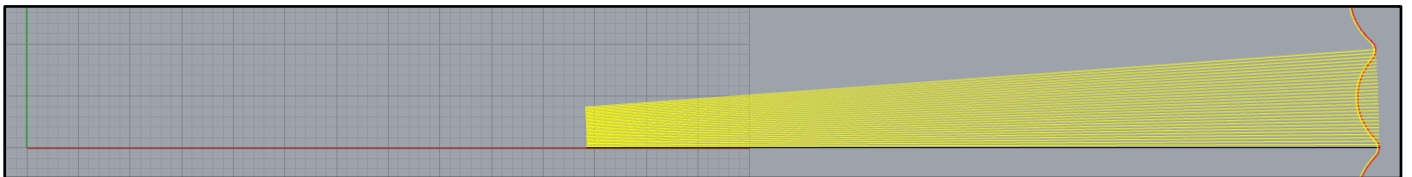


### 3.2.1 Campionamento

Il campionamento viene realizzato creando per prima cosa un array polare. Si considera inizialmente un singolo vano e di questo si tracciano in Rhinoceros i raggi esterni (Figura 24A). Con il comando “ArrayPolar” si genera, per l'appunto, un array. Il numero di segmenti per il primo vano varierà in base a quanto fitto si vuole il campionamento (Figura 24B). Più sono i punti per vano considerati, maggiore sarà la precisione di alcuni dei parametri estratti, tuttavia per evitare di lavorare con una mole di dati troppo grande, si è evitato di creare un array troppo fitto. Si ripete l'operazione di Array, estendendo così il campionamento, sinora effettuato su un singolo vano, a tutti i denti del profilo. Ottenuto un array che copre l'intero angolo giro, si fa una intersezione tra questo e la curva interpolante del profilo reale (quest'ultima realizzata in precedenza), ottenendo una nuvola di punti. La differenza sostanziale tra questa nuvola di punti e quella ricevuta da Omme Gears tramite le scansioni, è che la prima è caratterizzata da punti distanziati angularmente in maniera costante. Questo dettaglio è cruciale per far sì che le successive analisi in Excel possano funzionare.



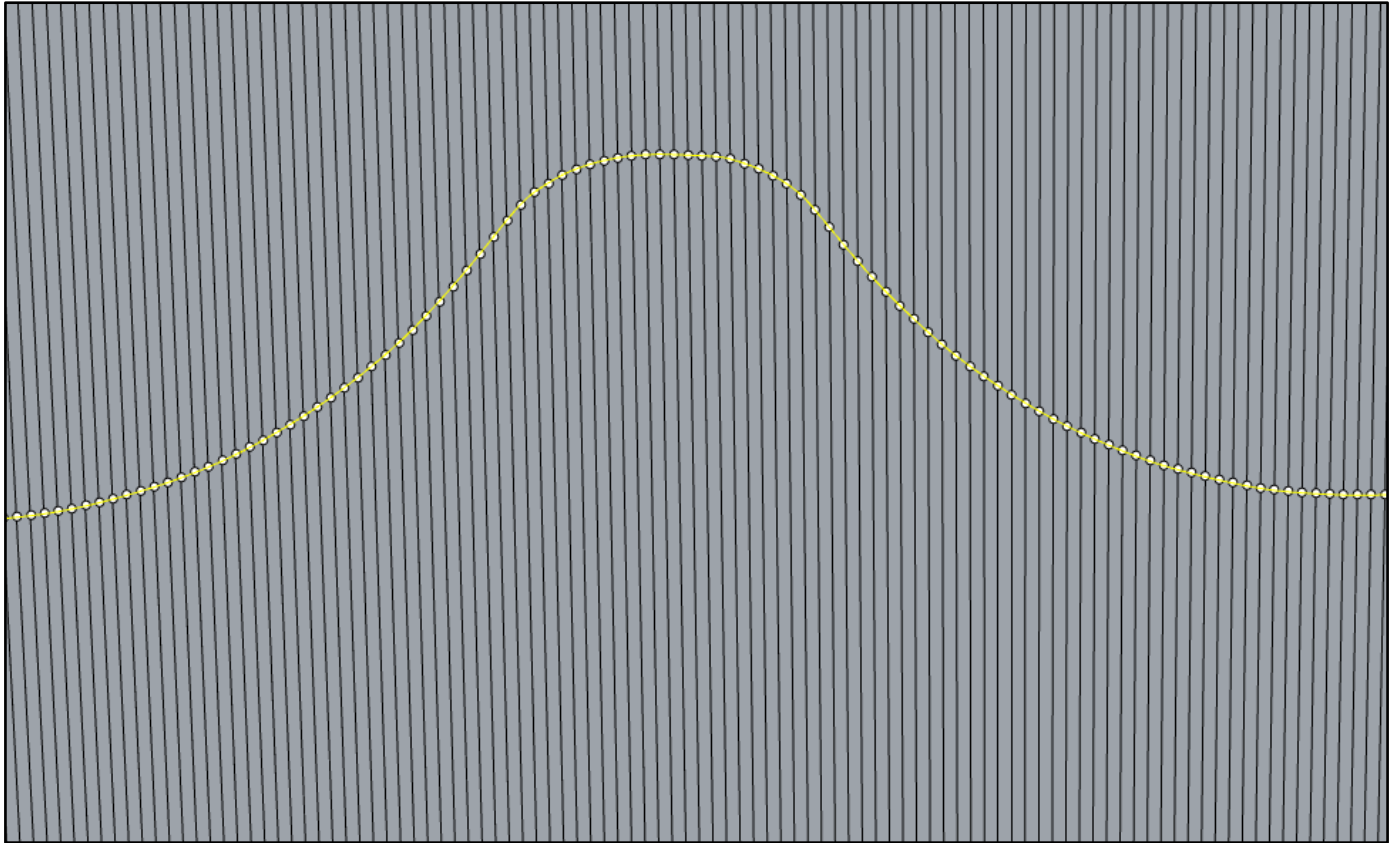
(Figura 24A) In rosso, il profilo teorico. In verde, la circonferenza di base.



(Figura 24B) Campionamento effettuato su un singolo vano.

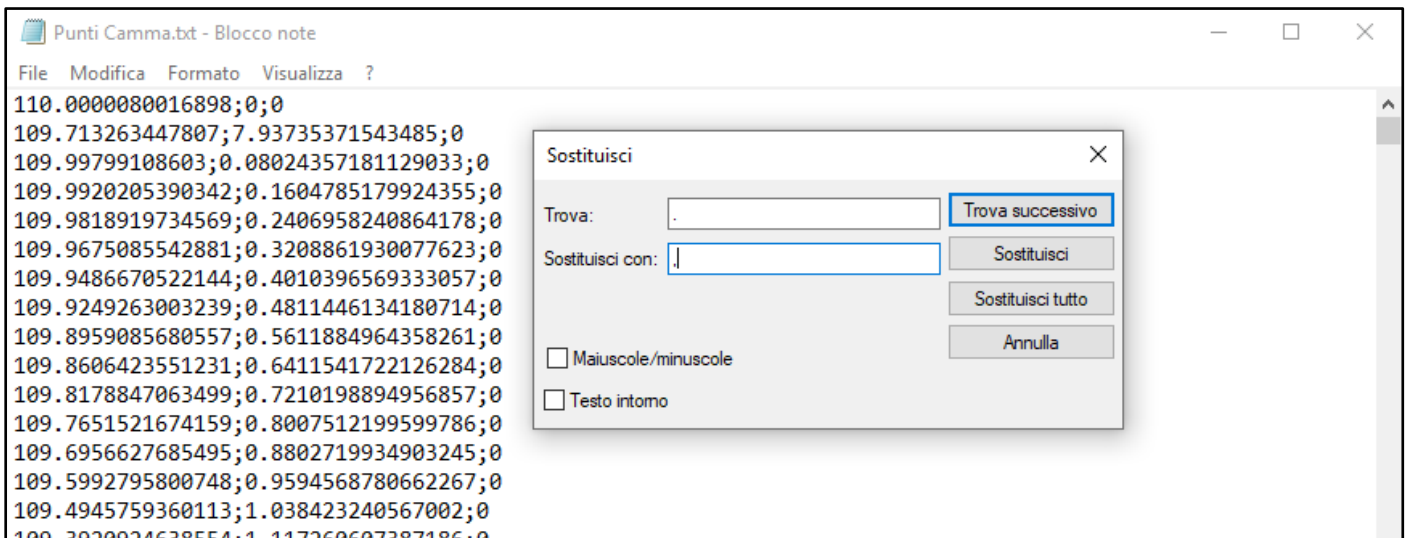
Come descritto, l'operazione successiva permette di ripetere l'array su tutti gli altri vani.

Come con l'orientamento dei profili, si estraggono i punti derivanti dall'intersezione del profilo e, in questo caso, l'array polare (Figura 24C). I punti vengono esportati da Rhinoceros come un file testo (.txt). Ciascun file testo viene aperto per modificare il carattere utilizzato come separatore decimale dei valori. Il punto, utilizzato di default, viene sostituito con la virgola. L'operazione di sostituzione è molto breve tramite l'uso del comando “sostituisci” (Figura 25). Il passaggio è necessario per permettere ad Excel di leggere i valori senza errori. Questa lista di punti verrà successivamente importata in Excel.



(Figura 24C) Ingrandimento su un dente del profilo. In giallo è evidenziata la curva del profilo reale.

L'array mostrato ha una densità di 100 punti per vano e viene utilizzato per campionare il profilo della camma.



(Figura 25) Uso del comando “sostituisci”. Il file .txt viene poi salvato per poter essere importato.

## 4 Calcolo dei parametri in Excel

Il risultato finale del lavoro svolto è un foglio Excel caratterizzato da un “workflow” ben preciso. Sulla sinistra del foglio vengono inseriti i dati di partenza (Figura 26) e da lì vengono calcolati, a cascata, tutti i parametri elencati nei capitoli precedenti. In questo modo si facilita l’utilizzo ad un possibile operatore.

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3						
4			PUNTI DEL CAMPIONAMENTO			
	Indice		X Campionamento Teorico	Y Campionamento Teorico	X Campionamento Reale	Y Campionamento Reale
5						
6		0				
7	7	1	109,99739	-0,08024	109,81898	-0,08011
8	8	2	109,99202	-0,16048	109,81402	-0,16022
9	9	3	109,98189	-0,24070	109,80867	-0,24032
10	10	4	109,96751	-0,32089	109,79907	-0,32039
11	11	5	109,94867	-0,40104	109,77870	-0,40042
12	12	6	109,92493	-0,48114	109,75124	-0,48038
13	13	7	109,89591	-0,56119	109,71984	-0,56029
14	14	8	109,86064	-0,64115	109,68180	-0,64011
15	15	9	109,81788	-0,72102	109,63278	-0,71980
16	16	10	109,76515	-0,80075	109,57099	-0,79933
17	17	11	109,69566	-0,88027	109,48208	-0,87856
18	18	12	109,59928	-0,95946	109,38210	-0,95756
19	19	13	109,49458	-1,03842	109,26420	-1,03643
20	20	14	109,39209	-1,11726	109,18891	-1,11519
21	21	15	109,29440	-1,19600	109,09735	-1,19385
22	22	16	109,20186	-1,27466	109,01112	-1,27244
23	23	17	109,11424	-1,35325	108,92967	-1,35096
24	24	18	109,03208	-1,43178	108,85164	-1,42941
25	25	19	108,95408	-1,51026	108,77696	-1,50780
26	26	20	108,88065	-1,58868	108,70706	-1,58615

(Figura 26) Colonne riservate all’inserimento delle coordinate (in forma cartesiana) dei punti del campionamento.

Al fine di semplificare il calcolo, come per il calcolo dell’angolo di sfasamento (necessario per orientare i profili), si effettua il cambio di coordinate, passando da cartesiane a polari (Figura 27). Effettuando questo passaggio di coordinate stiamo difatti “srotolando” il profilo, ottenendo così due segnali con andamento sinusoidale (uno per il profilo teorico e uno per il profilo reale). La formula utilizzata per il cambio dell’angolo è  $=\text{ARCTAN.2}(X;Y)/(\text{PI.GRECO}()/180)$ . I valori che si ottengono vanno da  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ , per cui è stata aggiunta una colonna per applicare una correzione e modificare il range di valori da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . Inoltre, Rhinoceros esporta le coordinate senza un punto di partenza preciso quindi è necessario fare in modo che i valori di angolo e raggio siano ordinati (in questo caso in maniera decrescente).

[illegible]

Avendo a disposizione l'angolo e il raggio, sappiamo che, per il profilo teorico, il valore del raggio oscillerà tra un valore massimo e un valore minimo. Usando questa informazione a nostro vantaggio, insieme al numero di punti per vano e il numero di denti (che sono tutti dati noti), è stato possibile realizzare una formula che permettesse di separare i vani e identificare ciascuno di questi con un numero (Figura 28). Il poter identificare ciascun vano è essenziale per calcolare i vari parametri in maniera automatica per ciascuno di questi vani.

X7    :    ✕    ✓    f <sub>x</sub> =SE(U7=\$U\$2; X6+1; X6)					
	T	U	V	W	X
1	Numero denti	87			
2	Raggio Massimo	110,00001			
3	Numero punti per dente	99			
4	INPUT DATA 3				
5	Angolo Teorico	Raggio Teorico	Angolo Reale	Raggio Reale	N° Vano
6	Angolo Teorico	Raggio Teorico	Angolo Reale	Raggio Reale	0
7	360,00000	110,00001	360,00000	109,82160	1
8	359,95820	109,99802	359,95820	109,81901	1
9	359,91641	109,99214	359,91641	109,81414	1
10	359,87461	109,98216	359,87461	109,80893	1
11	359,83281	109,96798	359,83281	109,79954	1
12	359,79101	109,94940	359,79101	109,77943	1
13	359,74922	109,92598	359,74922	109,75229	1
14	359,70742	109,89734	359,70742	109,72127	1
15	359,66562	109,86251	359,66562	109,68367	1
16	359,62382	109,82025	359,62382	109,63514	1
17	359,58203	109,76807	359,58203	109,57391	1
18	359,54023	109,69919	359,54023	109,48560	1

(Figura 28) In alto a sinistra un riquadro dove sono evidenziati i dati principali per identificare e numerare i vani.

Il numero di denti è un valore che viene inserito manualmente dall'operatore, mentre il raggio massimo e il numero di punti per dente sono valori automaticamente riempiti dal sistema.

Notiamo come l'angolo, sia per il profilo teorico che reale, punto per punto abbia lo stesso valore.

Questo è dovuto al campionamento fatto in precedenza. Lo stesso array viene usato per entrambi i profili.

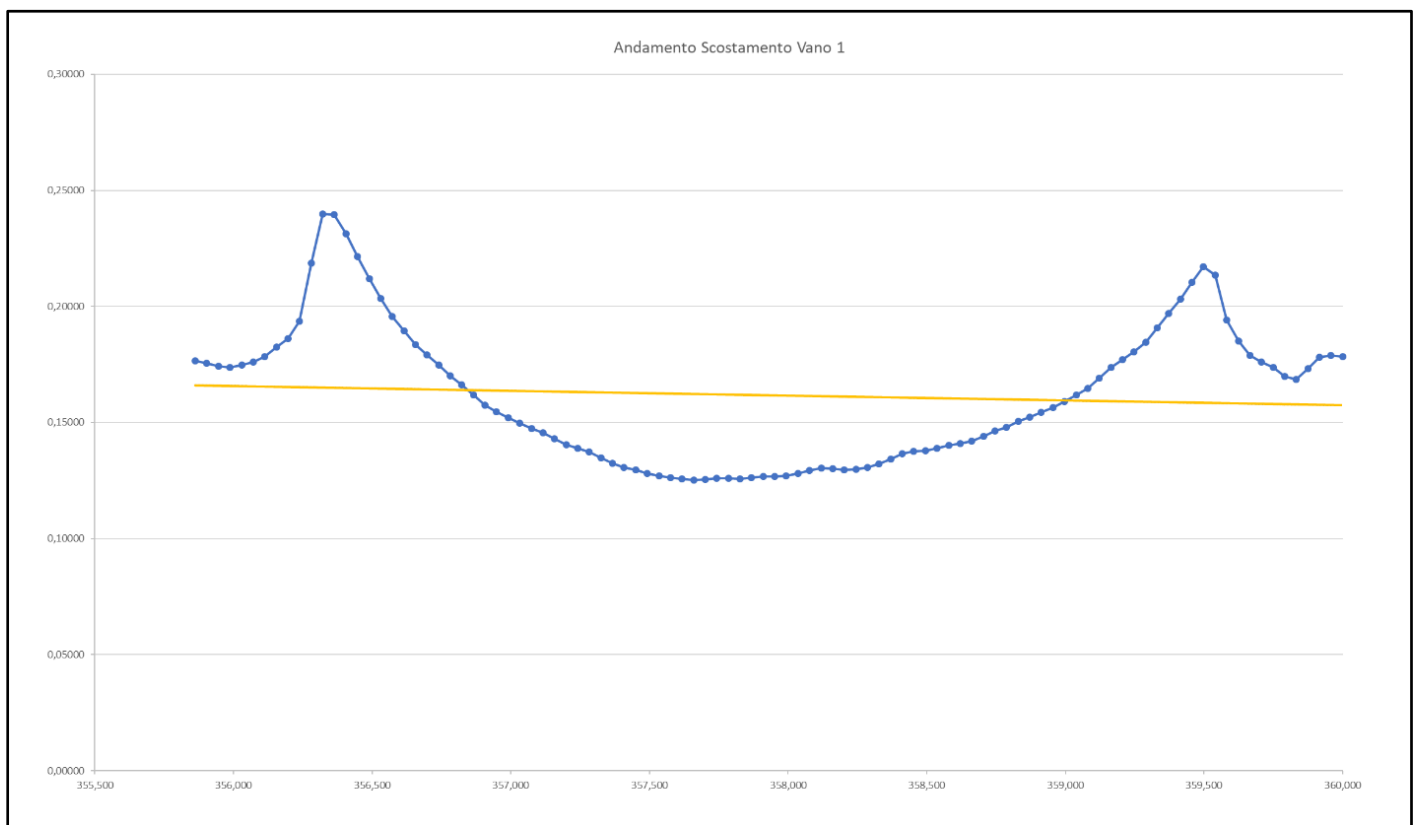
#### 4.1 Parametri di Profile Deviation

In questo capitolo vedremo nel dettaglio come vengono calcolati i parametri di deviazione di profilo. Si parte calcolando lo scostamento che viene calcolato come differenza tra il raggio teorico e il raggio reale. Lo scostamento non è un parametro in sé per sé. Per costruzione il profilo reale della camma risulta essere più piccolo del profilo teorico e lo scostamento altro non è che la visualizzazione numerica di tale differenza. Considerato l'andamento dello scostamento per ciascun vano, possiamo calcolare il modulo e l'intercetta della retta interpolante, in più anche la distanza tra la curva dello scostamento e la retta interpolante (Figura 29).

	X	Y	Z	AA	AB
3					
4					
	N° Vano	Scostamento	Modulo	Intercetta	Distanza curva scostamento da retta interpolante
5					
6	0				
7	1	0,17841	-0,00207	0,9035	0,0210
8	1	0,17901			0,0215
9	1	0,17800			0,0204
10	1	0,17323			0,0155
11	1	0,16844			0,0107
12	1	0,16997			0,0121
13	1	0,17369			0,0157
14	1	0,17607			0,0180

(Figura 29) Modulo e intercetta della retta interpolante l'andamento dello scostamento per il primo vano.

Dei valori della distanza tra la curva di scostamento e la retta interpolante, avremo un massimo e un minimo. Con questi ci si ricava l'angolo corrispondente. Essendo passati alle coordinate polari, possiamo infatti visualizzare l'andamento dello scostamento in funzione dell'angolo (Figura 30).



(Figura 30) In blu l'andamento dello scostamento, in giallo la retta interpolante. Lungo l'asse orizzontale abbiamo i valori dell'angolo, sulla verticale lo scostamento tra profilo reale e teorico.

Dati quindi il valore massimo e minimo della differenza tra le due curve appena mostrate, e il valore dei rispettivi angoli associati, abbiamo gli elementi per calcolare il parametro di Profile Form Deviation ( $Ff_{\alpha}$ ). Questo viene calcolato come differenza tra il valore dello scostamento che si ha in corrispondenza dell'angolo per il quale la differenza (tra lo scostamento e la retta interpolante) è massima con il valore dello scostamento che si ha in corrispondenza dell'angolo per il quale la differenza è minima (Figura 31).

MATR.TR... : X ✓ f <sub>α</sub> =SE(X7<>X6;CERCA.VERT(AG7;V;Y;4;FALSO)-CERCA.VERT(AH7;V;Y;4;FALSO);"")														
	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
1														
2														
3														
4	A 3				PROFILE DEVIAT									
5	Angolo Reale	Raggio Reale	N° Vano	Scostamento	Modulo	Intercetta	Distanza curva scostamento da retta interpolante	Angolo Reale	Distanza Max	Distanza Min	Distanza Max - Min	Angolo della distanza massima	Angolo della distanza minima	Profile form deviation - Ffa
6	Angolo Reale	Raggio Reale	0											
7	360,00000	109,82160	1	0,17841	-0,00207	0,9035	0,0210	360,0000	0,0748	-0,0370	0,11177072	356,3218	357,6594	=Y;4;FALSO);"")
8	359,95820	109,81901	1	0,17901			0,0215	359,9582						
9	359,91641	109,81414	1	0,17800			0,0204	359,9164						
10	359,87461	109,80893	1	0,17323			0,0155	359,8746						
11	359,83281	109,79954	1	0,16844			0,0107	359,8328						
12	359,79101	109,77943	1	0,16997			0,0121	359,7910						
13	359,74922	109,75229	1	0,17369			0,0157	359,7492						
14	359,70742	109,72127	1	0,17607			0,0180	359,7074						
15	359,66562	109,68367	1	0,17884			0,0207	359,6656						
16	359,62382	109,63514	1	0,18511			0,0269	359,6238						
17	359,58203	109,57391	1	0,19416			0,0359	359,5820						
18	359,54023	109,48560	1	0,21359			0,0552	359,5402						

(Figura 31) Formula per il calcolo del parametro Profile Form Deviation.

La condizione iniziale di "SE(...)" permette di calcolare il parametro al variare del numero del vano.

Il secondo parametro, il Total Profile Deviation ( $F_{\alpha}$ ) viene invece calcolato facendo la differenza tra il massimo valore di scostamento con il minimo valore di scostamento lungo un vano (Figura 32).

MATR.TR... X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK AL AM AN																
=SE.ERRORE(SE(X7<>X6;MAX(SCARTO Y7;0;0;\$US3+1;1 )-MIN(SCARTO Y7;0;0;\$US3+1;1 );"" );0)																
PROFILE DEVIATION																
N° Vano	Scostamento	Modulo	Intercetta	Distanza curva scostamento da retta interpolante	Angolo Reale	Distanza Max	Distanza Min	Distanza Max - Min	Angolo della distanza massima	Angolo della distanza minima	Profile form deviation - Ffa	Scostamento massimo	Scostamento minimo	Angolo dello scostamento massimo	Angolo dello scostamento minimo	Total profile deviation - Ffa
0																
1	0,17841	-0,00207	0,9035	0,0210	360,0000	0,0748	-0,0370	0,11177072	356,3218	357,6594	0,11454	0,2398	0,1253	356,3218	357,6594	=\$US3+1;1);"" );0)
2	0,17901			0,0215	359,9582											
3	0,17800			0,0204	359,9164											
4	0,17323			0,0155	359,8746											
5	0,16844			0,0107	359,8328											
6	0,16997			0,0121	359,7910											
7	0,17369			0,0157	359,7492											
8	0,17607			0,0180	359,7074											
9	0,17884			0,0207	359,6656											
10	0,18511			0,0269	359,6238											
11	0,19416			0,0359	359,5820											
12	0,21359			0,0552	359,5402											
13	0,21719			0,0587	359,4984											
14	0,21039			0,0518	359,4566											
15	0,20320			0,0445	359,4148											
16	0,19707			0,0383	359,3730											
17	0,19075			0,0319	359,3312											
18	0,18458			0,0257	359,2895											
19	0,18046			0,0215	359,2477											
20	0,17713			0,0180	359,2059											
21	0,17361			0,0144	359,1641											
22	0,16907			0,0098	359,1223											
23	0,16479			0,0054	359,0805											

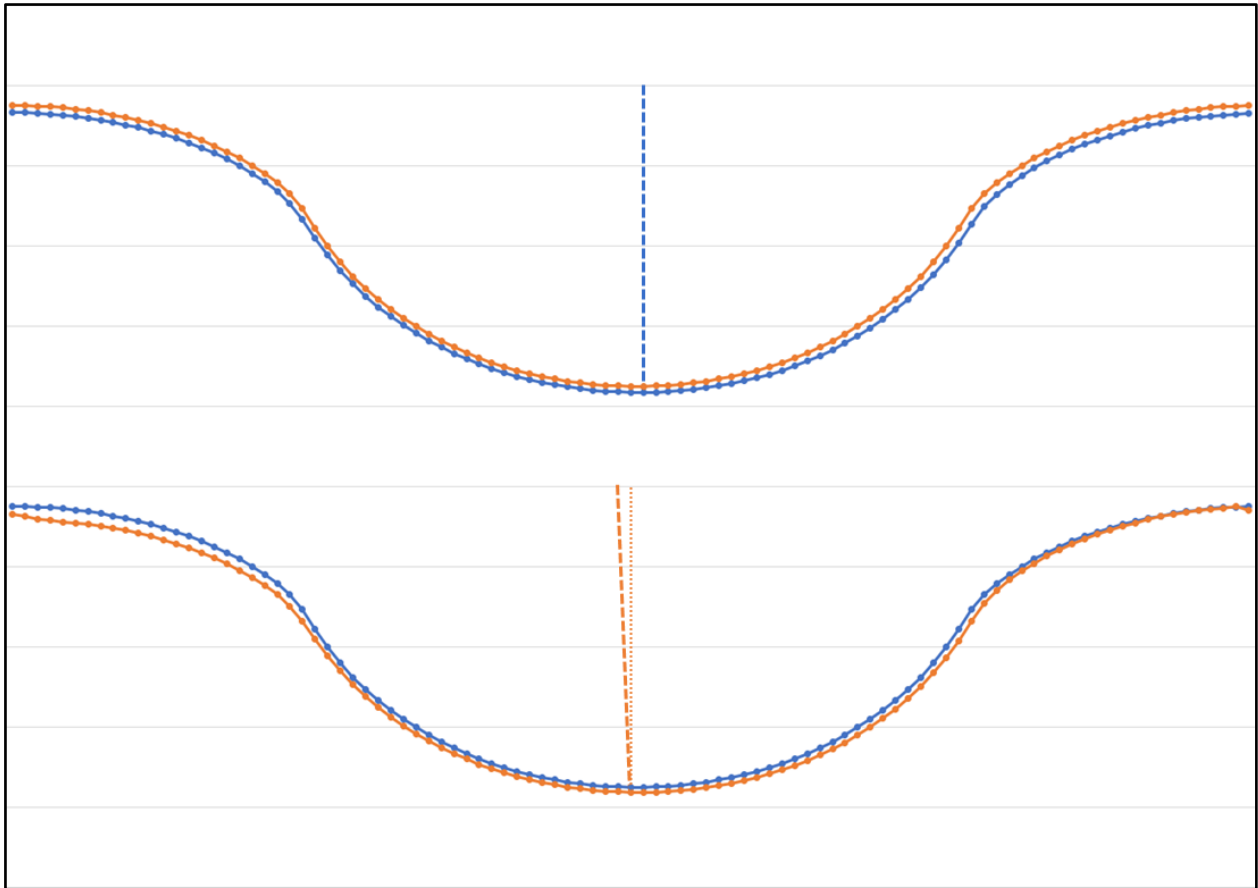
(Figura 32) Formula per il calcolo del Total Profile Deviation.

L'ultimo parametro della categoria inerente le deviazioni di profilo è il Profile Slope Deviation ( $Fh_{\alpha}$ ). Questo viene calcolato come differenza di quote tra il primo e l'ultimo punto della retta interpolante (dalla Figura 30).

## 4.2 Inclinazione dell'asse del vano

L'angolo di inclinazione del vano è un ottimo indicatore che notifica l'operatore di una mola montata fuori asse, inclinata o una camma montata in macchina fuori la tolleranza di planarità. Il calcolo di tale parametro viene effettuato considerando i punti di ciascun vano (angolo e raggio di ciascuno) ed estraendo da questi la retta interpolante. Con il modulo di tale retta interpolante possiamo poi calcolare l'angolo di inclinazione rispetto all'ipotetico asse verticale (Figura 33).





(Figura 33) In alto, profilo teorico e reale di una camma realizzata senza errori e la relativa retta interpolante.

In basso, una camma realizzata con una mola fuori asse e conseguentemente caratterizzata da un profilo reale che risulta inclinato, come evidenziato anche dalla retta interpolante. L'angolo di inclinazione ci comunica in maniera numerica e rapida la presenza di tale errore sul profilo.

### 4.3 Asimmetria del Vano

Dalla Figura 30 si è potuto notare come, per ciascun vano, il tratto iniziale e quello finale presentano un andamento dello scostamento molto diverso tra loro. Il parametro di asimmetria viene pertanto calcolato sul primo e ultimo 10% del vano, in quanto sono questi i punti più significativi per quanto concerne la forma del profilo. Eventuali difetti infatti si concentrano nella zona vicina al dente e molto raramente, se non quasi mai, nella zona a valle del vano. Un vano è costituito da 100 punti, in accordo con il campionamento (estremi inclusi). Per ciascuno di questi è possibile calcolare lo scostamento rispetto al profilo teorico facendo la differenza tra il valore del raggio. Se il vano del profilo reale è perfettamente simmetrico avremo che lo scostamento del primo punto con il profilo teorico sarà uguale allo scostamento dell'ultimo punto con il profilo teorico; lo scostamento del secondo punto sarà uguale allo scostamento del penultimo punto e così via. La differenza dello scostamento del primo punto con l'ultimo, del secondo con il penultimo, etc. sarà 0 nel caso di un profilo perfettamente simmetrico. In caso contrario però avremo valori diversi da quello nullo. Questa differenza dello scostamento si può tradurre direttamente in asimmetria. I valori della differenza tra i punti presi in considerazione sono espressi in valore assoluto e in valore percentuale (Figura 34). Esprimerli

in forma percentuale aiuta in maniera maggiore a visualizzare l'impatto che pochi millesimi di millimetro hanno sulla forma del vano.

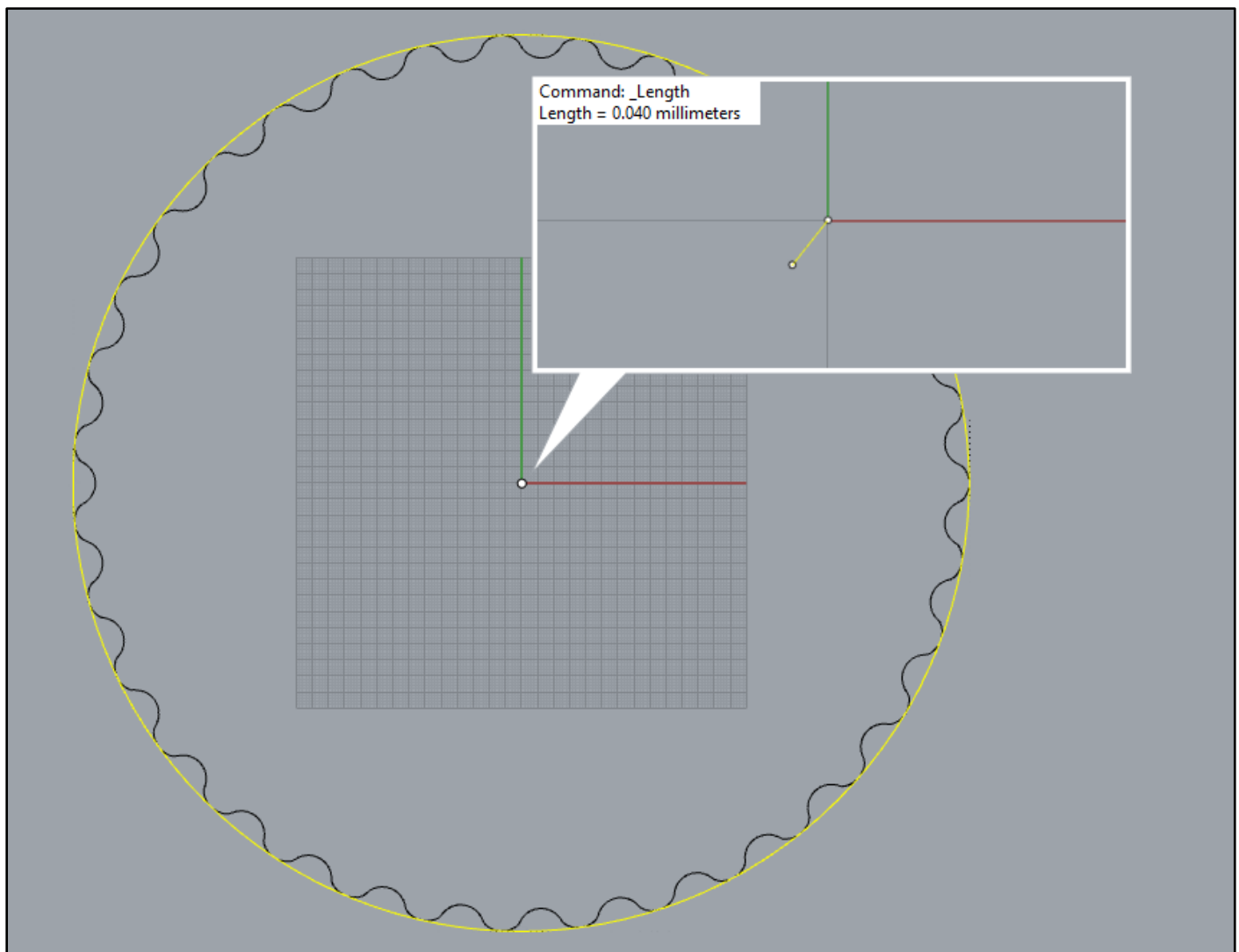
AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB
ASIMMETRIA VANO							
N° Punto Vano	Scostamento	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente VALORE ASSOLUTO	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente VALORE MASSIMO (mm)	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente MEDIA	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente PERCENTUALE	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente MASSIMO (%)
1	0,17841	0,00172	0,00172	0,008397967	0,004879388	35,22%	172%
2	0,17901	0,00340	0,00340			69,76%	
3	0,17800	0,00371	0,00371			75,94%	
4	0,17323	-0,00057	0,00057			11,61%	
5	0,16844	-0,00623	0,00623			127,68%	
6	0,16997	-0,00615	0,00615			126,05%	
7	0,17369	-0,00478	0,00478			98,06%	
8	0,17607	-0,00656	0,00656			134,50%	
9	0,17884	-0,00727	0,00727			149,07%	
10	0,18511	-0,00840	0,00840			172,11%	
11	0,19416						
12	0,21359						
13	0,21719						
14	0,21039						
15	0,20320						
16	0,19707						

(Figura 34) Colonne relative al calcolo del parametro di asimmetria per i primi e ultimi dieci punti del primo vano di una camma.

Tra tutti i parametri illustrati nei paragrafi precedenti, quello dell'asimmetria del vano (assieme anche a quello di inclinazione dell'asse del vano) è di significativa importanza. Questo infatti è un parametro del tutto nuovo non presente sulle normative e soprattutto, è un parametro che non necessita di alcuna altra conversione o interpretazione. Se considerati i valori di asimmetria di un singolo vano, questi ci restituiscono, tramite i numeri, una descrizione diretta e tangibile della forma del vano che è stato lavorato in precedenza dalla mola. Se invece si osservano assieme i valori massimi per tutti i vani è possibile accorgersi di particolari tendenze che indicherebbero a una mola o un pezzo mal posizionato.

#### 4.4 Runout

Rispetto alla definizione canonica di runout data nel paragrafo 2.1.3, che nel nostro caso prevede che il raggio minimo e massimo su tutta la camma rientrino in un intervallo di tolleranza dato, si è considerata invece la distanza tra in centro del profilo reale e l'origine degli assi, il quale, come prima, deve rientrare nell'intervallo di tolleranza specificato. In questo modo questo può essere misurato direttamente in Rhinoceros, nella fase di centraggio del profilo reale (Figura 35).

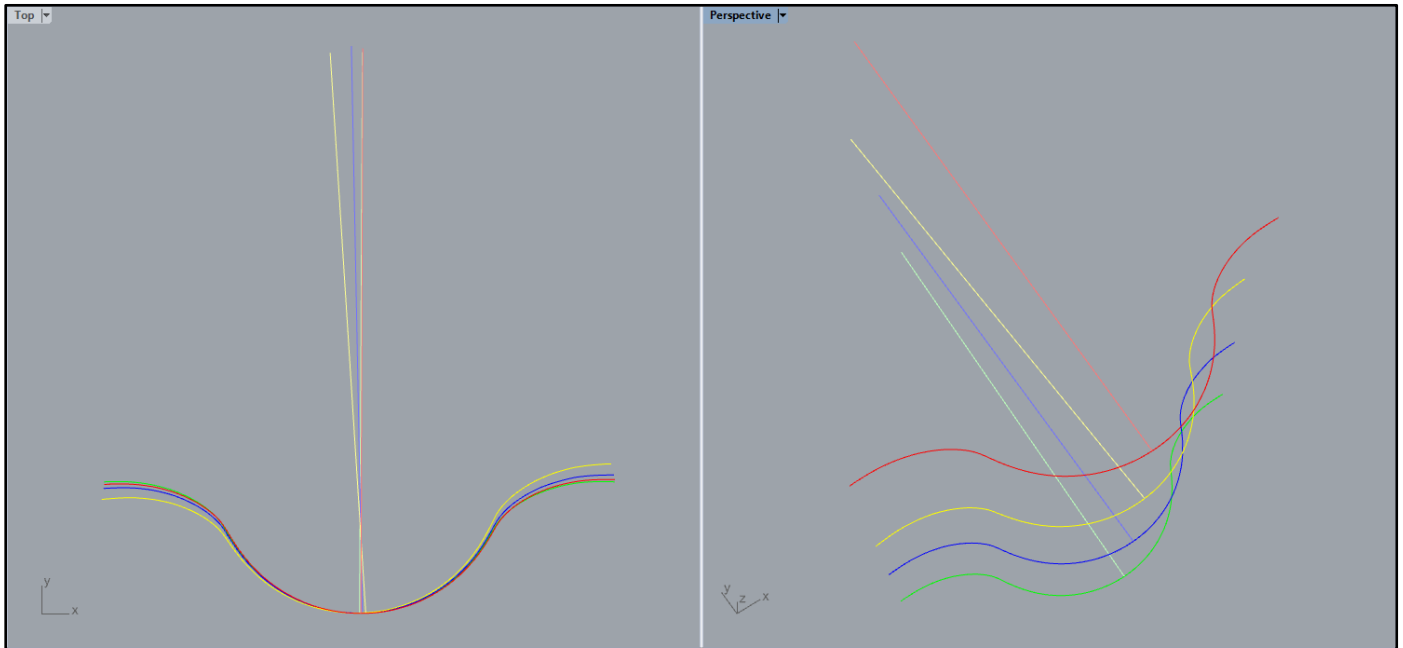


(Figura 35) Costruita la circonferenza con il metodo descritto nel paragrafo 3.1.1 ed estratto il suo centro, che con errore trascurabile è anche il centro del profilo reale, possiamo misurare con il comando “Length” la distanza dall’origine degli assi al centro di questa circonferenza creata.

#### 4.5 Analisi multilivello ed errore sull’angolo di elica

Come visto nel paragrafo 2.2, il profilo della camma viene scansionato più volte su altezze diverse e di conseguenza, il calcolo dei parametri visti fino ad ora può essere ripetuto su ciascuno di questi profili, permettendo di analizzare la variazione di questi mentre ci si sposta lungo l’asse della camma. In particolare, prendendo in esame le variazioni dell’angolo dell’asse del vano è possibile verificare che il vano sia stato scavato dalla mola in maniera corretta lungo tutta la sua altezza. Se infatti, passando da un livello all’altro, l’angolo dell’asse del vano subisce variazioni notevoli (Figure 36A e 36B) questo indicherebbe una possibile presenza di vibrazioni indesiderate. Un altro metodo per verificare che la camma non presenti variazioni significative è analizzare la differenza del raggio di ciascun punto tra un livello e l’altro. Ogni livello viene con lo stesso array, quindi prendendo ad esempio il primo punto di ciascun livello, questo avrà lo stesso angolo (per via di come è stato effettuato il campionamento, paragrafo 3.2.1) ma raggio diverso.

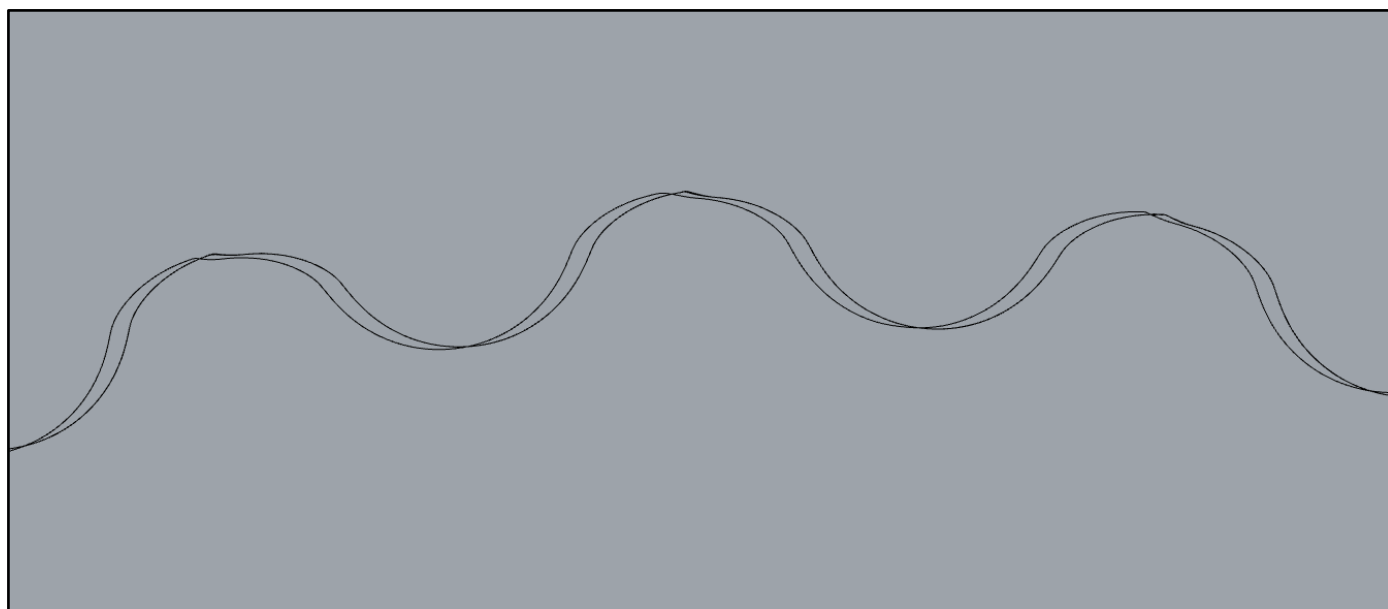
Nella figura 37 vengono mostrati i quattro livelli scansionati di una camma e tra questi, il primo livello (quello più in alto) è stato ruotato leggermente per simulare un errore di elica concentrato tra il primo e il secondo livello. Questa differenza si può vedere facendo la differenza dei raggi dei punti del primo livello con i raggi dei punti del secondo (Figura 38), differenza che è quasi nulla tra i raggi dei punti del secondo e terzo livello o tra i punti del terzo e quarto livello.



(Figura 36A) Rappresentazione di un vano su più livelli. Ciascuno è stato ruotato per simulare un errore di inclinazione del vano.

A	B	C	D	E	F	G	H
N° Vano	Inclinazione Asse Vano Livello 1	Inclinazione Asse Vano Livello 2	Inclinazione Asse Vano Livello 3	Inclinazione Asse Vano Livello 4	Livello 1 - Livello 2	Livello 2 - Livello 3	Livello 3 - Livello 4
1	-0,021446687	0,145964447	0,145929252	0,145757348	-0,16741113	0,00003520	0,00017190
2	-0,02164559	0,145802522	0,14564116	0,145615824	-0,16744811	0,00016136	0,00002534
3	-0,021733393	0,145251142	0,145422324	0,145312448	-0,16698453	-0,00017118	0,00010988
4	-0,02217732	0,145514304	0,145173489	0,145197978	-0,16769162	0,00034082	-0,00002449
5	-0,022008389	0,145535275	0,145185033	0,144957726	-0,16754366	0,00035024	0,00022731
6	-0,022958054	0,144644613	0,144936675	0,144678755	-0,16760267	-0,00029206	0,00025792
7	-0,022777922	0,144449042	0,144382151	0,144309205	-0,16722696	0,00006689	0,00007295
8	-0,022818436	0,143755548	0,144258253	0,143877994	-0,16657398	-0,00050270	0,00038026
9	-0,024154055	0,143268181	0,143147129	0,143329509	-0,16742224	0,00012105	-0,00018238
10	-0,024216897	0,142806354	0,14285405	0,142817737	-0,16702325	0,00032095	-0,00033233
11	-0,024258886	0,14257421	0,142867619	0,14263818	-0,16683310	-0,00029341	0,00022944
12	-0,024905173	0,142218882	0,142165234	0,142506263	-0,16712406	0,00005365	-0,00034103
13	-0,025207919	0,141981623	0,141948859	0,141826116	-0,16718954	0,00003276	0,00012274
14	-0,02521095	0,141760469	0,14183585	0,141763763	-0,16697142	-0,00007538	0,00007209
15	-0,025276173	0,14188617	0,141766571	0,141902082	-0,16716234	0,00011960	-0,00013551
16	-0,025733597	0,141315738	0,141318985	0,141452023	-0,16704934	-0,00000325	-0,00013304
17	-0,025288935	0,141401382	0,141572762	0,141441234	-0,16669032	-0,00017138	0,00013153
18	-0,026021181	0,141365919	0,141182652	0,141314207	-0,16738710	0,00018327	-0,00013155
19	-0,024739938	0,141182501	0,141260217	0,141054887	-0,16592244	-0,00007772	0,00020533
20	-0,025442509	0,141704644	0,14149307	0,141284529	-0,16714715	0,00021157	0,00020854
21	-0,025426845	0,141704083	0,141731751	0,14159842	-0,16713093	-0,00002767	0,00013333
22	-0,024604827	0,142168062	0,142552323	0,142190234	-0,16677289	-0,00038426	0,00036209
23	-0,024584434	0,142691115	0,142498696	0,142887988	-0,16727555	0,00019242	-0,00038929
24	-0,024178291	0,143078228	0,143094623	0,143218882	-0,16725652	-0,00001639	-0,00012426
25	-0,023673389	0,143701761	0,143572389	0,143285212	-0,16737515	0,00012937	0,00028718
26	-0,022907783	0,143759546	0,143842291	0,143876707	-0,16666733	-0,00008274	-0,00003442
27	-0,022932243	0,144295318	0,14455699	0,143579472	-0,16722756	-0,00026167	0,00097752
28	-0,022229551	0,144807907	0,145217753	0,144907701	-0,16703746	-0,00040985	0,00031005
29	-0,022178331	0,145441515	0,145271893	0,145077037	-0,16761985	0,00016962	0,00019486
30	-0,021818635	0,145750864	0,145777645	0,145565286	-0,16756950	-0,00002678	0,00021236
31	-0,021324188	0,146223109	0,145921464	0,145901764	-0,16754730	0,00030164	0,00001970
32	-0,021366693	0,146559973	0,146131274	0,146198895	-0,16792667	0,00042870	-0,00006762
33	-0,0208076	0,146141005	0,146801356	0,146393781	-0,16694860	-0,00066035	0,00040758
34	-0,021198406	0,146473976	0,146483947	0,146324971	-0,16767238	-0,00000997	0,00015898
35	0	0	0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000

(Figura 36B) Differenza di inclinazione dell'asse del vano tra un livello e l'altro.



(Figura 37) Vista dall'alto di quattro livelli di profilo reale. Il primo risulta sfasato rispetto agli altri.

I	J	K	L	M	N	O	P
Angolo del Campionamento	Raggio Punti Livello 1	Raggio Punti Livello 2	Raggio Punti Livello 3	Raggio Punti Livello 4	Livello 1 - Livello 2 (Raggio)	Livello 2 - Livello 3 (Raggio)	Livello 3 - Livello 4 (Raggio)
360,0000	139,3187374	139,4262507	139,423782	139,4292712	-0,1075133	0,002468674	-0,005489157
359,8961	139,2453346	139,458173	139,4593741	139,4608699	-0,212838414	-0,001201139	-0,001495761
359,7922	139,1906133	139,4938342	139,4930617	139,4867814	-0,303220933	0,00077256	0,006280327
359,6883	139,1510559	139,4182702	139,4177435	139,4230238	-0,267214282	0,000526606	-0,005280251
359,5844	139,1205291	139,3296033	139,3289694	139,3326803	-0,209074236	0,000633887	-0,003710898
359,4805	139,090946	139,2540208	139,2535674	139,2562744	-0,163074745	0,000453357	-0,002707023
359,3766	139,0536112	139,1965347	139,1963751	139,1987871	-0,142923506	0,000159636	-0,002412015
359,2727	139,0097306	139,1547284	139,1546796	139,1574609	-0,14499782	4,87554E-05	-0,002781251
359,1688	138,9590518	139,1225462	139,1224063	139,1258628	-0,163494445	0,000139868	-0,003456424
359,0649	138,9001563	139,0930453	139,0927308	139,0969222	-0,192889049	0,000314581	-0,004191459
358,9610	138,832032	139,0573778	139,0569266	139,0612016	-0,225345775	0,000451211	-0,004275063
358,8571	138,7545835	139,0142126	139,0140344	139,0180046	-0,259629081	0,000178222	-0,003970196
358,7533	138,6687276	138,9643209	138,9645247	138,9681361	-0,295593305	-0,000203743	-0,003611404
358,6494	138,5731528	138,9070436	138,9069767	138,9106845	-0,333890824	6,69173E-05	-0,003707775
358,5455	138,4657099	138,8411329	138,8401471	138,8444089	-0,375423041	0,00098584	-0,004261866
358,4416	138,3464237	138,7651765	138,764034	138,7680867	-0,418752713	0,001142502	-0,00405269
358,3377	138,2164558	138,6804859	138,6802586	138,6833189	-0,464030039	0,000227237	-0,003060314
358,2338	138,0723718	138,5869067	138,5875975	138,5899909	-0,514534899	-0,000690782	-0,002393415
358,1299	137,9106929	138,4818404	138,4820854	138,4845611	-0,571147491	-0,000245007	-0,002475712
358,0260	137,7327064	138,3644948	138,3638588	138,3665403	-0,631788371	0,000636023	-0,00268151
357,9221	137,5293113	138,2358728	138,2352062	138,237928	-0,706561505	0,000666549	-0,002721758
357,8182	137,2959475	138,0940995	138,0938691	138,0966501	-0,798152014	0,000230467	-0,002781063

(Figura 38) La differenza di raggio tra i punti del primo livello e del secondo è nell'ordine del decimo. Questa informazione suona un campanello di allarme, infatti tra il primo profilo e il secondo è presente uno sfasamento significativo.

## 4.6 Riepilogo dati

Tutti i parametri, per ciascuno dei vani della camma, vengono riepilogati per poterne valutare l'andamento lungo il profilo della camma e per permettere, come già menzionato in precedenza, di studiare particolari andamenti o tendenze dei valori (Figura 39).

N° Dente	Single Pitch Deviation (Fianco Destro)	Single Pitch Deviation (Fianco Sinistro)	Scostamento	Distanza Max - Min
1	-0,00304	-0,00028	0,17841	0,111770722
2	0,00007	-0,00100	0,17669	0,10923612
3	0,00062	-0,00048	0,17440	0,110329841
4	-0,00037	0,00115	0,17260	0,110647117
5	0,00104	-0,00058	0,17331	0,109178304
6	-0,00079	-0,00032	0,17296	0,108152719
7	0,00134	-0,00050	0,17144	0,107391961
8	-0,00271	0,00074	0,17064	0,10739423
9	0,00258	-0,00080	0,17203	0,104459901
10	-0,00036	0,00022	0,17241	0,107000727
11	0,00056	-0,00043	0,17207	0,105121519
12	0,00015	0,00754	0,17174	0,104556462
13	-0,00043	-0,00851	0,17342	0,10575462
14	-0,00034	-0,00048	0,17368	0,103860558
15	0,00086	0,00113	0,17262	0,107886052
16	-0,00100	-0,00069	0,17231	0,10168385
17	0,00025	-0,00042	0,17503	0,10235202
18	0,00009	-0,00044	0,17468	0,102049224
19	0,00010	0,00104	0,17374	0,101553009
20	-0,00059	-0,00094	0,17335	0,103794874
21	-0,00029	-0,00026	0,17479	0,099735617
22	-0,00054	-0,00013	0,17559	0,101049484
23	0,00045	0,00126	0,17397	0,10137289
72	-0,00107	0,00092	0,19368	0,115306887
73	-0,00001	-0,00092	0,19582	0,118640765
74	0,00015	-0,00053	0,19957	0,119325051
75	-0,00281	0,00242	0,19478	0,114700773
76	0,00156	-0,00150	0,19734	0,116877566
77	-0,00120	-0,00076	0,19308	0,109736568
78	0,00094	0,00028	0,19066	0,118584632
79	-0,00120	0,00140	0,19221	0,12389883
80	-0,00035	-0,00117	0,18838	0,118469027
81	-0,00060	0,00048	0,18891	0,122509117
82	-0,00041	-0,00001	0,18767	0,117600007
83	0,00105	0,00008	0,18520	0,127668844
84	-0,00042	0,00032	0,18311	0,126061967
85	0,00111	-0,00061	0,17990	0,121457061
86	-0,00084	0,00034	0,17667	0,126393625
87	0,00519	0,00246	0,17839	0,115178296
MEDIA	0,00000	0,00000	0,18736	0,10885
MASSIMO	0,00519	0,00754	0,20932	0,21639
MINIMO	-0,00304	-0,00851	0,17064	0,09813

N° Dente	Profile form deviation - Ffa	Total profile deviation - Fα	Profile slope deviation - Fha	Inclinazione Asse Vano	Valore Massimo Differenza Scostamento Simmetrica	Percentuale Differenza Scostamento Simmetrica
1	0,11454275	0,11454275	-0,002511935	0,00207242	0,008397967	172,11%
2	0,114966363	0,116246138	-0,00535957	0,004421705	0,023029174	216,11%
3	0,115475062	0,115626345	-0,004812438	0,003970329	0,020102604	190,39%
4	0,116639946	0,116639946	-0,00457286	0,003772625	0,019057099	216,69%
5	0,114676569	0,114676569	-0,004555084	0,003757799	0,0204546	218,43%
6	0,112138629	0,11290282	-0,003611773	0,002979581	0,018024975	204,41%
7	0,110849619	0,111572777	-0,003234212	0,002668138	0,016757379	194,76%
8	0,111404864	0,111404864	-0,003322771	0,00274129	0,014825903	184,99%
9	0,107035407	0,107874036	-0,002575271	0,00212467	0,015382003	207,70%
10	0,109240443	0,109240443	-0,002164888	0,001786104	0,013598758	182,85%
11	0,107308389	0,107311057	-0,001981726	0,00163501	0,014518154	194,15%
12	0,106536904	0,106536904	-0,001435767	0,001184392	0,011233032	175,84%
13	0,107251764	0,107251764	-0,001205991	0,000994884	0,01006194	179,68%
14	0,104660578	0,104660578	-0,000773331	0,000637986	0,009898101	156,04%
15	0,107532345	0,107532345	0,000320551	-0,000264453	0,010915795	180,86%
16	0,102343484	0,102343484	-0,000478229	0,000394552	0,00963921	168,71%
17	0,102946	0,102946	-0,000574168	0,000473748	0,010376907	176,55%
18	0,101309646	0,101309646	0,000670258	-0,000552847	0,008199853	152,70%
19	0,10059953	0,10059953	0,000691284	-0,000570396	0,009161105	197,21%
20	0,103563003	0,103563003	0,000186786	-0,00015417	0,009058979	191,55%
21	0,098760621	0,098760775	0,000764201	-0,000630538	0,008040374	173,66%
22	0,099611734	0,099611734	0,001303016	-0,001074997	0,00872109	173,58%
23	0,099259564	0,099259564	0,00153222	-0,001263998	0,010162417	231,66%
72	0,122049759	0,122201689	-0,005430828	0,004480395	0,031986866	214,05%
73	0,123361552	0,123361552	-0,003699668	0,003052195	0,012142362	175,39%
74	0,115356996	0,118645599	-0,003110401	0,002566091	0,01671053	184,77%
75	0,122644985	0,122940858	-0,00622535	0,005135933	0,029721016	224,26%
76	0,123268291	0,123268291	-0,005147237	0,004246565	0,0392833	373,14%
77	0,113956514	0,114464637	-0,003947161	0,003256314	0,023981127	218,40%
78	0,12224463	0,12224463	-0,003423439	0,002824261	0,018782699	207,81%
79	0,130724728	0,131474008	-0,006184516	0,005102114	0,03642421	278,90%
80	0,122784985	0,122784985	-0,00347633	0,002867958	0,01272489	371,99%
81	0,127633988	0,127633988	-0,003715113	0,003065045	0,012270288	283,63%
82	0,124945457	0,124945457	-0,006085025	0,005020193	0,031328614	282,87%
83	0,132776451	0,132776451	-0,004002742	0,003302327	0,015907492	406,92%
84	0,132073797	0,132073797	-0,004469704	0,003687463	0,009377111	343,21%
85	0,126848036	0,126982814	-0,004008161	0,003306639	0,013193543	244,10%
86	0,052906487	0,118545709	-0,003599266	0,002969305	0,018432819	325,95%
87	0,115178296	0,115178296	0	0	0,019287178	237,47%
MEDIA	0,10938	0,11127	-0,00002	0,00002	0,01373	
MASSIMO	0,13278	0,13278	0,00633	0,00514	0,03928	
MINIMO	0,05291	0,09842	-0,00623	-0,00522	0,00559	

(Figura 39A, 39B) Riepilogo dei parametri per gli 87 vani della camma presa in esame.

In basso, il valore massimo, minimo e la media calcolata per ciascuna colonna.

Nella Figura 39 vengono ri-elencati, per facilitare la lettura complessiva, i parametri calcolati per ciascun dente/vano.

Nella prima colonna sono riepilogati i vani del profilo, numerati da 1 a n. La seconda e terza colonna è dedicata al Pitch Deviation, rispettivamente per il fianco destro e sinistro del profilo (paragrafo 3.1.2). La quarta colonna contiene il primo valore dello scostamento tra i due profili lungo un vano, nonostante questo da solo non sia un parametro. La quinta colonna contiene la differenza tra il valore massimo e minimo della distanza tra la curva dello scostamento e la sua retta interpolante (paragrafo 4.1, figura 30). Seguono nelle colonne successive i parametri principali del profilo (Profile Form Deviation, Total Profile Deviation e Profile Slope Deviation), il parametro di inclinazione del vano e il parametro di asimmetria (espresso in una colonna come valore numerico e nella successiva in valore percentuale). Nella figura 39, in basso, troviamo anche tre righe dove si elencano il valore massimo, minimo e medio.



## 5 Casi studio e risultati

### 5.1 Presentazione dei casi studio

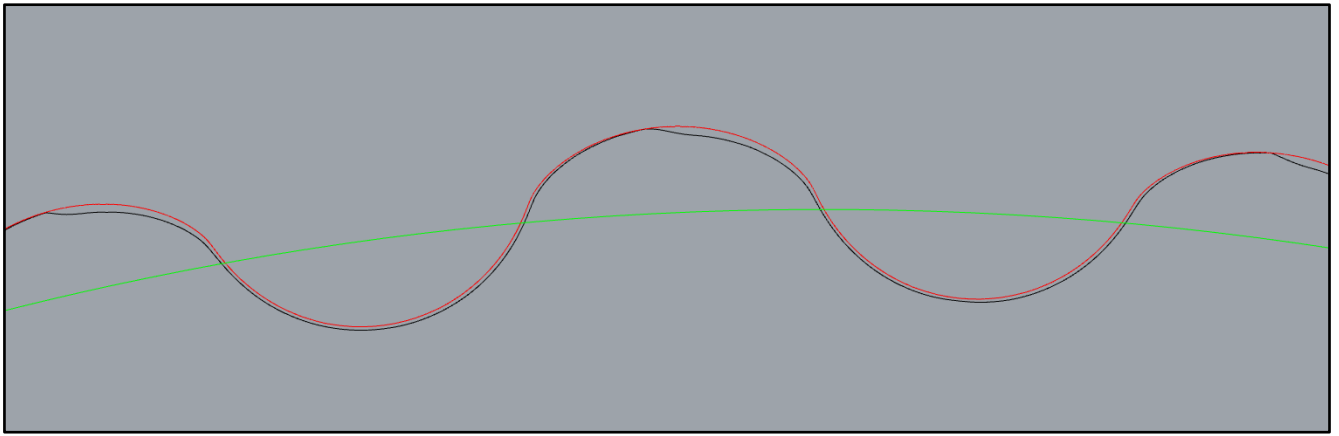
Con il fine di testare l'efficacia del metodo di analisi, la Omme Gears ha realizzato diverse camme, volutamente spostando la mola fuori asse per generare dei profili con errori. Prendiamo in considerazione due camme, la O1687 e la O1835. La prima camma (O1687) come il nome suggerisce ha un totale di 87 denti, raggio massimo di 110mm e minimo di 108mm con conseguente altezza di ciascun dente pari a 2mm. La seconda camma (O1835) ha un totale di 35 denti, raggio massimo e minimo rispettivamente pari a 139,5mm e 132,5mm con conseguente altezza di ciascun dente pari a 7mm.

	N° Denti	Diametro Minimo	Diametro Massimo	Altezza Dente
O1687	87	110mm	108mm	2mm
O1835	35	139,5mm	132,5mm	7mm

Della prima camma, la O1687 sono state realizzate tre varianti: una con mola in asse (+0mm), una con mola fuori asse di +0,5mm e una con mola fuori asse di +1mm. Per la seconda camma sono state realizzate due varianti: una con mola in asse e una con mola spostata di +2mm.



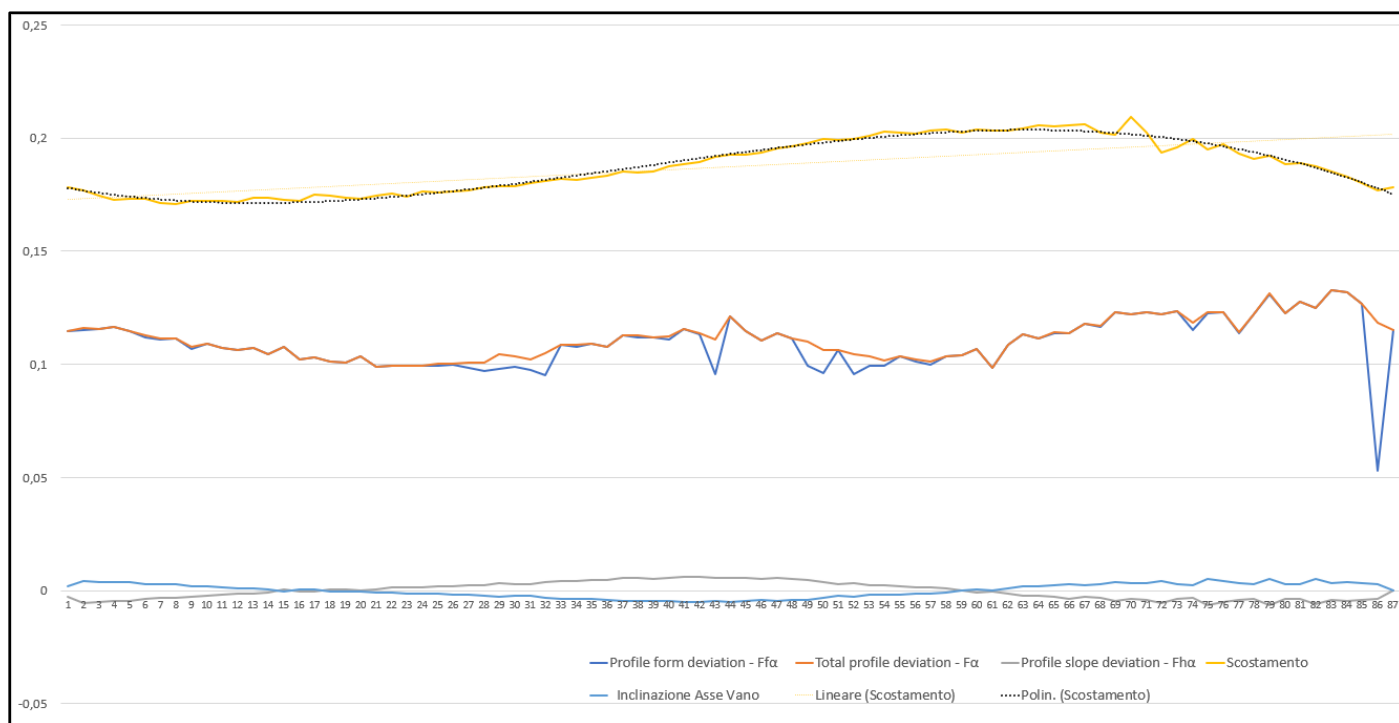
(Figura 40) Mola fuori asse di +0,5mm nella fase di realizzazione del simulacro.



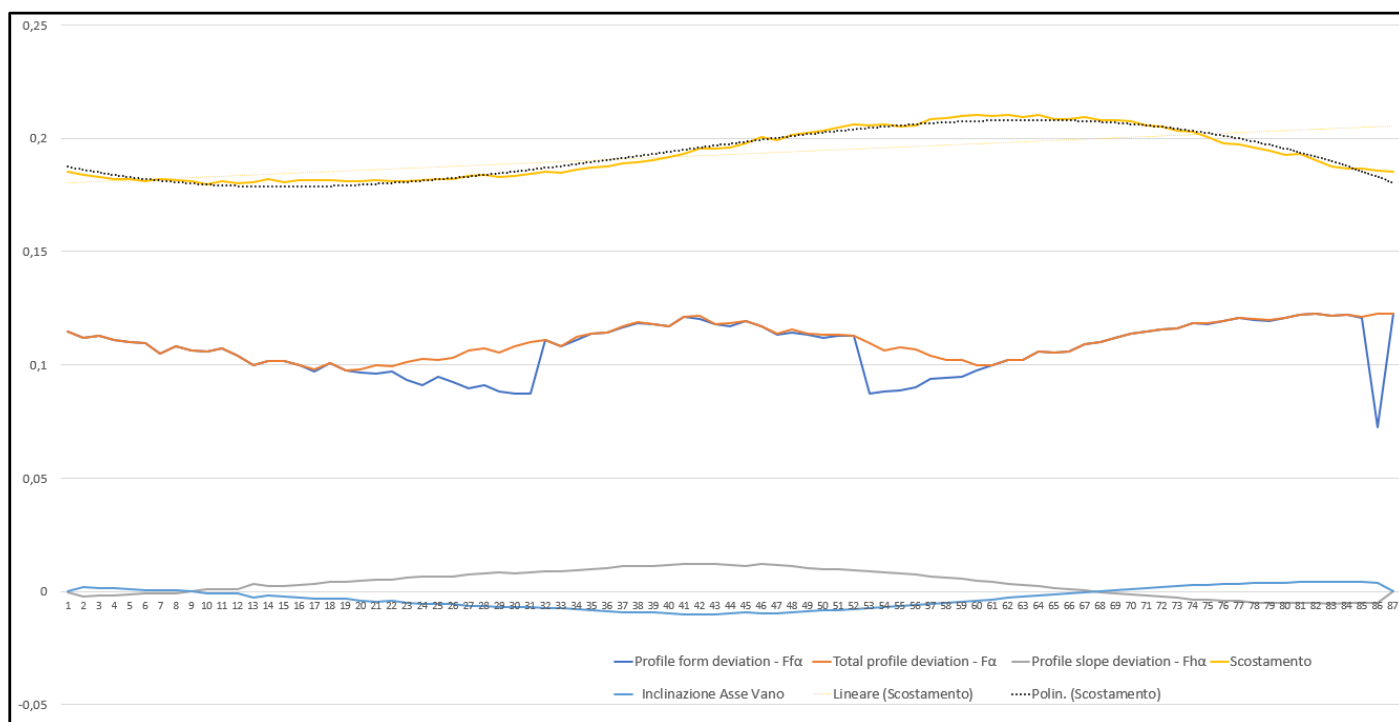
(Figura 41) In rosso, il profilo teorico (perfetto). In nero, il profilo della camma O1835 realizzato con mola fuori asse di +2mm.  
In questo specifico caso, con una mola così esageratamente spostata, si nota l'errore visibile a occhio su ciascun dente.

## 5.2 Grafici riepilogativi

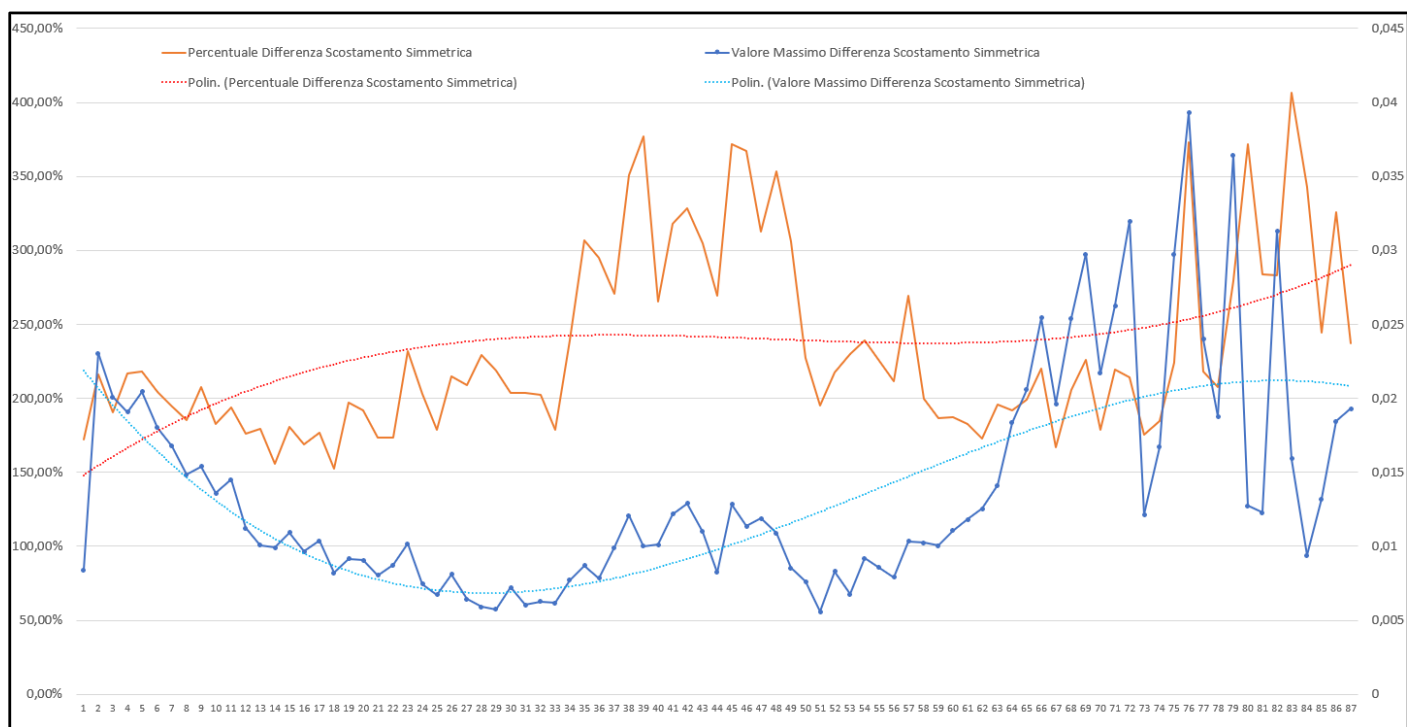
Di seguito sono riportati grafici che illustrano l'andamento dei parametri e come questi variano quando la mola viene spostata.



Andamento dei parametri di deviazione di profilo per la camma O1687 con mola spostata di +0mm. Nonostante la camma sia realizzata in modo da non presentare errori, si notano ciononostante delle fluttuazioni dei valori abbastanza significative. Lungo l'asse orizzontale viene riportato il n° del vano/dente. Per la curva dello scostamento sono inserite anche linee di tendenza (andamento lineare e polinomiale di grado 3).

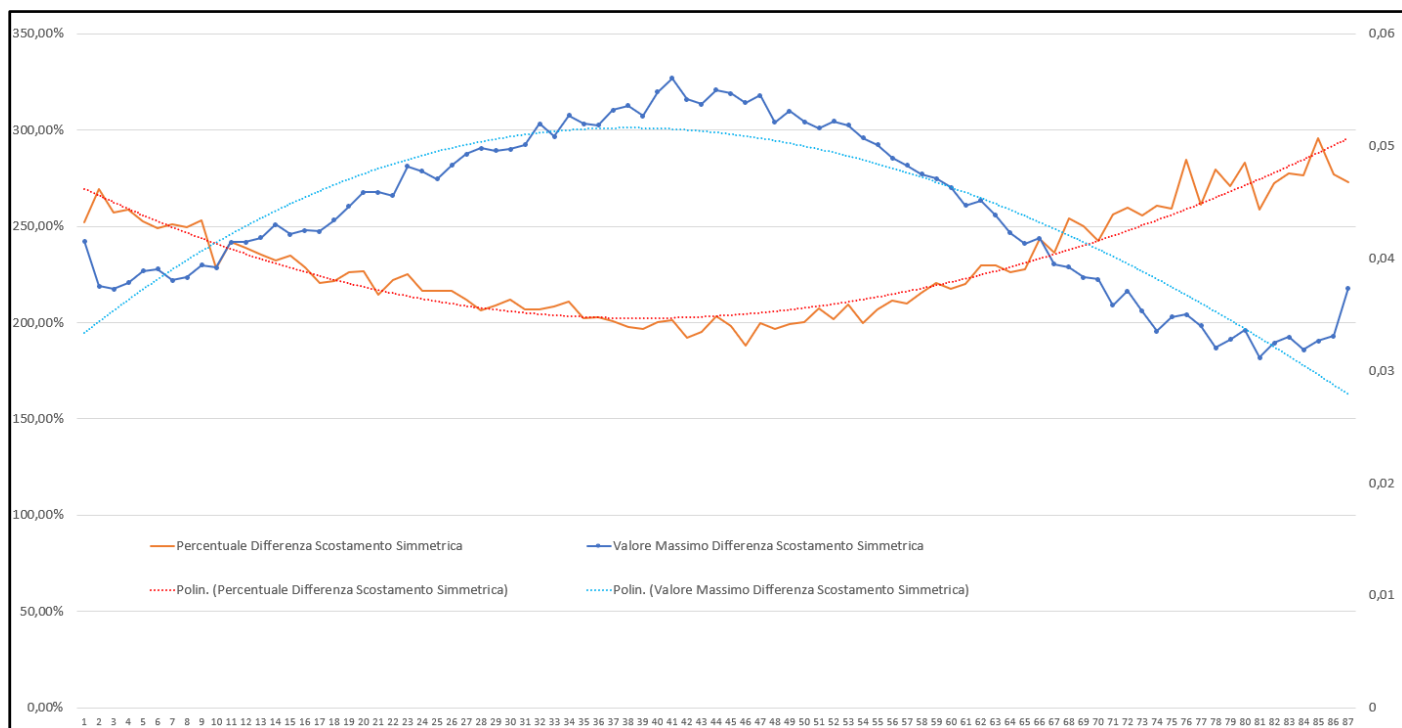


Andamento dei parametri di deviazione di profilo per la camma O1687 con mola spostata di +1mm. I valori dello scostamento subiscono un aumento generale che sposta in alto la sua curva (rappresentata in giallo). Per gli altri parametri le fluttuazioni precedentemente menzionate aumentano, presentando in alcune zone delle singolarità.



*Andamento del parametro di asimmetria per la camma O1687 con mola spostata di +0mm.*

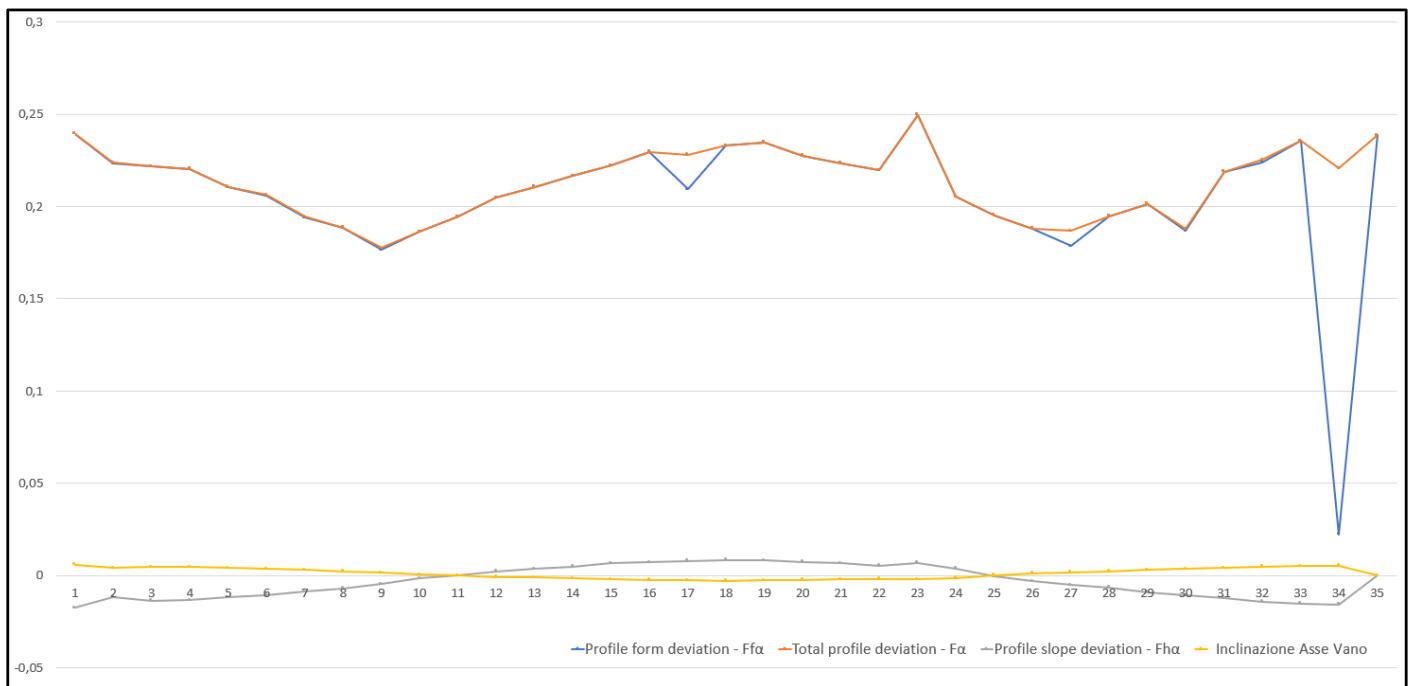
*Il valore minimo del parametro (in forma numerica) si attesta intorno ai 0,007mm. La curva arancione fa riferimento ai valori percentuali riportati sull'asse verticale a sinistra, mentre quella in blu fa riferimento ai valori riportati sull'asse verticale destro.*



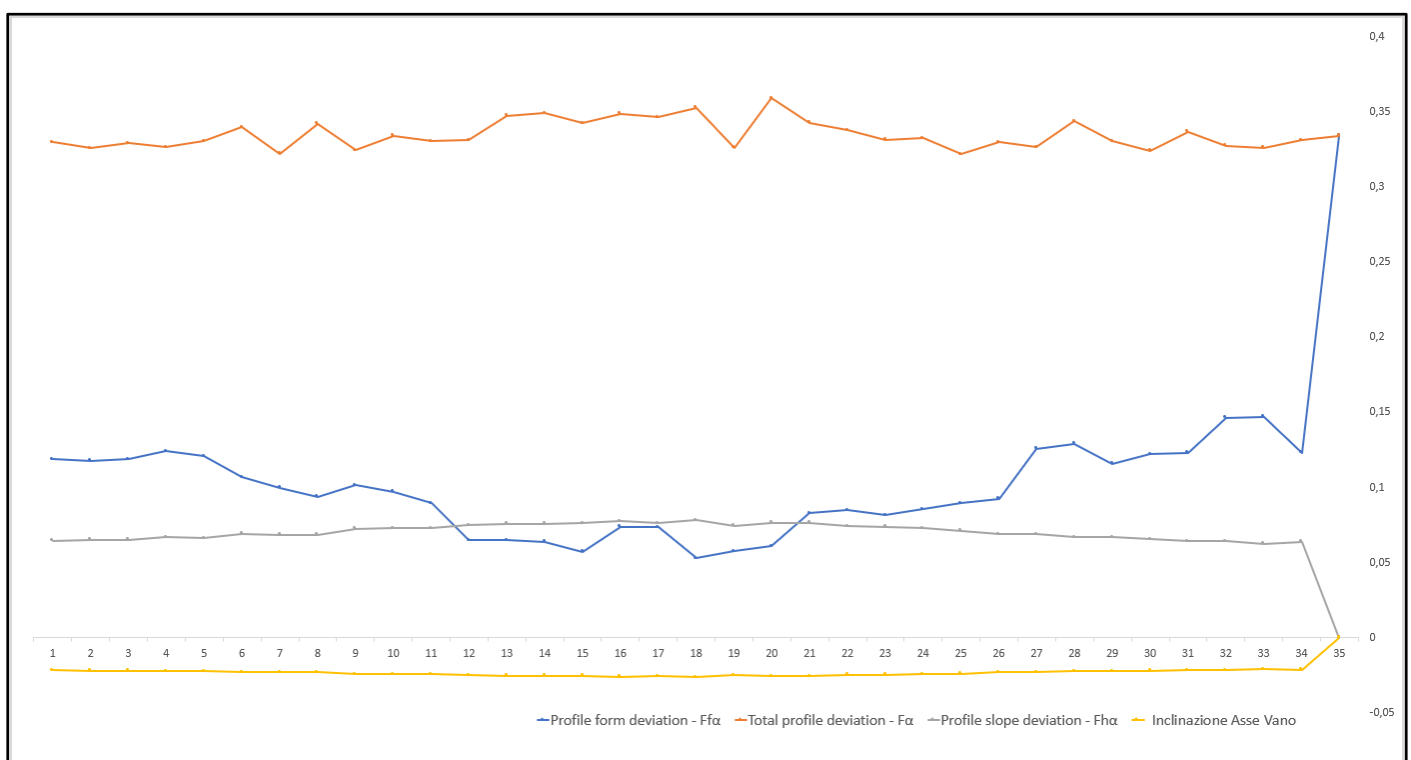
*Andamento del parametro di asimmetria per la camma O1687 con mola spostata di +1mm.*

*Il valore massimo (in forma numerica) si attesta intorno ai 0,05mm confermando l'aspetto teorico del parametro.*

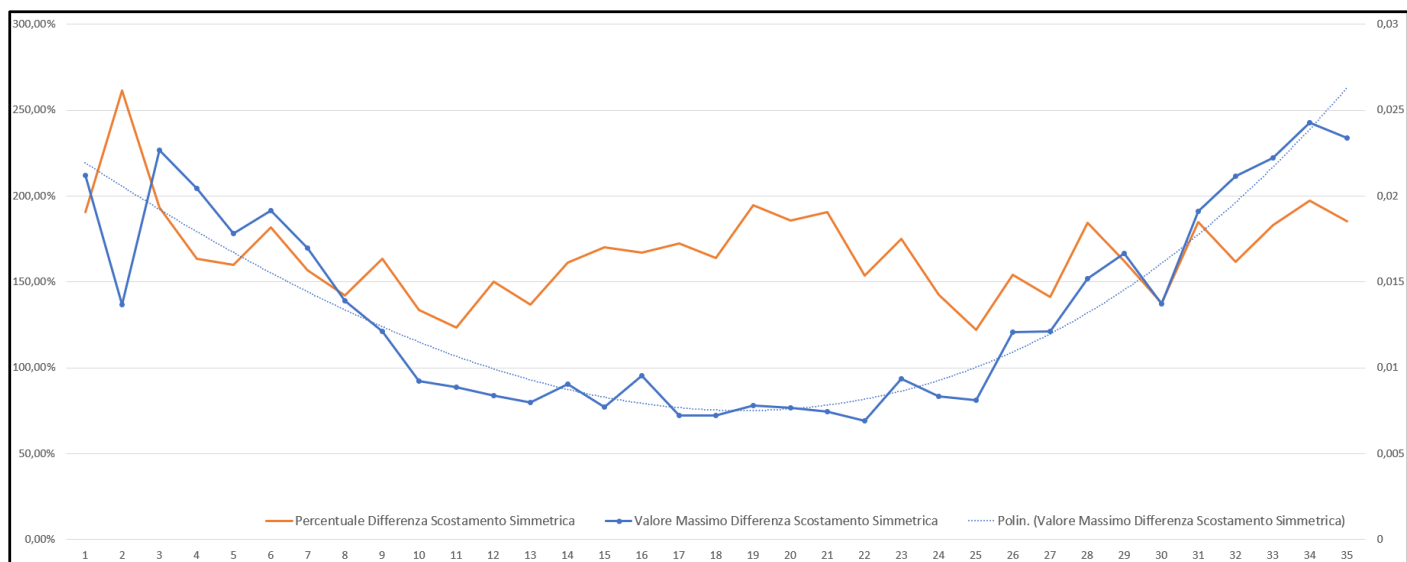
*L'asimmetria del dente aumenta di circa 7 volte rispetto al caso precedente con mola spostata di +0mm. La curva arancione fa riferimento ai valori percentuali riportati sull'asse verticale a sinistra, mentre quella in blu fa riferimento ai valori riportati sull'asse verticale destro.*



Andamento dei parametri di deviazione di profilo per la camma O1835 con mola spostata di +0mm. In giallo è rappresentata l'andamento dell'inclinazione dell'asse del vano che si attesta attorno allo zero. Essendo questo un grafico che fa riferimento a una camma realizzata con mola a scostamento +0mm, una curva di inclinazione del vano quasi del tutto piatta che si attesta attorno allo zero è un fattore positivo indicante una buona realizzazione.

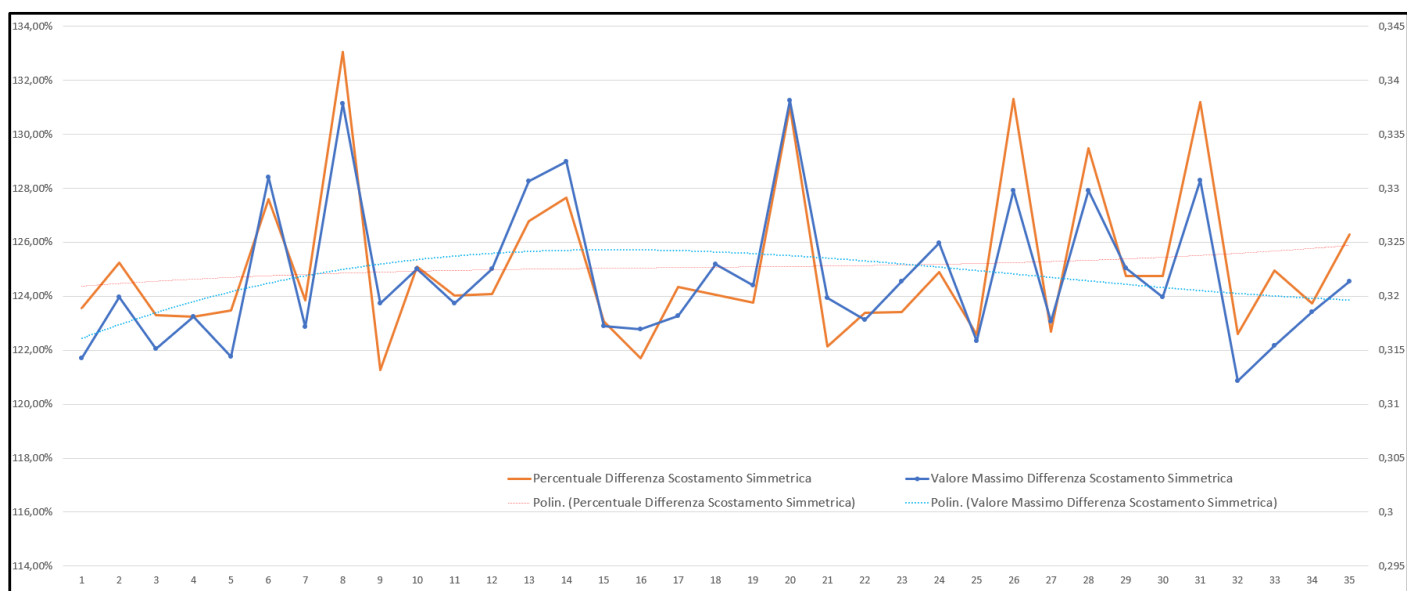


Andamento dei parametri di deviazione di profilo per la camma O1835 con mola spostata di +2mm. La curva dell'andamento dell'inclinazione dell'asse del vano trasla verso il basso, indicando un peggioramento della qualità della camma (secondo le previsioni teoriche). Il parametro di inclinazione del vano, assieme a quello di asimmetria (mostrato in seguito) sono quelli che mostrano in maniera efficace e immediata errori di lavorazione della camma.



*Andamento del parametro di asimmetria per la camma O1835 con mola spostata di +0mm.*

*Il valore minimo di asimmetria scende al di sotto dello 0,01mm. La curva arancione fa riferimento ai valori percentuali riportati sull'asse verticale a sinistra, mentre quella in blu fa riferimento ai valori riportati sull'asse verticale destro.*



*Andamento del parametro di asimmetria per la camma O1835 con mola spostata di +2mm.*

*Il valore massimo di asimmetria si attesta attorno 0,325mm traducendosi in un aumento di circa 32 volte rispetto alla camma realizzata con mola a +0mm. La curva arancione fa riferimento ai valori percentuali riportati sull'asse verticale a sinistra, mentre quella in blu fa riferimento ai valori riportati sull'asse verticale destro.*

### 5.3 Discussione dei risultati

Dopo aver analizzato il profilo delle diverse camme realizzate, sono stati riassunti i valori più significativi in una tabella (Figura 23). La camma O1835, rispetto alla O1687 è costituita da un numero di denti minore, di dimensione più grande e le varie iterazioni sono realizzate con variazioni di posizione della mola più grande (si passa da +0mm a +2mm). Questo si traduce con una variazione dei parametri più netta ed evidente per la camma O1835. In linea generale, i parametri di deviazione di profilo subiscono un aumento nel loro valore quando la mola si allontana dal suo asse neutro di lavorazione (+0mm). Il valore di inclinazione dell'asse del vano subisce una variazione di un ordine di grandezza per la camma O1687 e una variazione di ben due ordini di grandezza per la camma O1835.

Per quanto riguarda l'asimmetria del vano, il valore medio quasi raddoppia ogni volta che la mola della camma O1687 viene spostata di 0.5mm, mentre è ben venticinque volte il valore originale quando la mola della camma O1835 viene spostata di +2mm.

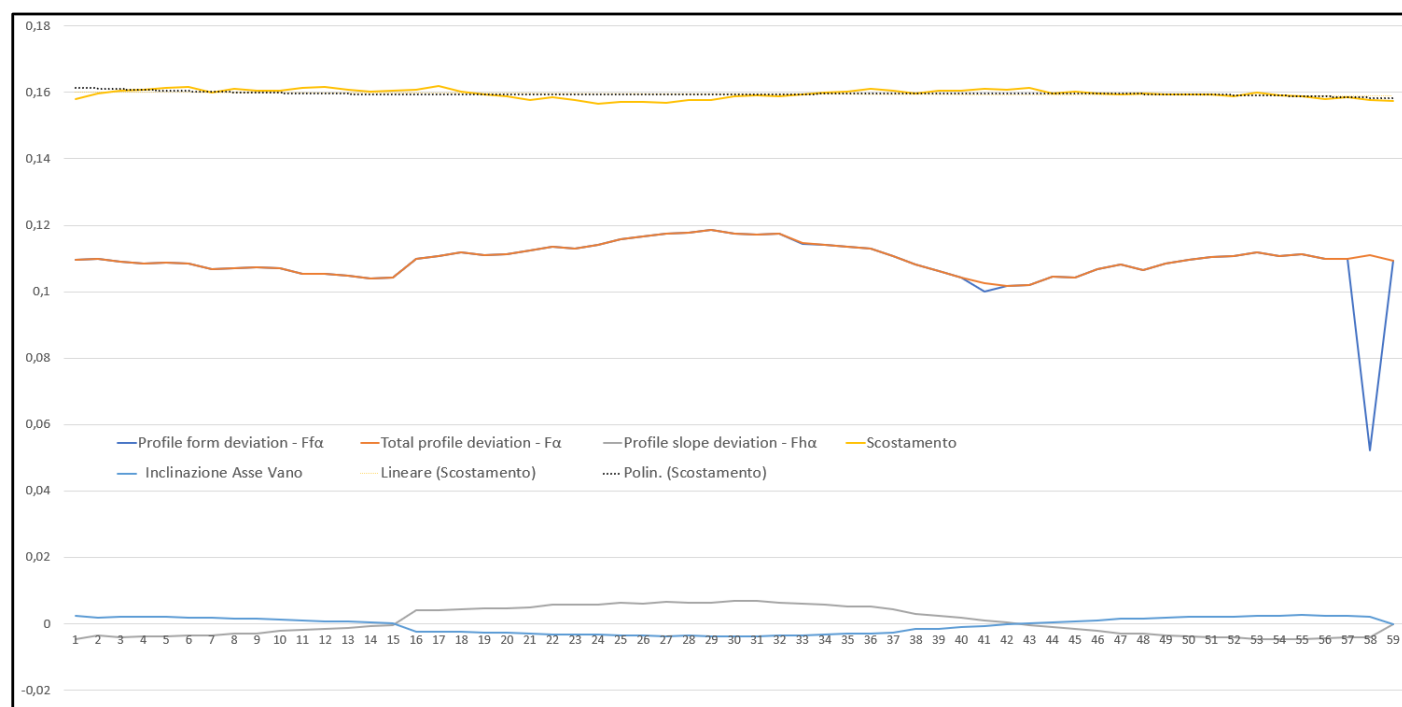
	O1687			O1835			
	MOLA +0	MOLA +0.5	MOLA +1	MOLA +0	MOLA +2		
<b>Scostamento</b> (Media, mm)	0,18736	0,17823	0,19296	0,16512	0,18271		
<b>Distanza Max - Min</b> (Media, mm)	0,10885	0,10402	0,10665	0,20619	0,28402		
<b>Profile Form Deviation: F<sub>fa</sub></b> (Valore Massimo, mm)	0,13278	0,12253	0,12264	0,24962	0,33390		
<b>Total Profile Deviation: F<sub>a</sub></b> (Valore Massimo, mm)	0,13278	0,12253	0,12280	0,24962	0,35904		
<b>Profile Slope Deviation: F<sub>h<sub>a</sub></sub></b> (Media, mm)	-0,00002	0,00229	0,00375	-0,00296	0,07066		
<b>Profile Slope Deviation: F<sub>h<sub>a</sub></sub></b> (Valore Massimo, mm)	0,00633	0,00482	0,01233	0,00847	0,07842		
<b>Profile Slope Deviation: F<sub>h<sub>a</sub></sub></b> (Valore Minimo, mm)	-0,00623	-0,00072	-0,00541	-0,01746	0,06270		
<b>Inclinazione Asse Vano</b> (Media, °)	0,00002	-0,00189	-0,00309	0,00098	-0,02345		<b>Soglia</b> 0,0015
<b>Asimmetria Vano</b> (Media, mm)	0,01373	0,02063	0,04420	0,01285	0,32192		0,015

(Figura 42) Tabella riepilogativa contenente valori significativi per ciascun parametro.

Nella figura 42, sono stati evidenziati in giallo il parametro di inclinazione dell'asse del vano e il parametro di asimmetria. Come si è potuto notare dai grafici, questi due parametri sono quelli che reagiscono in maniera più marcata e uniforme agli spostamenti della mola. Per due camme diverse, con diversa dimensione e numero di denti, i parametri evidenziati hanno valori molto simili quando la mola è posizionata a +0mm e mostrano trend di crescita (si è considerato in particolar modo l'ordine di grandezza del valore) coerenti con la entità dello spostamento della mola. Per tale motivo è stata attribuita loro una maggiore importanza sin dalle prime fasi di analisi e discussione dei risultati. A ciascuno di questi due parametri è stato attribuito un valore soglia (evidenziato in verde), al di sotto al quale si può ritenere il pezzo di qualità accettabile. I parametri principalmente riguardanti il profilo invece subiscono (per la mola O1687) fluttuazioni contrastanti con quello che dovrebbe essere il trend teorico, inoltre i valori massimi di tali parametri (sia per la camma O1687 che per la O1835) per una mola posizionata a +0mm, hanno un ordine di grandezza molto elevato che ha inizialmente fatto supporre a un possibile errore di posizionamento in macchina del pezzo.

#### 5.4 Analisi di una camma proveniente da lotto di produzione

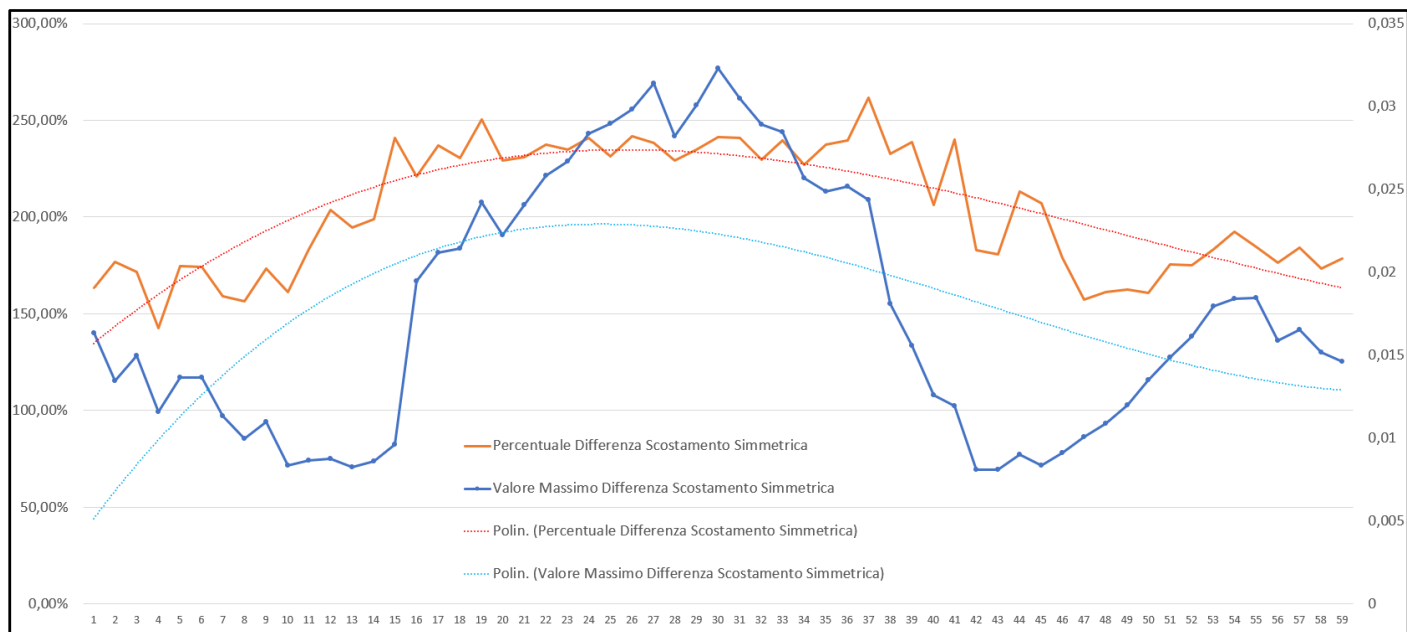
In aggiunta alle due camme (O1687 e O1835) realizzate in più varianti con l'aggiunta volontaria di errori (tramite un disassamento della mola), è stata effettuata la scansione di una camma proveniente da un lotto di produzione (e quindi realizzata teoricamente al meglio delle capacità di lavorazione e senza l'introduzione volontaria di errori). La camma (denominata O1759) è costituita da un totale di 59 denti, ciascuno con una altezza di 3mm (raggio massimo pari a 129,5mm e raggio minimo pari a 126,5mm).



*Andamento dei parametri di deviazione di profilo per la camma O1759.*

*Il parametro di inclinazione del vano risulta essere molto buono (come si vedrà nella tabella riepilogativa).*





Andamento del parametro di asimmetria per la camma O1759. La curva arancione fa riferimento ai valori percentuali riportati sull'asse verticale a sinistra, mentre quella in blu fa riferimento ai valori riportati sull'asse verticale destro.

Il valore medio percentuale si attesta intorno al 200% che è un valore molto alto.

Possibile motivo può essere un macchinario tarato male o una mola leggermente fuori asse.

	O1687			O1835		O1759		
	MOLA +0	MOLA +0.5	MOLA +1	MOLA +0	MOLA +2			
<b>Scostamento</b> (Media, mm)	0,18736	0,17823	0,19296	0,16512	0,18271	0,15798		
<b>Distanza Max - Min</b> (Media, mm)	0,10885	0,10402	0,10665	0,20619	0,28402	0,10661		
<b>Profile Form Deviation: Ff<math>\alpha</math></b> (Valore Massimo, mm)	0,13278	0,12253	0,12264	0,24962	0,33390	0,11074		
<b>Total Profile Deviation: F<math>\alpha</math></b> (Valore Massimo, mm)	0,13278	0,12253	0,12280	0,24962	0,35904	0,11183		
<b>Profile Slope Deviation: Fh<math>\alpha</math></b> (Media, mm)	-0,00002	0,00229	0,00375	-0,00296	0,07066	0,00153		
<b>Profile Slope Deviation: Fh<math>\alpha</math></b> (Valore Massimo, mm)	0,00633	0,00482	0,01233	0,00847	0,07842	0,00910		
<b>Profile Slope Deviation: Fh<math>\alpha</math></b> (Valore Minimo, mm)	-0,00623	-0,00072	-0,00541	-0,01746	0,06270	-0,00597		Soglia
<b>Inclinazione Asse Vano</b> (Media, °)	0,00002	-0,00189	-0,00309	0,00098	-0,02345	-0,00063		0,0015
<b>Asimmetria Vano</b> (Media, mm)	0,01373	0,02063	0,04420	0,01285	0,32192	0,01949		0,015

(Figura 43) Tabella riepilogativa con i valori principali per ciascun parametro.

Nella figura 43 si mettono a confronto i parametri delle camme analizzate fino ad ora. In merito al parametro di inclinazione dell'asse del vano, questo ha lo stesso ordine di grandezza dei valori di inclinazione del vano della camma O1687 e O1835 (entrambi facendo riferimento alla mola a +0mm). Per quanto riguarda l'asimmetria del vano notiamo una discrepanza, con un valore massimo medio che supera la soglia imposta ed è più alto se paragonato ai valori di asimmetria delle prime due camme lavorate con mola in asse. Sulla base di questi risultati, sono state effettuate delle verifiche sui macchinari e a seguire, una nuova lavorazione della camma. La stessa camma (O1759) è stata nuovamente realizzata spostando la mola 0,25mm verso il basso, andando così ad ottenere dei valori di asimmetria più alti rispetto al caso con mola in asse. La stessa operazione è stata ripetuta stavolta spostando la mola 0,15mm in alto. I valori di asimmetria sono congruenti con quelli ottenuti spostando la mola verso il basso. Questa operazione di verifica conferma l'attendibilità dei risultati ottenuti tramite il sistema di analisi Excel. Essendo la mola stata posizionata al meglio delle capacità dell'operatore un ulteriore, l'attenzione ora si focalizza sulla forma stessa della mola.

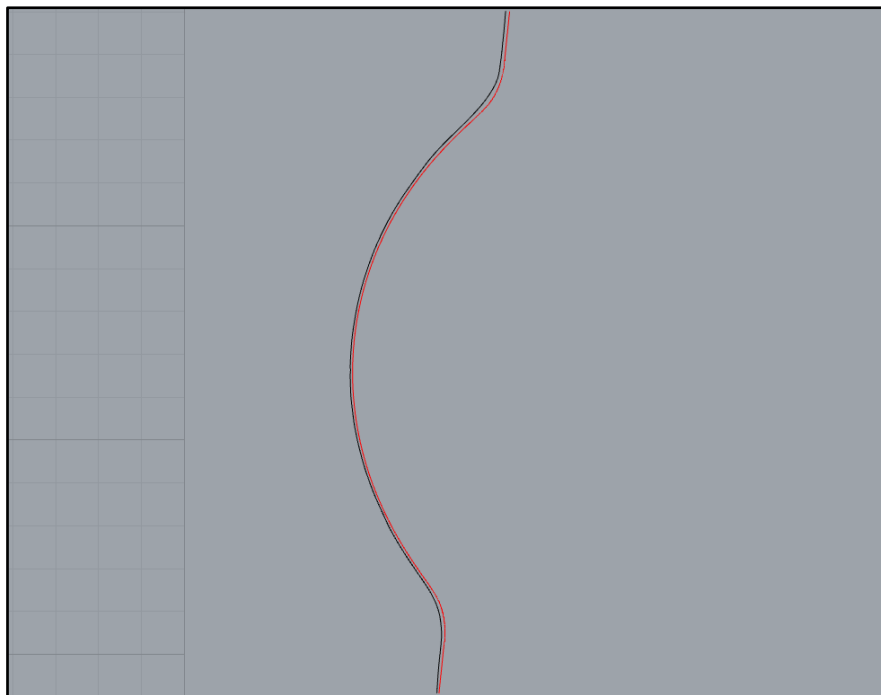
### 5.5 Analisi del profilo di una mola

Essendo i risultati ottenuti dalle analisi attendibili ed essendo la mola posizionata al meglio delle capacità dell'operatore, un'ulteriore verifica di qualità da effettuare è la forma della mola stessa. La mola infatti potrebbe non essere stata profilata bene o addirittura la deposizione dell'abrasivo potrebbe andare a modificare in maniera sostanziale il profilo finale dell'utensile. Non essendo possibile effettuare una scansione del profilo ricoperto con l'abrasivo (in quanto rovinerebbe la sfera di tastatura), è stata effettuata una scansione del profilo (non ricoperto) della mola.

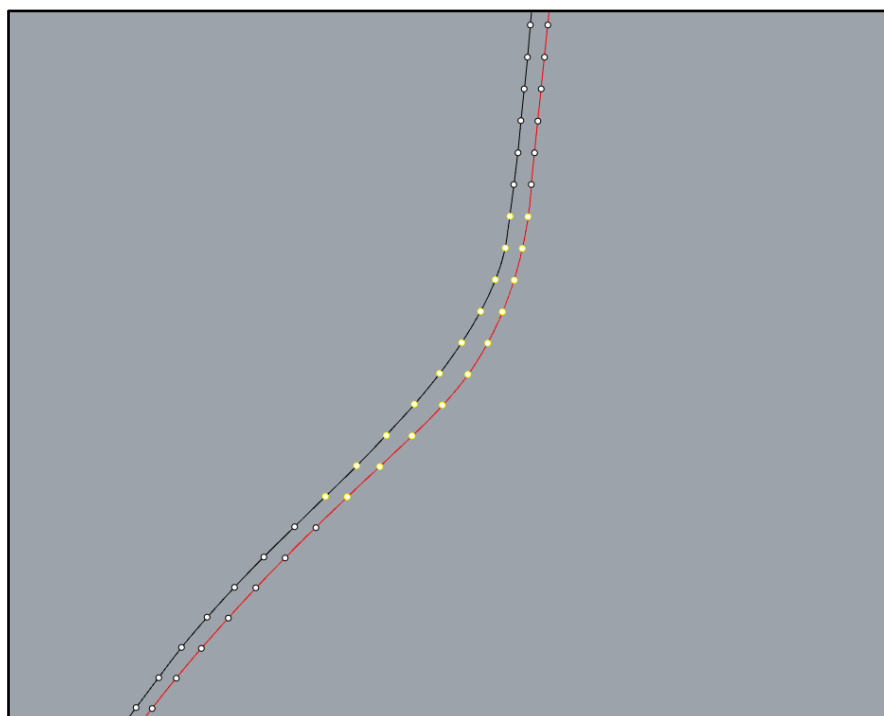


(Figura 44) Mola di lavorazione con profilo non ricoperto dall'abrasivo.

La mola è stata analizzata tramite lo stesso metodo utilizzato per una camma. Siccome il profilo teorico della mola e quello del dente della camma coincidono per costruzione, diventa possibile utilizzare gli stessi fogli di calcolo Excel realizzati per l'analisi delle camme (con formule di calcolo modificate opportunamente modificate e riadattate per tener conto del fatto che il profilo della mola costituisce da solo un singolo vano). Un ulteriore vantaggio dell'utilizzare questo metodo per l'analisi del profilo della mola è che si conserva lo stesso layout e la stessa procedura di utilizzo con le quali si è già familiari.



(Figura 45) In rosso il profilo teorico della mola, in nero il profilo reale. Anche a occhio nudo è possibile intuire le zone più sensibili nelle quali il parametro di asimmetria avrà valori al di sopra della media.



(Figura 46). Ingrandimento nella zona in cui il profilo reale discosta maggiormente dal profilo teorico. le zone più sensibili corrispondono al tratto iniziale e finale, in particolare nella zona di curvatura del profilo.

I risultati ottenuti in Excel confermano l'ipotesi iniziale ovvero che la forma del profilo della mola influenza in maniera significativa la qualità del profilo della camma ed è ragionevole poter considerare la ricopertura abrasiva come un ulteriore elemento responsabile della presenza di irregolarità del profilo.

ASIMMETRIA VANO							
N° Punto Vano	Scostamento	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente VALORE ASSOLUTO	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente VALORE MASSIMO (mm)	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente MEDIA	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente PERCENTUALE	Differenza dello scostamento tra i primi e gli ultimi punti di un dente MASSIMO (%)
1	0,09445	0,04533	0,04533	0,050734331	0,016346086	277,31%	310,38%
2	0,09098	0,03540	0,03540			216,55%	
3	0,08759	0,02555	0,02555			156,28%	
4	0,08484	0,01677	0,01677			102,59%	
5	0,08460	0,01390	0,01390			85,01%	
6	0,08474	0,01361	0,01361			83,28%	
7	0,08414	0,01314	0,01314			80,37%	
8	0,08836	0,01561	0,01561			95,48%	
9	0,09289	0,01481	0,01481			90,59%	
10	0,08771	0,00428	0,00428			26,18%	
11	0,09396	0,00486	0,00486			29,72%	
12	0,11147	0,02104	0,02104			128,75%	
13	0,13123	0,03819	0,03819			233,62%	
14	0,14468	0,04784	0,04784			292,70%	
15	0,14325	0,05073	0,05073			310,38%	
16	0,13096	0,04735	0,04735			289,68%	
17	0,11588	0,03376	0,03376			206,52%	
18	0,10910	0,03086	0,03086			188,78%	
19	0,10744	0,02968	0,02968			181,58%	
20	0,10801	0,03084	0,03084			188,69%	
21	0,10824	0,03142	0,03142			192,21%	
22	0,10604	0,02856	0,02856			174,74%	
23	0,09970	0,02413	0,02413			147,61%	
24	0,08787	0,01745	0,01745			106,74%	
25	0,08070	0,01974	0,01974			120,78%	
26	0,07472	0,01658	0,01658			101,42%	
27	0,07202	0,01272	0,01272			77,80%	
28	0,07340	0,01316	0,01316			80,50%	
29	0,07362	0,01354	0,01354			82,81%	
30	0,07277	0,01538	0,01538			94,08%	
31	0,07371	0,01405	0,01405			85,94%	
32	0,07171	0,01197	0,01197			73,23%	
33	0,06948	0,01084	0,01084			66,29%	
34	0,06843	0,00948	0,00948			57,99%	

(Figura 47). I valori di asimmetria selezionati sono relativi ai punti evidenziati in giallo nella Figura 46.

Questi creano una vera e propria zona anomala quando paragonati agli altri valori presenti, che si attestano al di sotto del 100%

## 6 Conclusioni

Il progetto è stato iniziato con l'ambizione di ottenere un sistema con interfaccia grafica user-friendly che elaborasse dei dati di input (ottenuti dalla scansione) e che restituisse immediatamente dei parametri assieme a una classe di qualità (eccellente/accettabile/scarto). Con la lettura degli articoli scientifici e delle normative relative a ruote dentate elicoidali, si è passati a un approccio più realistico e pratico, che puntava principalmente ad ottenere una lista di parametri sicuri e attendibili su cui basare eventuali lavori futuri. Un altro aspetto sul quale è stata posta molta attenzione è la riduzione del numero di passaggi e operazioni da eseguire manualmente senza l'introduzione un terzo software o programma. Come visto nell'introduzione la parte dei calcoli di Excel è stata raffinata al punto da dover solamente inserire i dati inizialmente lavorati in Rhinoceros. Possiamo dire quindi di essere riusciti a rispondere, anche se parzialmente, alla necessità di un metodo di analisi di qualità del profilo di una camma, riuscendo a adattare dei parametri preesistenti, introducendo dei parametri del tutto nuovi in un campo dove non esiste una normativa in vigore e sfruttando a pieno le potenzialità di un software di calcolo come Excel. Il progetto verrà ora portato avanti dalla azienda Omme Gears e su di esso si svilupperà un codice per realizzare un software di analisi e controllo qualità. L'intero processo di realizzazione del sistema è stato di grande importanza e ha arricchito enormemente la mia personale conoscenza nell'uso di Excel. Aver lavorato a stretto contatto con il personale e gli ingegneri della Omme Gears ha permesso di accumulare esperienza e di fornire una idea sul funzionamento pratico delle attività di ricerca e sviluppo di una azienda vera e propria. Si ringraziano nuovamente il professore Marco Mandolini per l'inestimabile aiuto e guida prestata durante l'intera durata del progetto, l'ingegnere Massimo Mancini e il personale della Omme Gears.

## 7 Bibliografica

- (Zhang & Zhu, 2016): *“Accuracy Measuring for the RV Reduced Cycloid Gear and Manufacturing Error Analysis”* - Yueming Zhang & Guoyang Zhu, College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China.
- (Figura 1): Catalogo Riduttori Cicloidali Omme Gears -  
[http://www.omme.net/PDF/WEB\\_OMMEGEARS\\_Riduttori\\_IT.pdf](http://www.omme.net/PDF/WEB_OMMEGEARS_Riduttori_IT.pdf)
- (Figura 2), (Figura 3): Scheda approfondimento Online del Corso di Disegno di Sergio Sammarone -  
[http://www.didatticarte.it/Blog/documenti/Zanichelli\\_Sammarone\\_Curve\\_Meccaniche.pdf](http://www.didatticarte.it/Blog/documenti/Zanichelli_Sammarone_Curve_Meccaniche.pdf)
- (Figura 4), (Figura 5), (Figura 6), (Figura 7), (Figura 8), (Figura 9): Design of Cycloidal Gear -  
<https://www.youtube.com/watch?v=guvatctnjww>
- (Figura 13), (Figura 15): Normativa ISO 1328-1:1995 *“Cylindrical gears - ISO system of accuracy”*
- (Figura 14): *“Tolleranza del Runout”* - <https://www.keyence.it/ss/products/measure-sys/gd-and-t/type/run-out-tolerance.jsp>
- (UNI EN ISO 1101:2004): *Geometrical Product Specifications - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out*