

POLITECNICO DI TORINO

DIMEAS - DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA ED
AEROSPAZIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA



Modellazione di ruote dentate coniche per controlli metrologici

Tesi di Laurea Magistrale

Relatore

Prof. Andrea Mura

Candidato

Luca Genovese

ANNO ACCADEMICO 2019/2020

Indice

Introduzione	2
1 Ruote dentate coniche	4
1.1 Tipologie di altezza del dente	5
1.1.1 Ruote con altezza del dente costante	5
1.1.2 Ruote con altezza del dente non costante	6
1.2 Profilo trasversale del dente	7
1.3 Forma longitudinale del dente	10
1.3.1 Ruote coniche a denti dritti	10
1.3.2 Ruote coniche a dentatura a spirale	11
1.3.3 Ruote coniche Zerol	12
1.3.4 Ruote coniche a denti obliqui	13
1.3.5 Ruote coniche ipoidi	14
1.4 Metodo di fabbricazione	15
1.4.1 Ruote coniche a denti dritti	16
1.4.2 Ruote coniche con dentatura a spirale	18
2 Procedura di misura degli ingranaggi	23
2.1 Definizione delle grandezze di riferimento utili per la misura .	24
2.2 Metodi e pratiche di misura	27

2.2.1	Misura dello scostamento del passo	28
2.2.2	Misura del passo tramite metodo di indicizzazione . . .	29
2.2.3	Misura del passo tramite comparatore	30
2.2.4	Misura del runout (oscillazione)	31
2.2.5	Misura del fianco del dente	32
2.2.6	Misura dello spessore del dente	36
2.3	Tolleranze	39
2.3.1	Equazioni di tolleranza	40
2.4	Misurazioni raccomandate	42
3	Creazione del modello matematico su <i>Matlab</i>[®]	44
3.1	Definizione dei parametri geometrici della coppia conica	45
3.2	Modellazione degli ingranaggi in <i>Matlab</i> [®]	52
3.2.1	Definizione della geometria unitaria e ripetizione lungo la circonferenza	52
3.2.2	Estrusione dell'ingranaggio	57
4	Ispezione e verifica del modello <i>Matlab</i>[®]	62
4.1	Generazione dei modelli CAD	62
4.2	Confronto tra i due modelli	65
4.3	Ingranaggi sottoposti a ispezione	69
4.4	Risultati dell'ispezione	72
4.4.1	Coppia conica 1	73
4.4.2	Coppia conica 2	78
4.4.3	Coppia conica 3	83
5	Conclusioni	88
5.1	Sviluppi futuri	89

Appendice A Report grafici Coppia 1 Pignone	91
Appendice B Report grafici Coppia 1 Ruota	96
Appendice C Report grafici Coppia 2 Pignone	101
Appendice D Report grafici Coppia 2 Ruota	106
Appendice E Report grafici Coppia 3 Pignone	111
Appendice F Report grafici Coppia 3 Ruota	116
Bibliografia	122

*Alla mia famiglia,
ai miei amici e a
tutti quelli che
mi hanno supportato.*

Introduzione

L'obiettivo di questo lavoro di ricerca, svolto in collaborazione con l'azienda *MetroStaff S.R.L* di Rivoli, è stato la realizzazione di un modello che permettesse la definizione di superfici geometriche di vari tipi di ingranaggi conici a fini metrologici. Si è giunti a questo modello attraverso la scrittura di un codice *Matlab*[®] che, a seguito dell'inserimento di pochi dati iniziali, restituisce le geometrie desiderate.

Il lavoro è partito da una ricerca bibliografica. In prima battuta, si è cercato in letteratura quali fossero i principali tipi di coppie coniche presenti sul mercato, cercando di cogliere le principali differenze geometriche tra di loro.

Conclusa questa prima parte di classificazione la ricerca si è incentrata sui riferimenti normativi relativi alla geometria degli ingranaggi conici secondo lo standard ISO 23509:2016, che definisce i diversi algoritmi che permettono di calcolare le principali grandezze delle ruote coniche.

Successivamente, sempre seguendo i relativi standard ISO, si è indagato sui principali metodi di controllo metrologico degli ingranaggi conici e delle relative grandezze geometriche ricavabili da tali misure. Questa indagine è stata poi completata definendo i valori limite di tolleranza per i vari parametri misurati, seguendo sempre le linee guida delle normative ISO.

Terminata la ricerca bibliografica iniziale si è potuti procedere all'impo-

stazione dello script *Matlab*[®], definendo i dati minimi da 'dare in pasto' al programma necessari alla definizione delle misure geometriche dell'ingranaggio. Definiti i dati di input dello script si è cercato in letteratura la formulazione dell'evolvente sferica, curva che genera il fianco dei denti delle coppie coniche. Conclusa questa fase di ricerca si è potuto procedere alla stesura del programma in *Matlab*[®].

Una volta terminata la scrittura dello script e verificata la sua robustezza si è potuto procedere alla verifica e validazione del modello matematico creato. Per farlo sono stati messi a confronto diversi modelli CAD generati con il programma *MITCALC*[®] con una griglia di punti, rappresentante il fianco dei denti, così come viene generata dallo script *Matlab*[®]. Questo confronto conclusivo è stato effettuato tramite il software *ArcoCad*[®] *Inspection*, della società *MetroStaff*[®].

Capitolo 1

Ruote dentate coniche

Le ruote dentate coniche sono dei particolari tipi di ingranaggi di forma conica utilizzati per trasmettere potenza tra due alberi rotanti i cui assi non sono paralleli.

Gli ingranaggi conici possono essere classificati secondo varie caratteristiche:

- Altezza del dente lungo la larghezza di fascia;
- Forma longitudinale del dente (es. dente dritto o dente curvo);
- Tipo di curva tracciata dal dente sul fianco esterno del cono;
- Scostamento tra gli assi di pignone e corona (caso di ruote ipoidi);
- Successione del taglio dei vani dei denti;
- Metodo di taglio del vano;
- Metodo di fabbricazione;

Alcune di queste classificazioni sono definite dalla norma ISO 23509:2016, mentre altri sono conseguenza della metodologia di fabbricazione dell'ingranaggio.

1.1 Tipologie di altezza del dente

La norma ISO 23509:2016 definisce due tipi diversi di ingranaggio rispetto all'altezza del dente lungo il suo fianco:

- Altezza costante del dente;
- Altezza del dente non costante;

1.1.1 Ruote con altezza del dente costante

In questa configurazione la distanza tra la radice e la cresta del dente rimane costante lungo lo sviluppo del fianco del dente. In questo caso la linea di radice è parallela al cono primitivo, come si può notare dalla figura (1.1). Inoltre, la somma degli angoli di dedendum di ruota e pignone è uguale a zero.

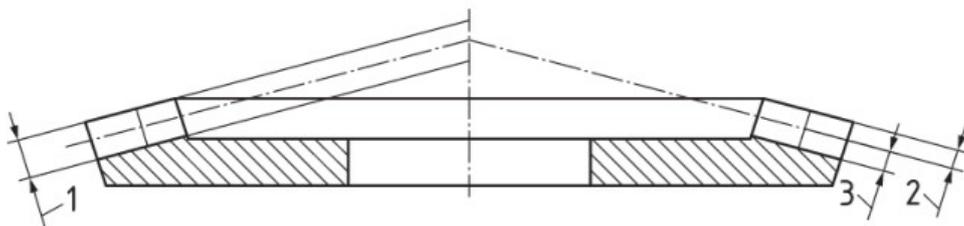


Figura 1.1: Ingranaggio conico con altezza del dente costante[1]

1.1.2 Ruote con altezza del dente non costante

In questo tipo di configurazione l'altezza del dente cambia lungo lo sviluppo del dente. Ciò accade perchè cresta e piede del dente hanno due angoli di cono differenti; il dente verrà quindi ad avere un'altezza minore in corrispondenza del diametro interno della ruota che crescerà all'allontanarsi dal centro dell'ingranaggio.

Si possono riconoscere tre tipologie di questa configurazione del dente:

- Rastrematura Standard;
- Duplex, con vano di base costante;
- vano di base modificato;

Rastrematura Standard

L'altezza del dente è direttamente proporzionale alla distanza dal vertice del cono in qualsiasi sezione del dente. Il prolungamento della retta avente la direzione della radice del dente incontra l'asse dell'ingranaggio in corrispondenza del vertice del cono di base. Il prolungamento della linea di cresta del dente incontra l'asse in un punto diverso dal vertice del cono, definito dalla linea di radice dell'ingranaggio coniugato più un valore costante di gioco.

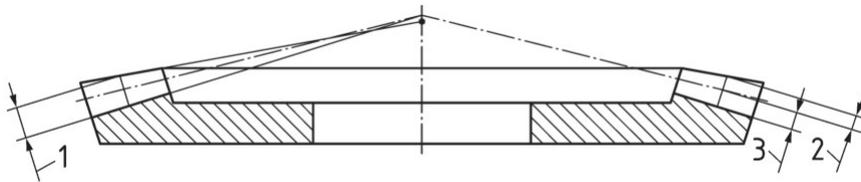


Figura 1.2: Ingranaggio conico con rastrematura standard del dente[1]

Duplex

Questo tipo di rastrematura viene effettuata quando è necessario avere sia per il pignone sia per la ruota condotta la retta di radice del dente inclinata per avere la base del vano costante lungo il suo sviluppo. L'angolo di inclinazione del cono di radice è dipendente dal raggio di taglio dell'utensile r_{c0} [2].

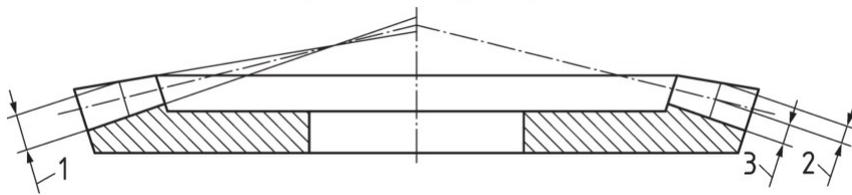


Figura 1.3: Altezza del dente con metodo *Duplex*[1]

Vano di base modificato

Questo caso è identico a quello *Duplex* appena descritto. In questa situazione però il metodo Duplex viene applicato solamente alla ruota condotta [2].

1.2 Profilo trasversale del dente

Le ruote dentate coniche non hanno un profilo ad evolvente di cerchio come gli ingranaggi cilindrici. Le ruote coniche hanno come profilo trasversale del dente la forma di un'evolvente sferica. Questa curva si ottiene dalla traiettoria che descrive un punto della circonferenza di base di un cono che ruota sopra un cerchio di raggio pari allo spigolo obliquo del cono considerato [3].

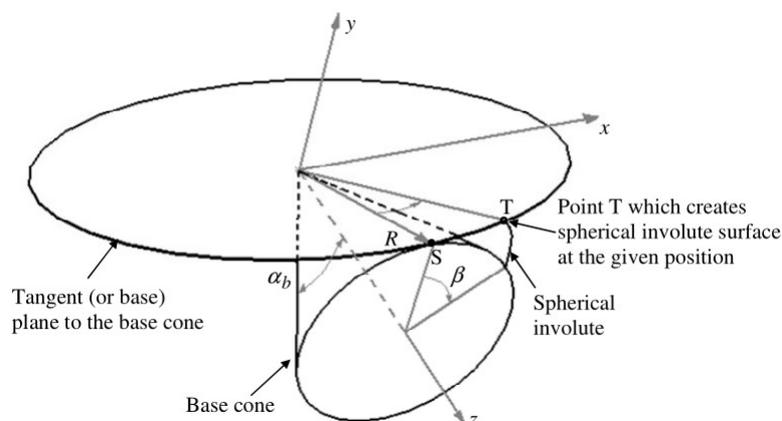


Figura 1.4: Evolvente sferica [3]

L'evolvente sferica è però difficile da ottenere come profilo durante il processo di creazione di un ingranaggio conico. Il profilo trasversale dei denti di una ruota conica viene quindi approssimato con una curva chiamata *ottoide*.

Si immagini una ruota dentata conica che si innesti su un ingranaggio a lei coniugato e tenuto fisso. Si può notare come la traiettoria tracciata da un punto del fianco del dente durante la rotazione si trovi sulla superficie sferica il cui centro corrisponde all'intersezione degli assi delle due superfici coniche primitive degli ingranaggi. Si immagini ora che lungo la circonferenza maggiore della sfera si sviluppi una dentiera generatrice con denti di forma trapezoidale a fianchi dritti, definita dalla ISO 23509:2016, e su cui i due coni primitivi si muovono in modo tale da creare sulla loro superficie la dentatura coniugata (in maniera analoga a ciò che accade con gli ingranaggi cilindrici). I fianchi dei denti risultanti avranno la forma dell'involuppo dei fianchi dritti della dentiera generatrice quando i coni primitivi di ruota e pignone ruotano uno sull'altro seguendo il percorso della dentiera. Il profilo così ottenuto è detto *ottoide* [4].

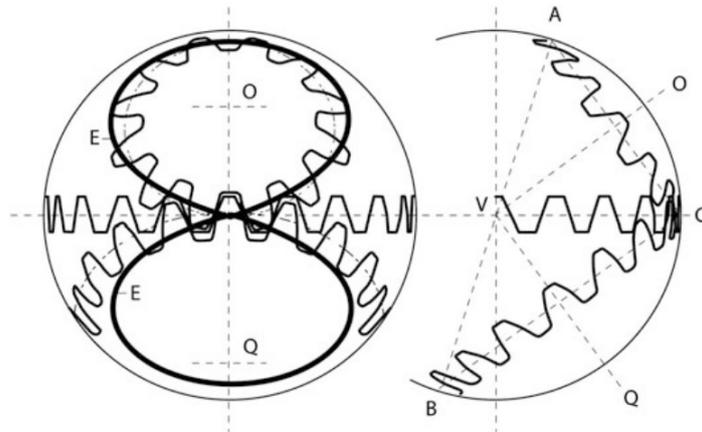


Figura 1.5: Schema di un ingranaggio ottoide [2]

Come si può notare dalla figura (1.6) la differenza tra evolvente sferica ed *ottoide* è minima. Entrambi i profili garantiscono però un corretto ingranamento.

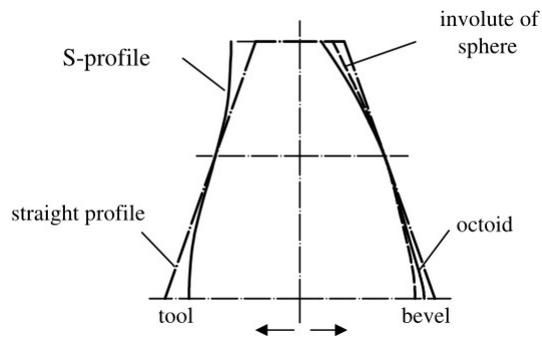


Figura 1.6: Differenza tra evolvente ed ottoide su ruota(sinistra) e dentiera (destra) [5]

1.3 Forma longitudinale del dente

Per ciò che riguarda la forma longitudinale del dente lungo il fianco dell'ingranaggio la norma ISO 23509:2016 definisce principalmente tre tipologie di dentatura[1]:

- dentatura dritta;
- dentatura a spirale;
- dentatura Zerol;

1.3.1 Ruote coniche a denti dritti

Sono le ruote coniche dal disegno più semplice. Il contatto tra gli ingranaggi avviene inizialmente in cima al dente e progressivamente si sposta verso la radice di quest'ultimo. Il contatto interessa però l'intera lunghezza del fianco del dente, causando così elevati stress alla dentatura oltre che una rumorosità importante durante l'ingranamento[1].

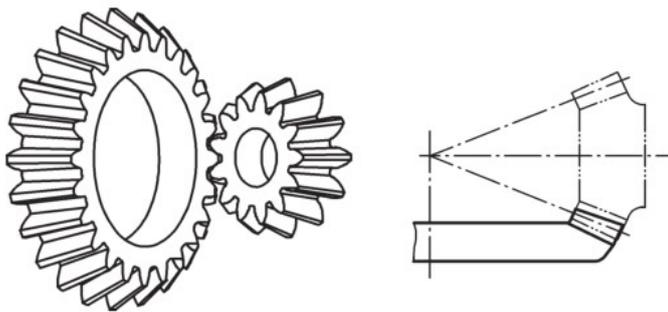


Figura 1.7: Ingranaggio conico a denti dritti[1]

1.3.2 Ruote coniche a dentatura a spirale

Queste ruote hanno denti curvati obliquamente dove il contatto inizia alla fine di un dente e procede dolcemente verso la fine di un altro dente. Il loro ingranamento comincia in modo simile a quello delle ruote a denti dritti, ma la sovrapposizione dei contatti di più denti insieme rende la trasmissione del moto più 'morbida' rispetto a quella che si ottiene con ingranaggi a denti dritti.

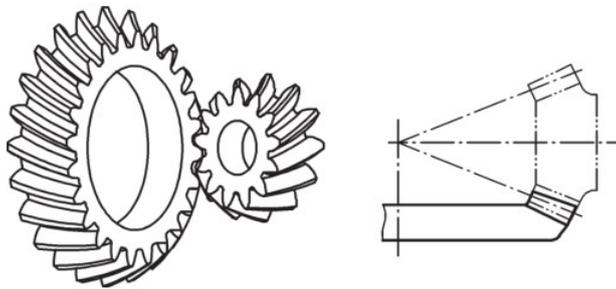


Figura 1.8: Ingranaggio conico con denti a spirale[1]

In questo tipo di ingranaggi si può definire un'ulteriore classificazione sulla base della forma del percorso che il dente traccia lungo il suo sviluppo. Esistono quindi ingranaggi conici a spirale con le seguenti forme dei denti[2]:

- arco di cerchio;
- epicicloide;
- evolvente di cerchio;

Quest'ulteriore distinzione dipende principalmente dal tipo di processo produttivo della ruota dentata e verrà trattato più dettagliatamente nei prossimi paragrafi.

Un ulteriore parametro da considerare per questo tipo di ingranaggi è il verso della spirale, che può essere *destra* oppure *sinistra*. Per poter ingranare

tra loro due ruote con denti a spirale devono avere direzione d'elica opposta tra loro. Se guardando dall'alto il mio ingranaggio vedo che il dente andando dal raggio interno verso quello esterno ha una direzione oraria ho una *spirale destra*, se viceversa il verso è antiorario ho una *spirale sinistra*[2].

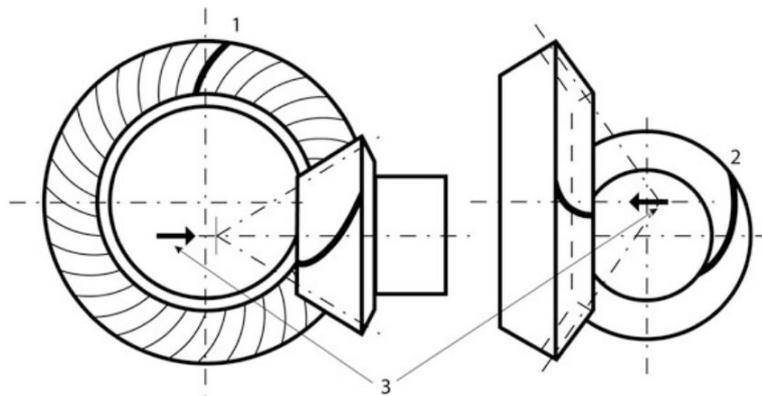


Figura 1.9: Ingranaggio con spirale destra (1) e sinistra (2)[2]

1.3.3 Ruote coniche Zerol

La normativa ISO 23509:2016 definisce anche un particolare tipo di ruota dentata a spirale, le ruote Zerol. I denti di questi ingranaggi hanno angolo di spirale pari a zero; la direzione di questi denti è la stessa di quella degli ingranaggi a denti dritti, ma questi ultimi hanno una leggera curvatura. Posseggono le stesse caratteristiche delle ruote a denti elicoidali per ciò che riguarda carico sui cuscinetti, montaggio e manifattura. Solitamente un ingranaggio con dente a spirale viene definito Zerol quanto l'angolo d'elica è minore di 10° [1].

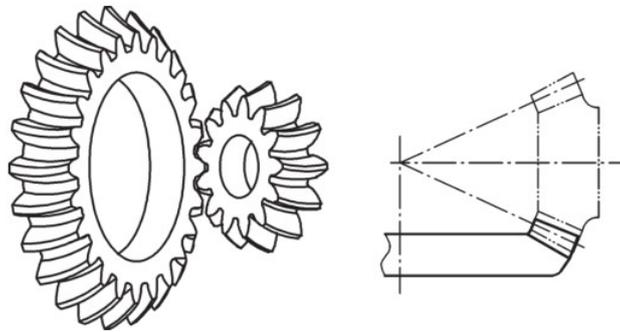


Figura 1.10: Ingranaggio conico *Zerol*[1]

1.3.4 Ruote coniche a denti obliqui

Questo tipo di dentatura degli ingranaggi non viene descritto nella ISO 23509:2016, che va a inglobare questa forma di dente all'interno di quella dei denti a spirale. Le dentature oblique non hanno una curvatura lungo il loro sviluppo, il dente viene tagliato in linea retta, seguendo però un percorso diverso rispetto quello che si avrebbe seguendo una qualunque retta facente parte di un fascio proprio partente dal centro dell'ingranaggio. Questa loro conformazione crea una sovrapposizione dei contatti tra più denti contemporaneamente, garantendo così miglior distribuzione degli sforzi sui denti e meno rumorosità rispetto ad una ruota a denti dritti, non raggiungendo però i vantaggi che si hanno in questi termini con ingranaggi elicoidali [2].

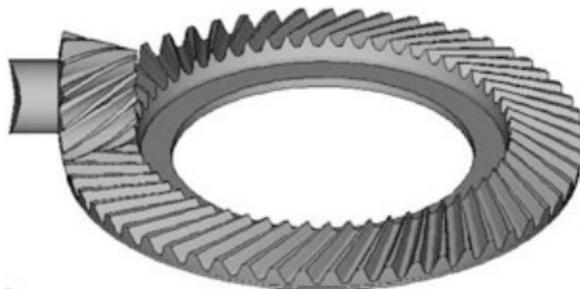


Figura 1.11: Ingranaggio conico a denti obliqui[2]

1.3.5 Ruote coniche ipoidi

Gli ingranaggi ipoidi formano un accoppiamento molto simile a quello di tipo conico a denti spirroidali. In questo tipo di ingranamento però gli assi di corona e pignone non vanno ad intersecarsi, ma presentano un disassamento, come si può notare dalla figura (1.12):

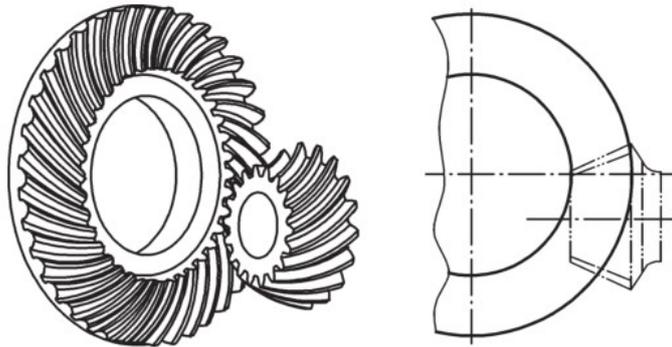


Figura 1.12: Ingranaggio ipoide [1]

Questo scostamento tra i due assi di corona e pignone può essere positivo o negativo:

- Si ha *offset positivo* quando lo scostamento dell'asse del pignone rispetto a quello della corona segue la direzione dell'elica della ruota condotta. Con questo tipo di offset il pignone ha un diametro più grande rispetto a quello che avrebbe senza scostamento, inoltre rispetto alla corona ha un angolo d'elica maggiore;
- Si ha *offset negativo* quando invece lo scostamento va in direzione opposta rispetto alla direzione dell'elica della corona. Con questo tipo di offset il pignone ha un diametro minore rispetto a quello che avrebbe senza scostamento, inoltre ha un angolo d'elica minore di quello della ruota condotta;

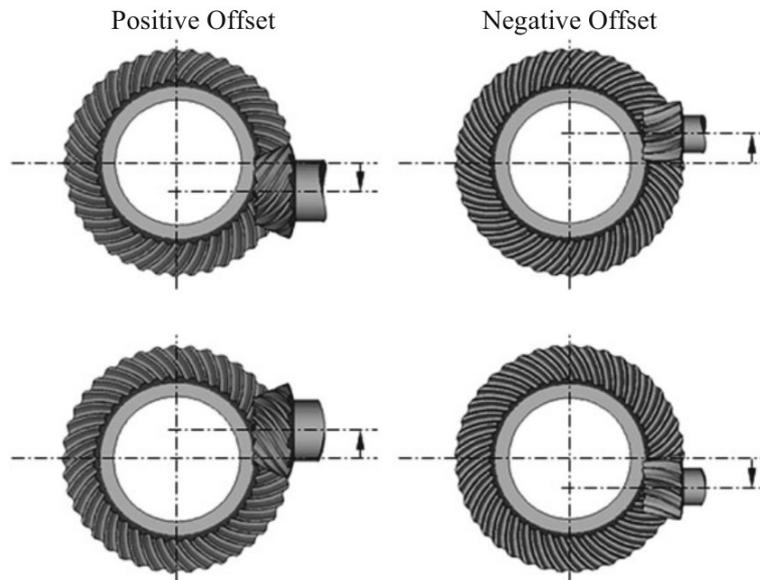


Figura 1.13: Offset *negativo* (destra) o *positivo* (sinistra)[1]

Le ruote ipoidi sono da considerare come il caso più generale di ruota conica. I loro solidi primitivi sono però degli iperboloidi, ottenuti dalla rivoluzione lungo una traiettoria ad elica che si sviluppa attorno alla retta dei contatti tra le due superfici. Per facilitare la loro produzione, le superfici primitive di questi tipi di ingranaggi vengono approssimate con la superficie di un cono. In questo modo solo il punto medio di pignone e della ruota condotta soddisfano le condizioni richieste dal moto elicoidale descritto precedentemente.

1.4 Metodo di fabbricazione

Il metodo di fabbricazione dell'ingranaggio ha una grandissima influenza per ciò che riguarda la geometria della ruota. Infatti ogni metodo di fabbricazione va a creare delle differenze sostanziali non solo per quanto riguarda il percorso che il dente ha longitudinalmente, ma anche per il profilo trasversale.

Se infatti, ad esempio, si provasse a far ingranare tra loro un pignone ed una ruota generati con due metodi di fabbricazioni diversi questi non riuscirebbero ad ingranare nel migliore dei modi, nonostante le differenze di geometria siano quasi impercettibili ad occhio nudo. Queste differenze risultano più marcate quando si viene a parlare di ingranaggi a denti spiroidali.

1.4.1 Ruote coniche a denti dritti

Per la fabbricazione di ruote coniche a denti dritti tramite taglio sono utilizzati prevalentemente due metodologie di fabbricazione:

- *Taglio con fresa di forma*, un tagliente formato da due dischi montati con un angolo tra i loro assi genera il vano dente (un disco forma il fianco destro e l'altro il fianco sinistro del vano), dopodichè ruotando il pezzo da lavorare di un opportuno angolo si vanno a creare gli altri vani per completare la dentatura (single indexing). Durante un singolo taglio vengono generati sia il pignone sia la corona. Esistono tre metodi diversi per generare la dentatura con questo tipo di operazione, che differiscono tra loro per il tipo di tagliente utilizzato dalle tre industrie che producono questo tipo di ingranaggi. Questi sono Coniflex[®] della ditta Gleason, Konvoid della ditta Modul e Sferoid della Klingelnberg [2]. Tutti e tre questi metodi creano dei denti con altezza non costante;
- *Brocciatura*, nota anche col nome commerciale di Revacycle[™], è il metodo più produttivo per realizzare ruote coniche a denti dritti. Come nel taglio con fresa di forma si generano contemporaneamente sia il pignone che la ruota condotta. Avendo bisogno di un utensile specifico per ogni rapporto di trasmissione desiderato questo metodo diventa

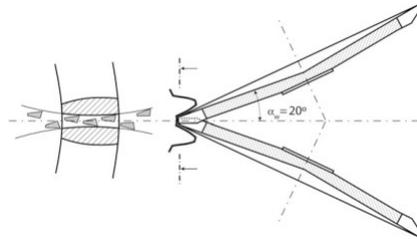


Figura 1.14: Schema del processo di taglio tramite fresa di forma[2]

perfetto per produzioni di massa. Il taglio da parte dell'utensile avviene in modo del tutto simile a quello che si svolge con l'uso della fresa di forma, ma in questo caso è necessaria solo una passata per ottenere il vano finito. Questo perchè l'utensile lungo la sua circonferenza presenta diversi tipi di taglienti, i primi per fare il taglio di 'sgrossatura', gli ultimi per completare la finitura del vano [6]. L'altezza del dente, anche in questo caso, non è costante;

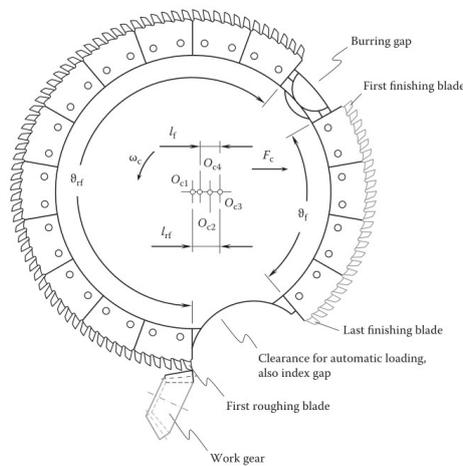


Figura 1.15: Schema del taglio tramite brocciatura con *metodo Revacycle* [6]

1.4.2 Ruote coniche con dentatura a spirale

Quando si vuole ottenere una dentatura a spirale tramite taglio con fresa bisogna considerare principalmente due diversi tipi di successione di taglio del dente:

- *Face milling*, detto anche *single indexing*, viene tagliato un vano del dente alla volta con il pezzo da lavorare fermo, dopodichè si alza l'utensile, si ruota il pezzo dell'angolo necessario a creare il vano dente successivo a quello appena tagliato e si ripete l'operazione fino a coprire l'intera circonferenza dell'ingranaggio. Con questo metodo solitamente si ottengono denti con la forma di un arco di cerchio [2];

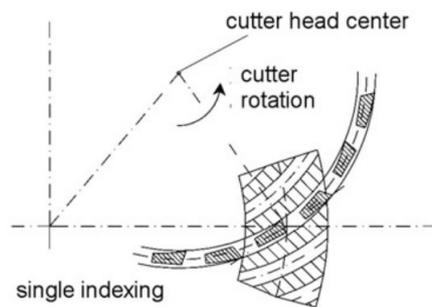


Figura 1.16: Schema della procedura di *Face Milling*[2]

- *Face hobbing*, detto anche *continuous indexing*. In questo metodo di taglio il pezzo e l'utensile di taglio ruotano entrambi in modo tale che ognuno dei taglienti collegato alla fresa crei un solo vano dente. In contemporanea il tagliente successivo crea il vano del dente successivo a quello iniziale e così via. In questo modo il taglio è continuo e i vani sono tagliati in modo pressochè simultaneo. Usando questo tipo di taglio i denti che verranno creati avranno solitamente una forma di epicicloide, a volte si ottiene invece un'evolvente di cerchio[2];

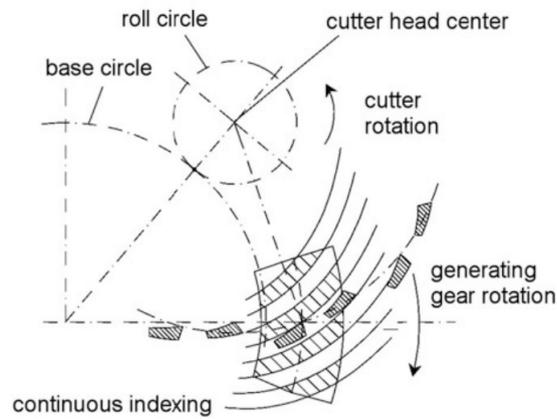


Figura 1.17: Schema del taglio dei vani tramite *Face Hobbing*[2]

La geometria completa di una ruota spiroidale dipende però in gran parte dal tipo di processo produttivo utilizzato per il taglio. Esistono svariate metodologie di produzione tramite taglio con fresa per fabbricare questi ingranaggi, ognuno dei quali va a creare una ruota dentata con caratteristiche geometriche diverse da quelle prodotte con altri metodi, nonostante molti di questi processi facciano riferimento ad esempio allo stesso tipo di successione di taglio del vano e alla stessa geometria di massima. Nella tabella (1.1) vengono riassunti i processi più utilizzati, andando ad indicare le principali caratteristiche di ognuno di essi.[7]

Metodo	Schema	Descrizione	Forma del dente
<i>Gleason</i>	<i>Figura 1.18</i>	Taglio tramite face milling, con angoli di elica compresi tra 0° e 45°.	Arco di cerchio
<i>Oerlikon</i>	<i>Figura 1.19</i>	Taglio tramite face hobbing, con taglio simultaneo di più vani in contemporanea. Angoli di elica compresi tra 0° e 45°.	Epicicloide
<i>Klingelnberg-Palloid</i>	<i>Figura 1.20</i>	Taglio continuo con fresa a taglienti a spirale. Angoli di elica compresi tra 35° e 38°	Evolvente di cerchio
<i>Klingelnberg-Zyclo-Palloid</i>	<i>Figura 1.21</i>	Taglio continuo con fresa a taglienti a spirale. Angoli di elica compresi tra 0° e 45°	Epicicloide

Tabella 1.1: Principali metodi di produzione di ingranaggi conici [7]

Nella tabella 1.2 è invece proposta una classificazione più accurata delle principali tipologie di ingranaggi conici presenti in commercio ad oggi[2].

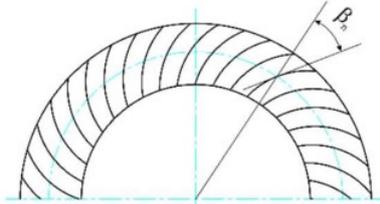


Figura 1.18: Ingranaggio Gleason[7]

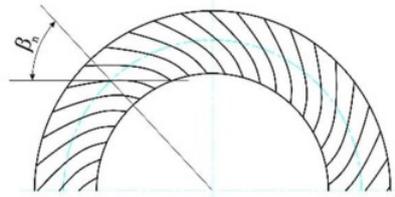


Figura 1.19: Ingranaggio Oerlikon[7]

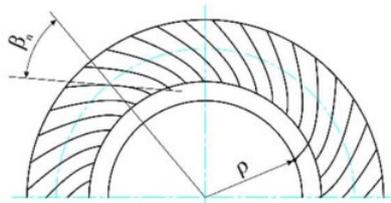


Figura 1.20: Ingranaggio Klingenberg-Paloid[7]

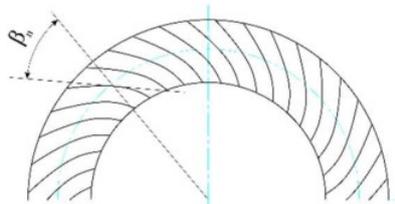


Figura 1.21: Ingranaggio Klingenberg-Zyclo-Paloid[7]

Metodo di produzione	Successione di taglio vano	Traccia del dente	Altezza dente	Larghezza vano pignone	Larghezza vano ruota	Bombatura profilo	Bombatura lunghezza
<i>Zyklo-Palloyd® o Zyklomet®</i>	Continuo	Epicycloide	Costante	Variabile	Variabile	Dentro l'utensile	Differenza di raggio
<i>Palloud®</i>	Continuo	Evolute	Costante	Costante	Costante	Utensile con soglia di testa	Dentro l'utensile
<i>N-Method</i>	Continuo	Epicycloide	Costante	Variabile	Variabile	Dentro l'utensile	Differenza dell'angolo d'inclinazione
<i>Spiroflex/ Spirac®</i>	Continuo	Epicycloide	Costante	Variabile	Variabile	Dentro l'utensile	Inclinazione del tagliente
<i>TRI-AC® / PENTAC®-FH</i>	Continuo	Epicycloide	Costante	Variabile	Variabile	Dentro l'utensile	Inclinazione del tagliente
<i>Kurvez</i>	Singolo	Arco di cerchio	Costante	Variabile	Variabile	Utensile con protuberanza	Differenza di raggio
<i>Arcoid</i>	Singolo	Arco di cerchio	Variabile	Variabile	Variabile	Cinematica	Inclinazione del tagliente
<i>5-cut</i>	Singolo	Arco di cerchio	Variabile	Variabile	Costante	della macchina	Differenza di raggio
<i>Completing</i>	Singolo	Arco di cerchio	Variabile	Costante	Costante	Cinematica	Inclinazione del tagliente
<i>Wiener 2-spur</i>	Singolo	Arco di cerchio	Costante	Variabile	Variabile	Dentro l'utensile	Differenza di raggio
<i>Wiener 1-spur</i>	Singolo	Arco di cerchio	Costante	Variabile	Variabile	Dentro l'utensile	Differenza di raggio
<i>Semi-Completing</i>	Singolo	Arco di cerchio	Costante	Variabile	Variabile	Dentro l'utensile	Differenza di raggio

Tabella 1.2: Classificazione dei principali modelli di ingranaggi conici[2]

Capitolo 2

Procedura di misura degli ingranaggi

Per poter garantire la qualità del processo di produzione degli ingranaggi essi devono essere sottoposti ad ispezioni atte a garantire la bontà del processo produttivo. Principalmente gli obiettivi della misura degli ingranaggi possono essere i seguenti:

- Verificare il livello di precisione della ruota andando a confrontare le misure con le tolleranze richieste dal grado di accuratezza desiderato;
- Controllare il processo di produzione dell'ingranaggio, potendo così modificare i vari parametri delle macchine utensili utilizzate;
- Determinare eventuali distorsioni causate da trattamenti termici;
- Minimizzare i pezzi scartati, abbassando così i costi di produzione;

Oltre agli obiettivi appena elencati è importante anche ricordare che la misura degli ingranaggi è fondamentale per rientrare nelle specifiche di qualità secondo le regole imposte per ottenere i certificati ISO 9000 ff.(controllo

qualit ) e 14000 ff.(gestione ambientale delle aziende). Questo ha anche portato ad effettuare molte pi  misure di controllo di quante se ne facessero in passato [2].

Per i controlli sugli ingranaggi conici si fa riferimento alle norme ISO/TR 10064-1:2009 (Procedure per controllo e misura dei fianchi dei denti di ruote dentate coniche) e ISO 17485:2006 (Sistema ISO della precisione per ingranaggi conici).

2.1 Definizione delle grandezze di riferimento utili per la misura

Diametro di tolleranza d_t

Il diametro di tolleranza d_t   quel diametro misurato dove si intersecano la distanza media del cono dei contatti con il punto medio dell'altezza di lavoro del dente, come si pu  notare in figura(2.1)[8].

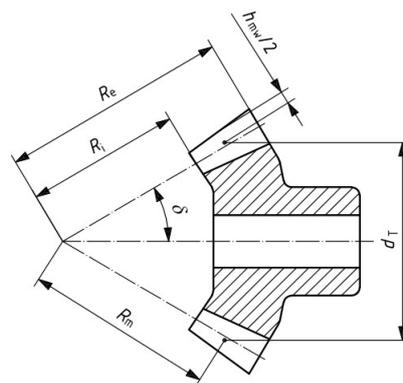


Figura 2.1: Diametro di tolleranza [8]

L'equazione (2.1) determina il valore di d_t sul pignone, mentre l'equazione

(2.2) è valida per la ruota condotta[8]:

$$dt_1 = dm_1 + (h_{am1} - h_{am2})\cos(\delta_1) \quad (2.1)$$

$$dt_2 = dm_2 + (h_{am2} - h_{am1})\cos(\delta_2) \quad (2.2)$$

Scostamento del passo sul singolo dente f_{pt}

È la differenza misurata sul fianco di un singolo dente dalla sua posizione teoricamente giusta rispetto al fianco corrispondente di un dente adiacente (misura del passo). Viene valutato da un tastatore che va a toccare due punti giacenti sulla stessa circonferenza di misura sui medesimi fianchi di due denti successivi tra loro. Se durante l'ispezione si misura un passo minore di quello teorico lo scostamento avrà segno negativo, al contrario il segno sarà positivo se la misura sarà maggiore del valore di riferimento.[8]

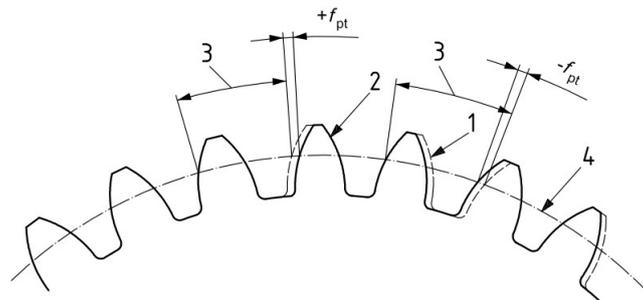


Figura 2.2: Definizione dello scostamento singolo del passo [8]

Nella figura (2.2) si possono definire i seguenti elementi:

1. Posizione teorica del fianco del dente
2. Posizione misurata del fianco
3. Passo circolare teorico
4. Diametro di tolleranza

Scostamento cumulativo del passo F_p

É la più grande differenza algebrica presente tra due valori di deviazione f_{pt} per uno specifico fianco del dente (destro o sinistro), senza distinzione sulla direzione dello scostamento. [8] Nella figura (2.3) si possono riconoscere:

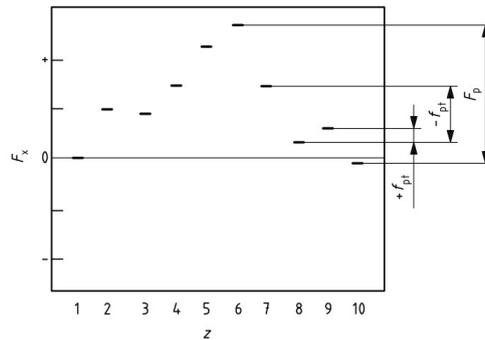


Figura 2.3: Grafico con i valori di scostamento da una singola prova [8]

- z numero del dente considerato
- f_{pt} scostamento del passo sul singolo dente
- F_p deviazione del passo
- F_p deviazione cumulativa del passo

Deviazione di runout F_r

É la differenza tra la massima e la minima distanza perpendicolare al cono dei contatti di un tastatore (sferico o conico) posizionato successivamente in ciascun vano dei denti, con la sonda che tocca entrambi i fianchi dello spazio tra i due denti approssimativamente sul diametro di tolleranza [8].

Scostamento superficiale di un singolo fianco del dente f_{is}

Rappresenta il valore più grande dello scostamento del fianco del dente valutato su un singolo passo, a seguito del filtraggio degli errori dovuti a eccentricità o effetto sinusoidale, misurata durante la misura del fianco mentre l'ingranaggio viene fatto ruotare [8].

Scostamento superficiale totale dei fianchi del dente F_{is}

É la deviazione totale, misurata tra il valore minimo e quello massimo durante un test di misura dei singoli fianchi, quando l'ingranaggio ruota per una rivoluzione [8].

2.2 Metodi e pratiche di misura

In questo paragrafo verranno descritte le pratiche e i metodi di misura raccomandati per l'ispezione di ingranaggi conici secondo la norma ISO/TR 10064-1:2009. Queste pratiche sono state riconosciute come affidabili dalla quasi totalità delle industrie produttrici di ingranaggi. Se non diversamente specificato, tutte le misurazioni sono prese e valutate al diametro di tolleranza d_t [9]. Per non avere misurazioni con errori è necessario affidarsi a personale specializzato, usare strumenti calibrati ed effettuare le prove in un ambiente controllato.

In precedenza, il controllo della forma del dente veniva effettuato con una procedura semi-empirica testando la superficie di contatto tra due denti. Ora, con l'avvento delle macchine di misura a controllo numerico è possibile testare in maniera oggettiva l'accettazione o meno di un ingranaggio se le misure ottenute rientrano o meno nelle tolleranze richieste dal grado di precisione

della ruota dentata aiutandosi con un percorso designato o tramite l'ausilio di una griglia di punti.

2.2.1 Misura dello scostamento del passo

Le misurazioni per determinare gli scostamenti singoli e cumulativi sul passo del dente f_{pt} e F_p vengono effettuate [9]:

- con riferimento all'asse di riferimento dell'ingranaggio;
- sul diametro di tolleranza d_t ;
- nella direzione specifica di tolleranza (all'interno del piano trasversale della ruota lungo l'arco del cerchio con diametro pari a d_t);

Le misure effettuate su diametri diversi da quello di tolleranza o in direzioni diverse devono essere corrette in modo tale da renderle uniforme a quelle fatte sul diametro di tolleranza e nella direzione di riferimento. Queste correzioni devono essere eseguite prima di confrontare i risultati delle misure con i relativi valori di tolleranza. Il passo dovrebbe essere misurato su entrambi i fianchi dei denti. Tuttavia, se si conosce il verso di rotazione della ruota durante il funzionamento, si può valutare solamente che il fianco caricato rientri in tolleranza, lasciando così la misura del lato non caricato del dente come test aggiuntivo necessario solamente a verificare la bontà della misura precedente. I parametri necessari alla rilevazione del passo circonferenziale possono essere trovati con due diversi metodi. Il metodo indexing, che utilizza un singolo tastatore, determina la posizione di ogni fianco del dente, relativamente ad un lato del dente di riferimento. Il comparatore a doppio tastatore, invece, compara la distanza tra due fianchi di denti adiacenti con la lunghezza misurata inizialmente tra due lati di denti di riferimento. Solitamente è preferito il metodo indexing per la sua semplicità di applicazione

e la sua precisione. Tuttavia per ingranaggi di grande diametro può essere preferito l'uso del comparatore. Le macchine di misura a coordinate senza dispositivo di rotazione possono essere anche usate per la misura del passo circonferenziale facendo fare al tastatore movimenti che vanno a simulare quelli che si avrebbero con il metodo indexing.

2.2.2 Misura del passo tramite metodo di indicizzazione

Il metodo index utilizza un sistema di indicizzazione angolare come ad esempio un encoder ottico o elettronico che permette di ruotare l'ingranaggio di un valore angolare pari al passo ($\frac{360}{z}$). La precisione di questo sistema deve essere coerente con il grado di precisione dell'ingranaggio. Il tastatore deve essere posizionato in maniera tale da toccare i fianchi dei denti in corrispondenza del diametro di tolleranza d_t e che raccolga i valori misurati nella direzione di misura specificata. Inoltre deve segnare un valore pari a zero mentre il dispositivo è a contatto con il fianco scelto come quello iniziale. Mentre l'ingranaggio ruota attorno al proprio asse la sonda entra ed esce dal vano del dente, valutando così per ogni incremento angolare la posizione del fianco del dente fino a che non si torna al dente iniziale.

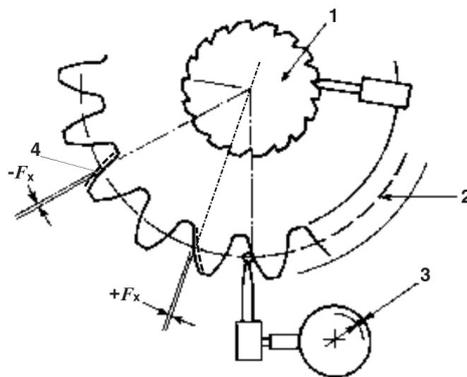


Figura 2.4: Schema della misura del passo con indicizzazione e singolo tastatore [9]

È pratica comune misurare al termine del ciclo per un'ultima volta il fianco del dente con cui si è iniziato il test, in maniera tale da chiudere il ciclo. Idealmente da quest'ultima misura bisognerebbe leggere un valore pari a zero, come nella prima misura. Nel caso in cui si ottenga uno scostamento eccessivamente diverso da quello ottenuto inizialmente, questo è sintomo di errori nella misura.

2.2.3 Misura del passo tramite comparatore

Il comparatore a doppio tastatore deve essere orientato in modo tale che le due sonde tocchino entrambi i fianchi di due denti adiacenti sul diametro di tolleranza. Un tastatore serve a stabilire la posizione di riferimento di uno dei due fianchi, mentre l'altro è orientato da un sistema meccanico o elettronico per misurare la variazione della sua posizione rispetto alla prima sonda. Il dispositivo viene tarato in modo tale da indicare zero quando entrambi i tastatori toccano la coppia di denti dalla quale si inizierà la misura.

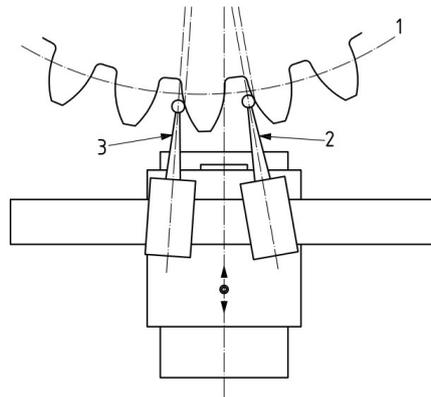


Figura 2.5: Misura del passo tramite comparatore a doppio tastatore [9]

2.2.4 Misura del runout (oscillazione)

L'oscillazione degli ingranaggi conici F_r viene misurata da uno specifico tastatore, che può essere un cono o una sfera, di grandezza sufficiente a toccare entrambi i fianchi di un vano dente in corrispondenza del diametro di tolleranza. Negli ingranaggi conici il runout viene misurato in una direzione perpendicolare al cono di base [9].

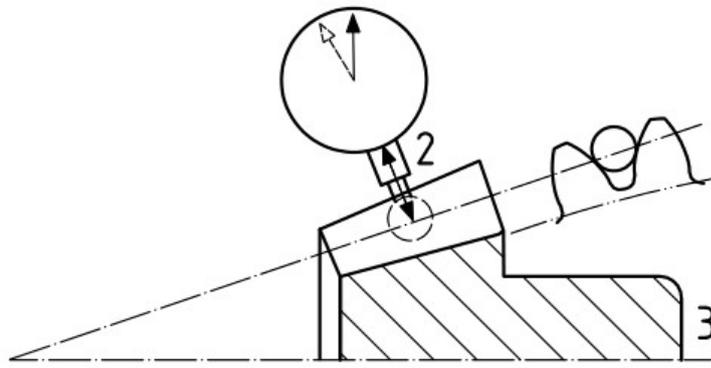


Figura 2.6: Misura del runout sul pignone [9]

La misura del runout può dare anche indicazioni per ciò che riguarda:

- eccentricità;
- errori di circolarità;
- oscillazione assiale;
- deviazioni sulla forma del fianco del dente;
- scostamenti sul passo;
- deviazione sulla larghezza del dente;

2.2.5 Misura del fianco del dente

La forma del fianco del dente di un ingranaggio conico può essere definita matematicamente e successivamente misurata tramite macchine di misura CNC o CMM con l'ausilio di uno specifico software. La forma del fianco può essere misurata con un percorso continuo oppure misurando specifici punti. Le traiettorie di misura si sviluppano in due direzioni, una perpendicolare e l'altra parallela all'angolo del cono di base. La misura tramite griglia invece sfrutta una mesh di punti discreti lungo la superficie del fianco dente. Questo tipo di ispezioni possono essere effettuate in ogni fase del processo produttivo per i seguenti scopi:

- valutare distorsioni dovute a trattamenti termici;
- analisi delle prestazioni dell'ingranaggio;
- effettuare delle modifiche al processo produttivo;

Misura tramite griglia di punti

Per determinare i dati di riferimento della griglia si possono usare due metodi:

- determinazione della superficie di misura tramite formule matematiche;
- ricavare la mesh di misura attraverso l'ispezione di un ingranaggio di riferimento con superficie 'teoricamente esatta';

Una volta ricavati i dati necessari è possibile definire i punti sulla superficie teoricamente esatta del fianco dente. Questa superficie è la stessa che si otterrebbe usando un macchinario senza errori di dimensione, oppure quella che hanno un pignone e una ruota che hanno dei profili perfettamente coniugati.

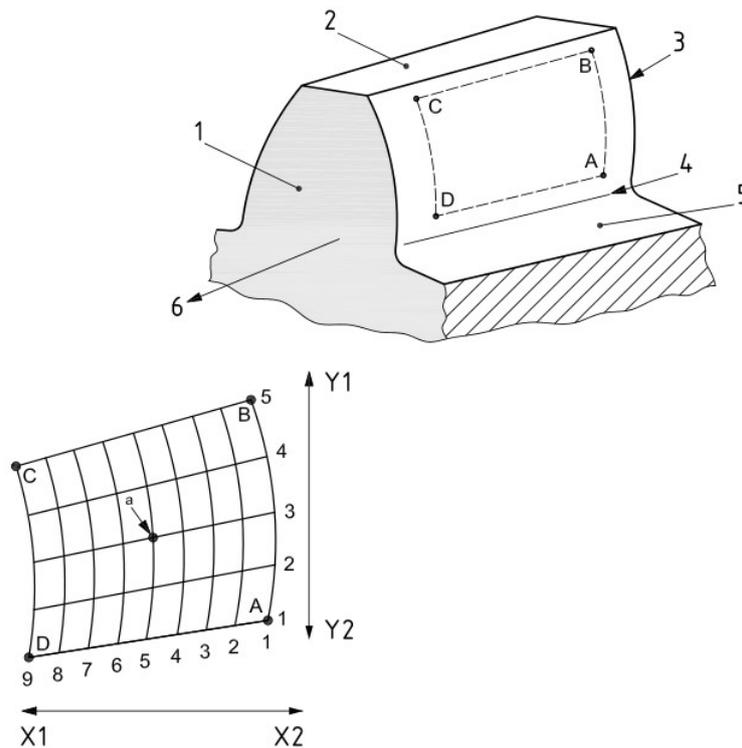


Figura 2.7: Mesh di misura [9]

La griglia dei punti viene creata per ragioni pratiche sul piano assiale dell'ingranaggio. Ogni punto viene poi proiettato tramite una rotazione attorno all'asse della ruota fino al fianco teorico del dente, di coordinate note. La griglia deve avere un numero sufficiente di punti tali da poter definire al meglio la superficie da misurare, senza però eccedere per evitare l'aumento del tempo di misura. Questi punti devono essere posizionati in modo tale da comprendere un'area la più estesa possibile, senza andare però a toccare la cresta o il fondo del dente, i raccordi o le due facce estreme. Le regole, con cui si definisce la mesh di misura, sono le seguenti [9]:

- per misure di controllo del processo si usa una griglia 5x9 (5 lungo l'altezza dente, 9 lungo la sua lunghezza);

- per analisi più approfondite come la valutazione del fianco o l'analisi del contatto si può usare una griglia con densità massima 39x39 punti. Un numero superiore non garantisce risultati migliori
- è raccomandato usare sempre un numero dispari di righe e colonne per la griglia in modo tale da definire un centro della mesh, corrispondente al diametro di tolleranza d_t ;
- in caso di smusso alla base dell'ingranaggio è necessario modificare la forma della griglia, con un poligono al fondo della mesh che replichi il cambio di geometria del dente;
- è raccomandabile che la distanza tra un punto e l'altro della griglia sia la metà del diametro del tastatore, per poter avere così dei dati di misura il più accurati possibile;

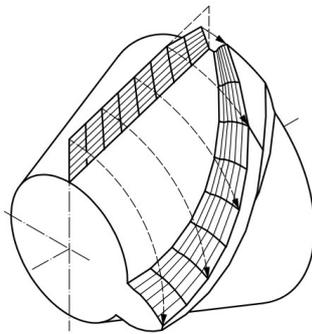


Figura 2.8: Proiezione della griglia sul fianco [9]

In figura (2.9) si può vedere il report della misura, dove vengono evidenziati graficamente gli scostamenti dei punti misurati rispetto a quelli teoricamente esatti.

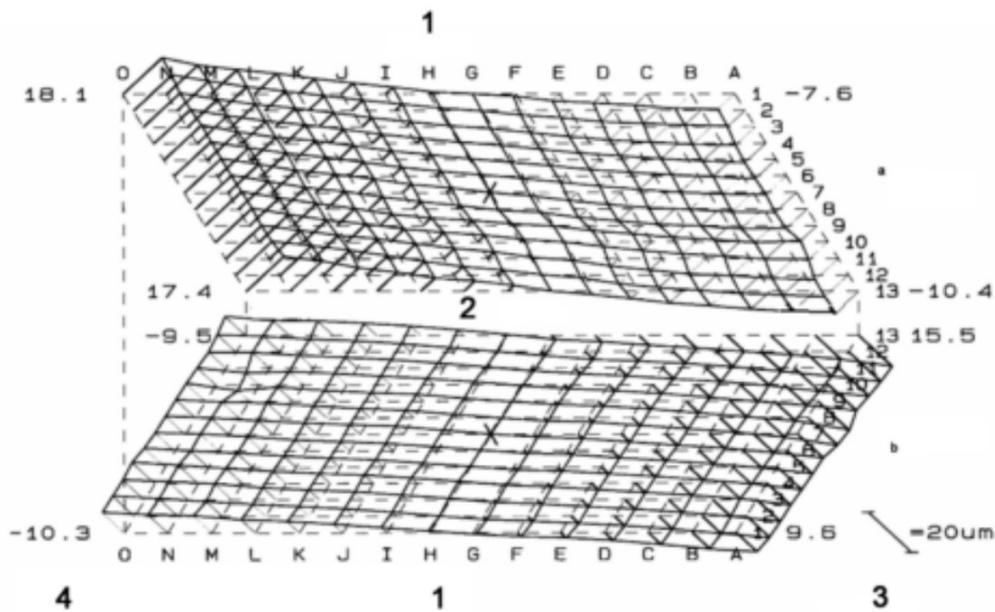


Figura 2.9: Report di misura [9]

Misura tramite traiettorie sul fianco

Il fianco del dente viene solitamente misurato con delle tracce che seguono il profilo dell'evolvente dalla cresta del dente alla radice e delle altre che seguono la lunghezza dello sviluppo (figura 2.10), in maniera simile a ciò che avviene per gli ingranaggi cilindrici. Bisogna scegliere un numero appropriato di traiettorie per poter definire al meglio la geometria del profilo da misurare. Solitamente si ha una sola traiettoria longitudinale e da tre a cinque profili lungo lo sviluppo dell'evolvente. Si possono avere più percorsi di misura nel caso di ispezioni più approfondite dell'ingranaggio.

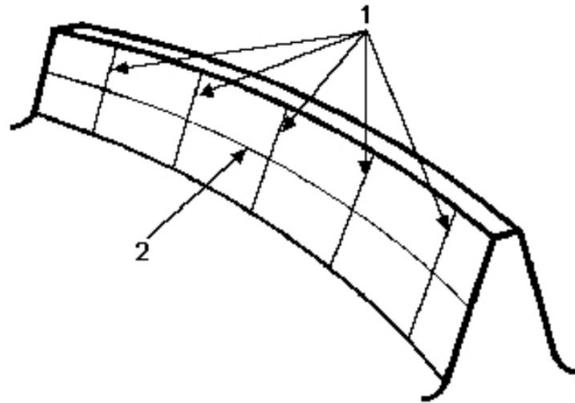


Figura 2.10: Traiettorie di misura del fianco dente [9]

2.2.6 Misura dello spessore del dente

La misura dello spessore del dente può essere effettuata tramite diverse procedure, dipendenti dall'accuratezza richiesta all'ispezione.

Misura tramite calibro

Questo tipo di ispezione viene effettuata prevalentemente su ingranaggi ancora grezzi. Questo strumento permette di misurare contemporaneamente l'addendum del dente sulla corda normale e la corda normale di larghezza dente, tramite due diversi corsoi. Il calibro viene fatto scorrere poi lungo tutta la lunghezza del dente per misurarne corda e addendum. Solitamente questa ispezione viene effettuata solo all'ingranaggio che viene tagliato per primo. Questo perché la ruota generata per prima segue le dimensioni teoricamente giuste, mentre quella tagliata successivamente viene generata tenendo conto del gioco previsto in progetto.

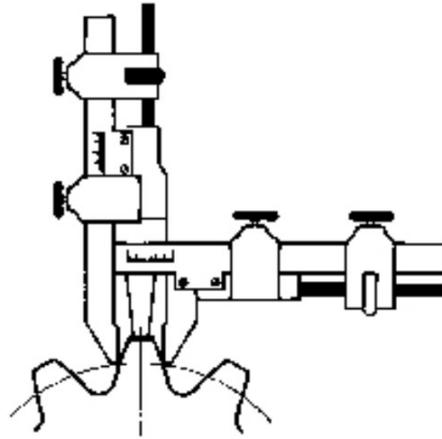


Figura 2.11: Misura tramite calibro della larghezza del dente [9]

Misura tramite macchina CNC o CMM

Con l'ausilio di specifici programmi queste macchine sono in grado di misurare la larghezza del dente andandola a verificare sul baricentro della mesh di misura, come si può vedere nella figura 2.7.

Misura della larghezza attraverso la valutazione del gioco

Tradizionalmente la valutazione della larghezza del dente è sempre stata effettuata mediante la misura del gioco tra le ruote posizionate su un banco prova di ingranamento o - più semplicemente - con le due ruote montate tra loro, con i due ingranaggi posizionati alla corretta distanza di montaggio, in modo tale da rispettare il gioco previsto in progetto. Un comparatore viene posizionato col suo asse perpendicolare al fianco del dente in corrispondenza del diametro esterno maggiore (vedi figura 2.12). Al pignone viene bloccata la rotazione, mentre la ruota condotta viene fatta oscillare finché i fianchi di pignone e ruota sono a contatto. Il comparatore misura in questo modo il gioco. L'operazione viene ripetuta tre o quattro volte, e il valore più piccolo

tra quelli ottenuti sarà quello scelto.



Figura 2.12: Misura del gioco di una coppia conica tramite comparatore [9]

2.3 Tolleranze

La norma ISO 17485:2006 definisce un sistema di classificazione che permette di determinare l'accuratezza geometrica di ingranaggi conici o ipoidi non assemblati e di coppie coniche. Questo sistema stabilisce i criteri dei vari gradi di precisione e i valori entro i quali queste norme hanno valore.

La norma definisce dieci gradi di precisione per gli ingranaggi conici, numerati da 2 a 11 in ordine di minor precisione (2 grado tolleranze più rigide, 11 grado tolleranze più lasche)[8].

Tra ognuno di questi gradi c'è una progressione geometrica nei valori di tolleranza. Il fattore di avanzamento tra due gradi di tolleranza successivi è pari a $\sqrt{2}$. Il valore richiesto è ottenuto moltiplicando l'equazione relativa al grado 4 per $\sqrt{2}^{(B-4)}$, dove B è il grado di precisione dell'ingranaggio[8].

Le equazioni che vanno a determinare questi valori limiti sono funzione del grado di precisione della ruota e valgono per i seguenti range di valori[8]:

- modulo medio normale (mmn) compreso tra 1 e 50 mm;
- numero di denti (z) compreso tra 5 e 400;
- diametro di tolleranza (dt) tra 5 e 2500 mm.

Per applicazioni particolari che escono dai valori limiti appena descritti non si fa riferimento alle norme ISO, determinando al contrario dei requisiti specifici al problema[8].

I valori risultanti dalle equazioni descritte in seguito seguono queste regole per quanto riguarda l'approssimazione[8]:

- se maggiori di 10 μm , si arrotonda all'intero più vicino;
- se compresi tra 10 e 5 μm , si arrotonda allo 0.5 μm più prossimo;
- se minori di 5 μm si approssima allo 0.1 μm più vicino;

2.3.1 Equazioni di tolleranza

Tutti i valori di tolleranza risultanti dalle seguenti formule sono da considerare nella sezione trasversale dell'ingranaggio sul diametro di tolleranza[8].

Scostamento del passo sul singolo dente f_{ptT}

La tolleranza per lo scostamento del passo sul singolo dente è valida considerando il valore assoluto. La formula per valutare questa tolleranza è la (2.3)[8]:

$$f_{ptT} = (0,003d_t + 0,3m_{mn} + 5)(\sqrt{2})^{(B-4)} \quad (2.3)$$

Tolleranza totale sullo scostamento cumulativo del passo F_{pT}

La tolleranza totale sullo scostamento cumulativo del passo circonferenziale fa riferimento all'equazione (2.4)[8]:

$$F_{pT} = (0,025d_t + 0,3m_{mn} + 19)(\sqrt{2})^{(B-4)} \quad (2.4)$$

Tolleranza di Runout F_{rT}

Il valore ammissibile limite per ciò che riguarda il runout è conseguenza dell'equazione (2.5)[8]:

$$F_{rT} = 0,8(0,025d_t + 0,3m_{mn} + 19)(\sqrt{2})^{(B-4)} \quad (2.5)$$

Tolleranza sullo scostamento superficiale di un singolo fianco del dente f_{isT}

Per determinare la tolleranza massima sulla mesh del singolo dente si possono usare tre metodi, che in ordine decrescente di precisione chiameremo A,B,C[8].

Il *Metodo A*, quello meno preciso, fa affidamento all'esperienza sulle misure di questo tipo per determinare l'accettazione o meno della misura, senza distinzione sul grado di accuratezza dell'ingranaggio.

Negli altri due metodi (*B* e *C*), lo scostamento più grande tra il valore minimo e quello massimo di scostamento rispetto la griglia ideale deve essere minore di un valore massimo detto f_{isTmax} . Lo scostamento minore non deve però essere inferiore a un valore minimo detto f_{isTmin} .

Il valore di f_{isTmax} è determinato dall'equazione (2.6)[8]:

$$f_{isTmax} = f_{is(design)} + (0, 375m_{mn} + 5, 0)(\sqrt{2})^{(B-4)} \quad (2.6)$$

Mentre quello di f_{isTmin} è dato dal minore tra i valori ottenuti dalle equazioni (2.7) e (2.8)[8]:

$$f_{isTmin} = f_{is(design)} - (0, 375m_{mn} + 5, 0)(\sqrt{2})^{(B-4)} \quad (2.7)$$

$$f_{isTmin} = 0 \quad (2.8)$$

La differenza tra *Metodo B* e *Metodo C* sta nella diversa determinazione di $f_{is(design)}$. Nel *Metodo B* questo valore è conseguenza di un'analisi del progetto e delle condizioni del test. Il *Metodo C* viene usato quando invece non si hanno dati per poter analizzare il progetto dell'ingranaggio il valore di $f_{is(design)}$ viene determinato dalla formula (2.9)[8]:

$$f_{is(design)} = qm_{mn} + 1, 5 \quad (2.9)$$

dove q è un valore tabellato dipendente dall'applicazione della ruota dentata.

Tolleranza sullo scostamento totale dei fianchi dei denti F_{isT}

La tolleranza totale sullo scostamento del singolo fianco, viene calcolata secondo l'equazione (2.10)[8]:

$$F_{isT} = F_{pT} + f_{isTmax} \quad (2.10)$$

2.4 Misurazioni raccomandate

A meno di specifici accordi tra le parti, non esiste una procedura obbligatoria per la misura e validazione delle coppie coniche. Tuttavia le normative[8] consigliano delle metodologie di ispezione per ciò che riguarda il numero minimo di misurazioni e la loro tipologia a seconda della grandezza da misurare e dal grado di accuratezza dell'ingranaggio. Queste raccomandazioni sono descritte nelle tabelle 2.1 e 2.2 [8].

Grandezza	Metodo di misura	N° minimo di misurazioni
Test basilari		
Passo singolo (SP)	Doppio tastatore	Tutti i denti
	Singolo tastatore	Tutti i denti
Passo cumulativo (AP)	Doppio tastatore	Tutti i denti
	Singolo tastatore	Tutti i denti
Runout (RO)	Tastatore a sfera	Tutti i denti
	Singolo tastatore - indicizzato	Tutti i denti
	Doppio tastatore - 180°	Tutti i denti
	Azione su entrambi i fianchi	Tutti i denti
Forma del dente (TF)	CMM o software CNC	Tre denti spazati equamente
Dimensioni		
Spessore del dente (TT)	Calibro per denti	Due denti spazati equamente
	Programma CMM dedicato	Tre denti spazati equamente
	Macchina di prova rotazione	Tre denti spazati equamente

Tabella 2.1: Numero minimo di misurazioni consigliate

Dimensioni dente	Modulo $\geq 1,0$ mm		
Misurazioni basilari (da effettuare per ogni grado di precisione)	TT e TF		
Precisione	Bassa	Media	Alta
Grado di precisione	11-9	8-5	4-2
Misurazioni minime	RO	SP e RO	SP e AP
Metodi alternativi	SP e AP		

Tabella 2.2: Metodi di misura a seconda del grado di precisione

Capitolo 3

Creazione del modello matematico su *Matlab*[®]

Una volta terminata la ricerca bibliografica relativa alle principali tipologie di ingranaggio conico presenti in commercio e alle relative metodologie di ispezione si è proceduto alla creazione di un modello matematico che potesse ricreare la geometria di una coppia conica in modo tale da avere un set di coordinate che inserite all'interno di una macchina di misura siano d'ausilio per l'ispezione e la misura di una ruota conica esistente.

È stato scelto di creare questo modello matematico con l'ausilio del software *Matlab*[®]. Nell'ambiente *Matlab*[®] è stato possibile creare uno script che, avendo come input un numero limitato di parametri definiti dall'utente, riesca a dare come risultato un numero di punti sufficiente a definire le superfici dell'ingranaggio conico desiderato.

Le fasi che hanno portato alla creazione di questo script sono stati i seguenti:

- definizione dei parametri minimi necessari a definire la geometria della coppia conica;

- ricerca degli algoritmi necessari a stabilire le principali grandezze geometriche degli ingranaggi;
- formulazione e definizione dell'evolvente sferica per poter così definire la superficie del fianco del dente;
- ricerca degli algoritmi di calcolo necessari a creare i vari tipi di spirale per le ruote a denti elicoidali;
- scrittura dell'algoritmo generatore delle coordinate della coppia conica;

3.1 Definizione dei parametri geometrici della coppia conica

Per determinare i parametri geometrici necessari alla costruzione del modello matematico della coppia conica ci si è affidati alle linee guida descritte nella norma ISO23509:2016[1]. Questa normativa cerca di definire, con un unico set di formule, le principali grandezze geometriche di tutti i tipi di coppie coniche esistenti, comprendendo anche gli ingranaggi ipoidi.

Questo standard ISO [1] differenzia il calcolo della geometria delle coppie coniche in quattro diversi algoritmi, dividendo così gli ingranaggi sia per ditta produttrice che per ruote ipoidi o ingranaggi senza disassamento degli assi.

- *Metodo 0*, riguardante qualunque coppia conica non ipoide;
- *Metodo 1* è l'algoritmo usato per le ruote ipoidi *Gleason*;
- *Metodo 2*, che permette il calcolo degli ingranaggi ipoidi *Oerlikon*
- *Metodo 3*, usato per gli ingranaggi ipoidi *Klinglenberg*;

Questi tre diversi algoritmi differiscono tra loro per la definizione del cono primitivo di ogni ingranaggio, mentre sono praticamente sovrapponibili per il calcolo delle grandezze rimanenti. A seconda del metodo utilizzato, e quindi in base al tipo di ingranaggio che si desidera definire, per il calcolo della geometria del cono primitivo si devono inserire dei dati iniziali diversi, come illustrato in tabella 3.1 [1].

Simbolo	Nome	Metodo 0	Metodo 1	Metodo 2	Metodo 3
Σ	Angolo tra gli alberi	X	X	X	X
a	Offset ipoide	0,0	X	X	X
$z_{1,2}$	Numero di denti	X	X	X	X
d_{m2}	Diametro primitivo medio ruota	-	-	X	-
d_{e2}	Diametro primitivo esterno ruota	X	X	-	X
b_2	Larghezza di fascia ruota	X	X	X	X
β_{m1}	Angolo medio spirale pignone	-	X	-	-
β_{m2}	Angolo medio spirale ruota	X	-	X	X
r_{c0}	Raggio di taglio	X	X	X	X
z_0	Numero di taglienti	X	X	X	X

Tabella 3.1: Dati iniziali per la definizione dei coni primitivi

Una volta definiti i coni primitivi della coppia conica è necessario dover anche calcolare per gli ingranaggi le restanti grandezze utili a descriverne la loro geometria, come ad esempio le larghezze dei denti, le loro altezze, gli angoli di addendum e dedendum e così via. Per definire queste restanti grandezze della coppia conica è indispensabile inserire un'altra serie di dati iniziali, descritti nella tabella 3.2 [1].

Data I		Data II	
Simbolo	Descrizione	Simbolo	Descrizione
α_{dD}	Angolo di pressione nominale, fianco caricato		
α_{dC}	Angolo di pressione nominale, fianco scarico		
$f_{\alpha lim}$	Fattore influenza angolo limite di pressione		
x_{hm1}	Coefficiente di modifica	c_{ham}	Fattore di addendum medio ruota
k_{hap}	Coefficiente di addendum	k_d	Fattore di profondità
k_{hfp}	Coefficiente di dedendum	k_c	Fattore di gioco primitivo
x_{smn}	Coefficiente di modifica larghezza dente	k_t	Fattore larghezza dente o
		W_{m2}	Larghezza media vano ruota
	$j_{mn}, j_{mt2}, j_{en}, j_{et2}$	Coefficiente di gioco di testa (sceglierne uno)	
θ_{a2}	Angolo di addendum ruota		
θ_{f2}	Angolo di dedendum ruota		

Tabella 3.2: Dati per la definizione della geometria restante della coppia conica

Nella tabella 3.2 sono presenti due tipi diversi di dati iniziali da utilizzare, detti *Data I* e *Data 2*. I primi fanno riferimento agli standard europei, mentre i secondi si riferiscono alle norme USA. Negli algoritmi è comunque presente un set di formule che permette di passare agevolmente da un tipo all'altro di dati iniziali [1]. In figura 3.1 si possono vedere questi dati rappresentati su una dentiera generatrice di riferimento [1].

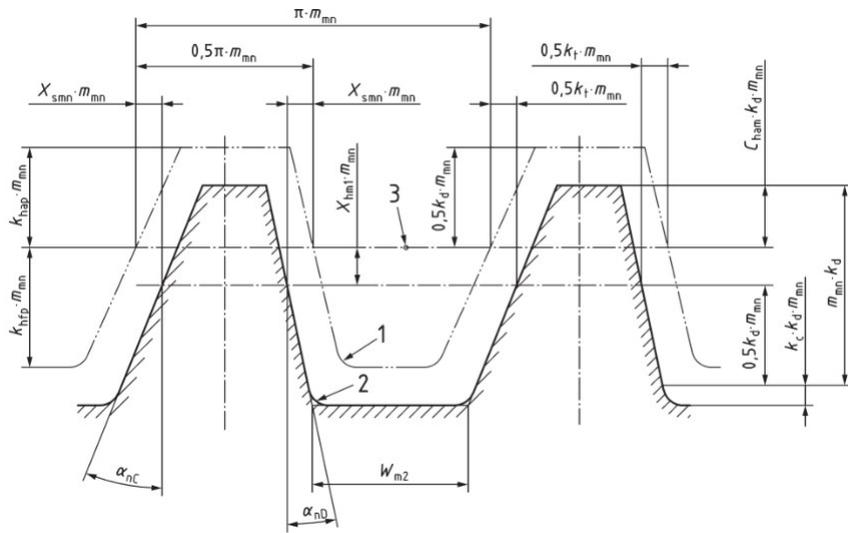


Figura 3.1: Dentiera generatrice di riferimento

Gli algoritmi[1] citati in questo paragrafo sono stati implementati in *Matlab*, dando così come output le principali grandezze geometriche della coppia conica. Le più importanti sono descritte nella figura 3.2 e in quella 3.3 e nelle tabelle 3.4 e 3.3.

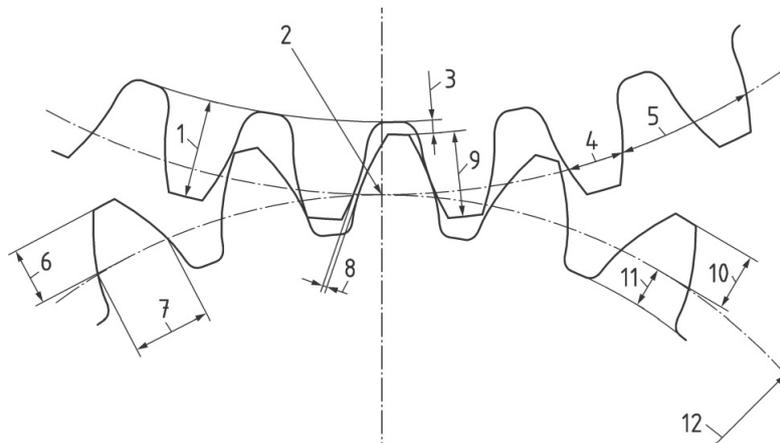


Figura 3.2: Principali grandezze nel piano trasversale[1]

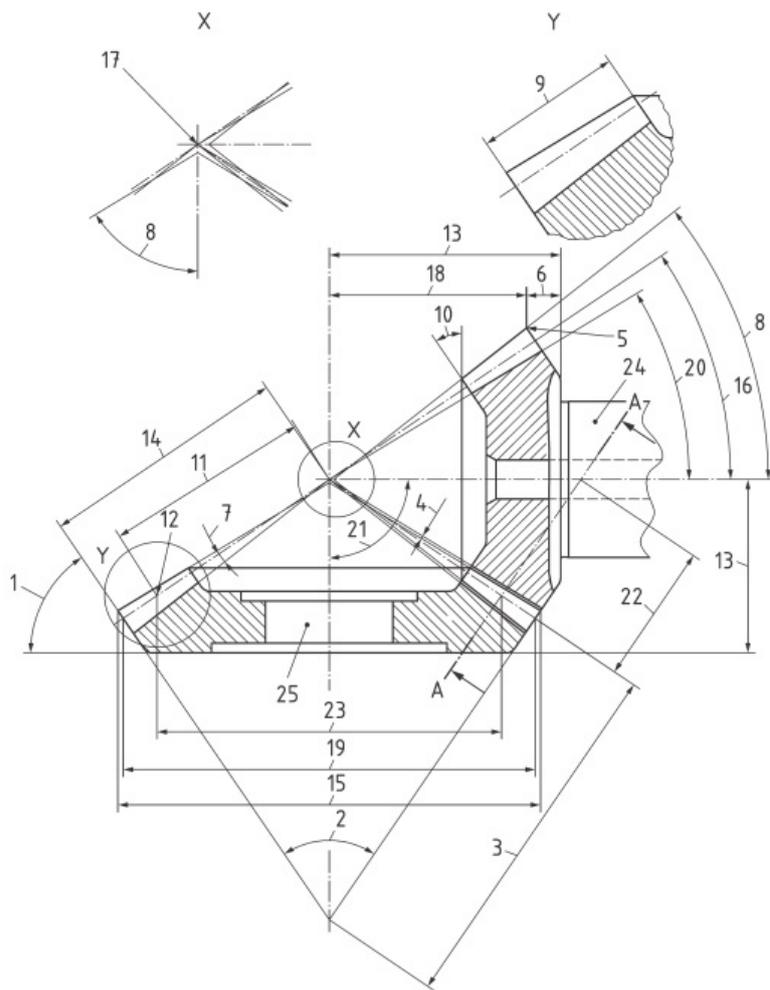


Figura 3.3: Principali grandezze nel piano assiale[1]

N°	Descrizione	N°	Descrizione
1	Altezza totale dente	7	Larghezza dente sulla corda
2	Punto di contatto	8	Gioco primitivo
3	Gioco di testa	9	Altezza di lavoro
4	Larghezza circonferenziale dente	10	Addendum
5	Passo circolare	11	Dedendum
6	Addendum	12	Raggio primitivo equivalente

Tabella 3.3: Grandezze nel piano trasversale, fig 3.2

N°	Descrizione	N°	Descrizione
1	Angolo posteriore	14	Spigolo esterno del cono
2	Angolo del cono posteriore	15	Diametro esterno
3	Distanza del cono posteriore	16	Angolo del cono primitivo
4	Gioco di testa	17	Vertice del cono primitivo
5	Distanza di testa	18	Distanza riferimento di testa dal vertice
6	Distanza di riferimento di testa	19	Diametro primitivo esterno
7	Angolo di dedendum	20	Angolo cono di fondo
8	Angolo cono di testa	21	Angolo tra gli alberi
9	Larghezza di fascia	22	Raggio primitivo equivalente
10	Angolo frontale	23	Diametro primitivo medio
11	Spigolo medio del cono	24	Pignone
12	Punto medio	25	Ruota
13	Distanza di montaggio		

Tabella 3.4: Grandezze nel piano assiale, fig 3.3

In figura 3.4 viene riassunto, tramite un diagramma a blocchi, il procedimento di calcolo delle grandezze geometriche secondo le procedure della norma ISO 23509:2016.

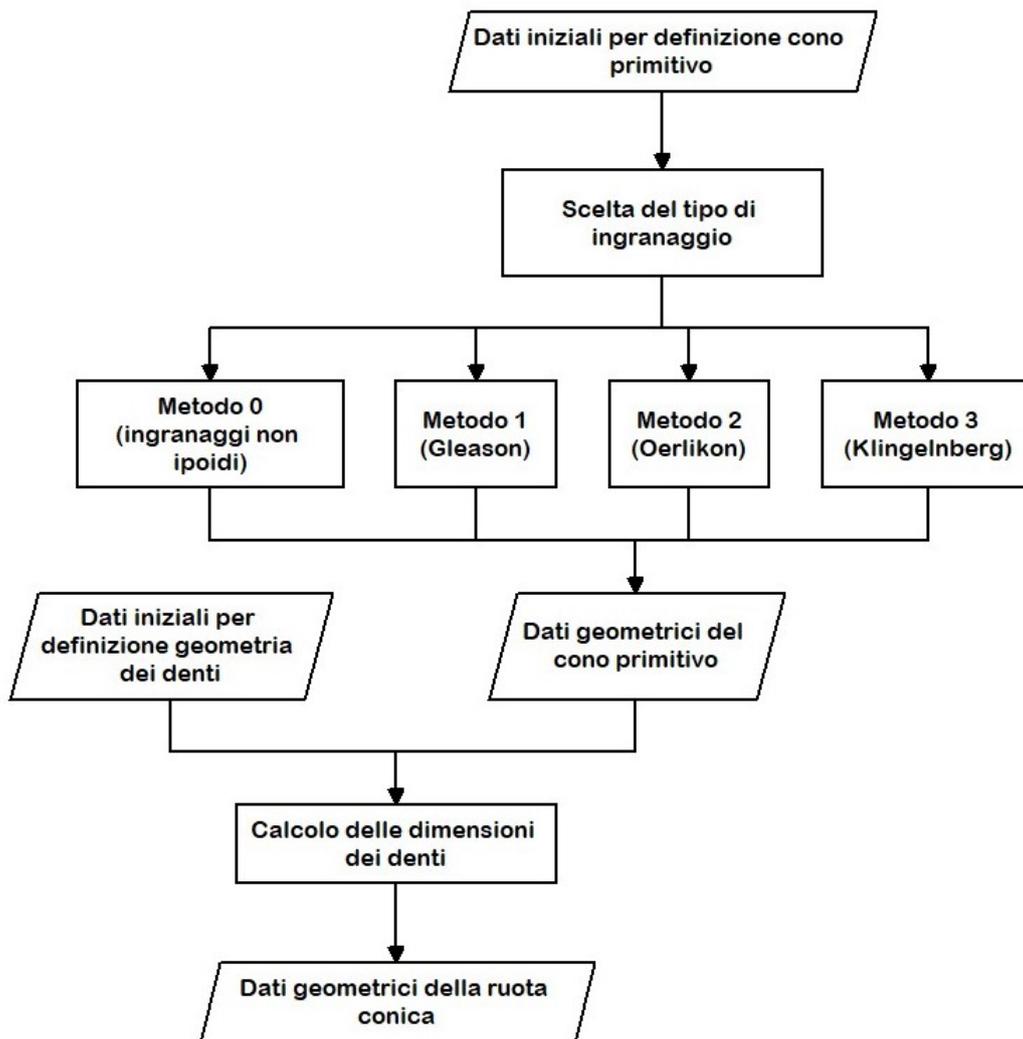


Figura 3.4: Schema di calcolo delle dimensioni di una coppia conica

3.2 Modellazione degli ingranaggi in *Matlab*[®]

Una volta calcolati i dati geometrici principali della coppia conica si è potuto procedere alla creazione di uno script *Matlab*[®] capace di creare un modello tridimensionale degli ingranaggi conici calcolati tramite le procedure descritte nel paragrafo precedente. Da questo modello è stato possibile ricavare le coordinate geometriche utili all'ispezione di una coppia conica.

I passi principali per la realizzazione di questo modello sono stati:

1. *definizione della geometria bidimensionale di un elemento unitario dell'ingranaggio*, formato da metà dente più metà vano;
2. *ripetizione dell'elemento singolo sull'intera circonferenza*, ottenendo così una superficie associabile ad una faccia della ruota;
3. *estrusione della geometria lungo la superficie conica*, tenendo conto anche della *'torsione'* dovuta alla presenza di denti elicoidali;

Questi passaggi sono stati effettuati sia per la realizzazione del pignone (*Ruota 1*) sia della ruota condotta (*Ruota 2*).

3.2.1 Definizione della geometria unitaria e ripetizione lungo la circonferenza

Per definire il modello tridimensionale di un ingranaggio conico si è partiti considerando l'elemento geometrico più piccolo che compone la sua geometria. Si può considerare come *'elemento base'* della schema di una qualsiasi ruota dentata quello formato da mezzo dente più mezzo vano. Si può fare questa assunzione perché partendo da questo primo schema geometrico si può ottenere per simmetria la forma del dente intero, e riportando sull'intera

circonferenza il singolo dente, si può ottenere la forma finale della superficie dell'ingranaggio.

Questa geometria unitaria è formata da tre curve:

- *arco di cerchio di base*, che forma il semivano;
- *ramo di evolvente sferica*, che genera il fianco del dente;
- *arco di cerchio di testa*, che forma la testa del semidente;

Per semplificare il modello è stato deciso di non considerare il raggio di fondo dente e lo smusso di testa del dente, data anche la loro non importanza nella fase di controllo geometrico del fianco dell'ingranaggio.

Nella figura 3.5 viene illustrato l'elemento geometrico unitario da cui si è partiti per la modellazione della ruota conica.

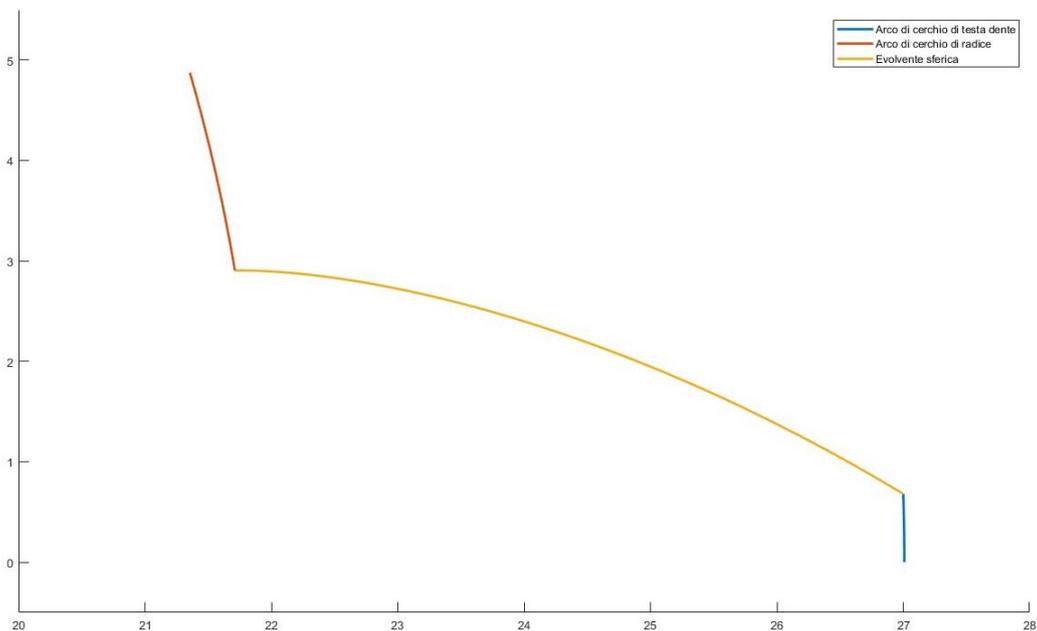


Figura 3.5: Geometria unitaria dell'ingranaggio

La modellazione è iniziata tracciando un'evolvente sferica di primo tentativo, usando le formule descritte nelle equazioni (3.1), (3.2),(3.3) [3]:

$$x = R\cos(\beta\sin(\delta_b))\sin(\delta_b)\cos(\beta) + R\sin(\beta\sin(\delta_b))\sin(\beta) \quad (3.1)$$

$$y = R\cos(\beta\sin(\delta_b))\sin(\delta_b)\cos(\beta) - R\sin(\beta\sin(\delta_b))\sin(\beta) \quad (3.2)$$

$$z = R\cos(\beta\sin(\delta_b))\cos(\delta_b) \quad (3.3)$$

dove:

- R , distanza lungo lo spigolo del cono di base;
- δ_b , semiangolo del cono di base, ottenuto dalla seguente relazione $\sin(\delta_b) = \sin(\delta_p)\cos(\alpha)$, con α angolo di pressione e δ_p semiangolo del cono dei contatti ;
- β , angolo di rotolamento del cono per la generazione dell'evolvente;

Per questa prima evolvente è stato scelto arbitrariamente un angolo di rotolamento β pari a 90° , in modo tale da avere una curva che supera abbondantemente il raggio di taglio esterno. La curva tracciata con le equazioni (3.1),(3.2),(3.3) [3] inizia in corrispondenza dell'incrocio tra l'asse x e la circonferenza di base, avente raggio pari alla distanza della sezione dal vertice del cono primitivo moltiplicata per il seno del semiangolo del cono di base. Tracciata l'evolvente è necessario limitarla tra le circonferenze di taglio esterno ed interno dell'ingranaggio, i cui raggi sono stati calcolati precedentemente. Si possono verificare due casi diversi per il "taglio" dell'evolvente:

- se $\delta_b < \delta_{ded}$, la circonferenza di base avrà raggio minore di quella di troncatura interna dell'ingranaggio. Il fianco del dente sarà dunque formato solamente dalla porzione di evolvente compresa tra le circonferenze di

addendum e dedendum. Solitamente questo caso si verifica nella ruota condotta;

- se $\delta_b > \delta_{ded}$, la circonferenza di base avrà raggio maggiore di quella di troncatura interna dell'ingranaggio. Il fianco del dente sarà dunque formato dalla porzione di evolvente compresa tra le circonferenze di addendum e quella di base. Per semplificare il modello la porzione del fianco del dente compresa tra il cerchio di base e quello di troncatura interna è stata approssimata con un segmento di retta il cui prolungamento sarà passante per il centro dell'ingranaggio. Solitamente questo caso si verifica nel pignone;

Una volta delimitato il fianco del dente è stato necessario ruotare l'evolvente rispetto il centro della ruota dentata per permettere così che l'asse x fosse anche l'asse di simmetria del primo dente generato nello script. È stato necessario ruotare l'evolvente di un angolo pari a quello relativo a metà della larghezza del dente sulla circonferenza dei contatti s_{mn} . Il passo successivo è stato tracciare i due archi di circonferenza. L'arco di radice è stato tracciato dal punto avente raggio pari a quello di dedendum e angolo polare pari a $\frac{180^\circ}{n^\circ \text{denti}}$ e termina in corrispondenza dell'inizio del fianco del dente. L'arco di testa invece parte dal punto terminale dell'evolvente e, con raggio pari a quello del cerchio di testa, termina nel punto di intersezione con l'asse x. Si è così ottenuta la geometria unitaria dell'ingranaggio come rappresentata in figura 3.5.

Il passo successivo è stato '*specchiare*' rispetto l'asse x la geometria unitaria appena ottenuta in modo tale da ottenere lo schema dell'ingranaggio considerato lungo il valore del suo passo circonferenziale, come si può vedere in figura 3.6.

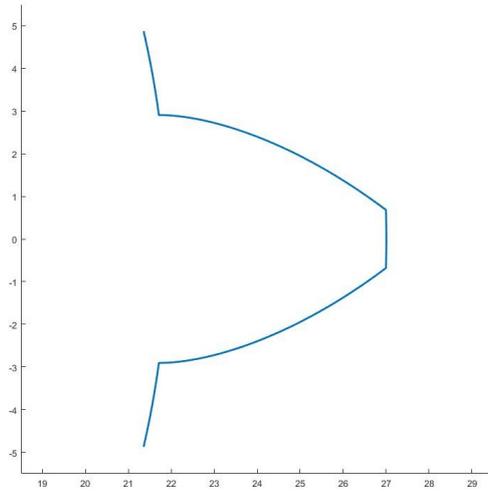


Figura 3.6: Geometria unitaria specchiata

L'ultimo passo per la creazione della superficie dell'ingranaggio è stata la ripetizione circolare della geometria lungo l'angolo giro in maniera tale da ottenere lo schema in figura 3.7.

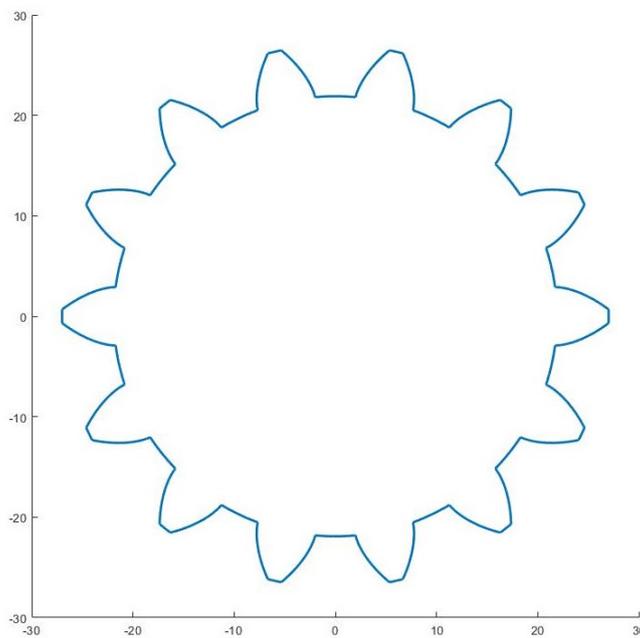


Figura 3.7: Superficie dell'ingranaggio

3.2.2 Estrusione dell'ingranaggio

Una volta definita la geometria di una singola superficie dell'ingranaggio si è potuto procedere alla creazione del modello tridimensionale della coppia conica. La realizzazione dell'estrusione è formata sostanzialmente dai seguenti passaggi fondamentali:

- *ingrandimento della sezione della ruota*, in modo proporzionale all'aumento del raggio che avrebbe il tronco di cono equivalente a quello formato dall'ingranaggio;
- *rotazione della sezione*, contemporanea alla discesa dei vari layer lungo l'asse z , seguendo così il percorso tracciato dalla spirale del dente. Operazione non effettuata per gli ingranaggi a denti dritti;

Ingrandimento della sezione

L'ingrandimento della superficie dell'ingranaggio è stata possibile grazie al riconducimento delle varie grandezze della coppia conica allo spigolo dei tre tronconi fondamentali (esterno, interno e primitivo), proiettando lo spigolo del cono lungo il piano orizzontale e verticale. In questo modo per ogni valore dello spigolo del cono R , compreso tra i valori R_i ed R_e , si sono potute calcolare le grandezze necessarie alla definizione della singola superficie dell'ingranaggio per ciascun layer, ottenendo così l'ingrandimento della sezione per ciascun livello.

Rotazione della sezione

L'ultimo step da completare prima della definizione completa del modello tridimensionale dell'ingranaggio è la rotazione di ogni sezione lungo la crea-

zione dei vari layer. Per definire questa rotazione si è partiti dalla creazione della traccia dei denti sul piano dei contatti.

Come spiegato nel capitolo 1, a seconda del metodo di fabbricazione la traccia del dente avrà forma diversa. Se il vano viene creato tramite *Face milling* la traccia sarà un arco di cerchio, se invece il taglio avviene attraverso il *Face Hobbing* il dente avrà la forma di un arco di epicotroide o di evolvente di cerchio (più raro). L'algoritmo usato dalla norma ISO 23509 [1] definisce le grandezze fondamentali per definire queste curve. Tali dati sono descritti nella figura 3.8 e nella tabella 3.5.

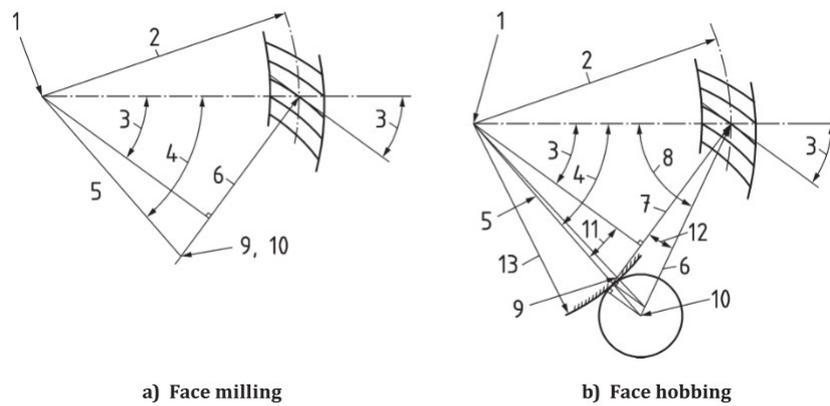


Figura 3.8: Geometria del taglio tramite *Face milling* (sx) e *Face hobbing* (dx) [1]

N°	Descrizione	N°	Descrizione
1	Centro dell'ingranaggio	8	Angolo ausiliario λ
2	Distanza media cono ruota R_{m2}	9	Centro di curvatura
3	Angolo spirale medio ruota β_{m2}	10	Centro di taglio
4	Angolo intermedio	11	Angolo ausiliario η_1
5	Distanza tra centro di taglio e centro ruota	12	Angolo tagliente ν
6	Raggio di taglio	13	Raggio di base epicicloide
7	Raggio medio di curvatura dente		

Tabella 3.5: Grandezze nel piano trasversale, fig 3.8

Per la creazione delle spirali bisogna tenere conto che questi dati geometrici fanno riferimento al piano dei contatti della coppia conica. Infatti, nella figura 3.8 i raggi a cui si fa riferimento sono le distanze esterna e interna degli spigoli del cono primitivo della ruota condotta. Nella creazione in *Matlab*[®] di queste spirali si è dovuto quindi tenere conto sia della rotazione che hanno i due ingranaggi durante il loro funzionamento, sia del verso delle due eliche, ma anche dell'offset relativo tra i due ingranaggi nel caso di ruote ipoidi, come si può notare negli schemi in figura 3.9.

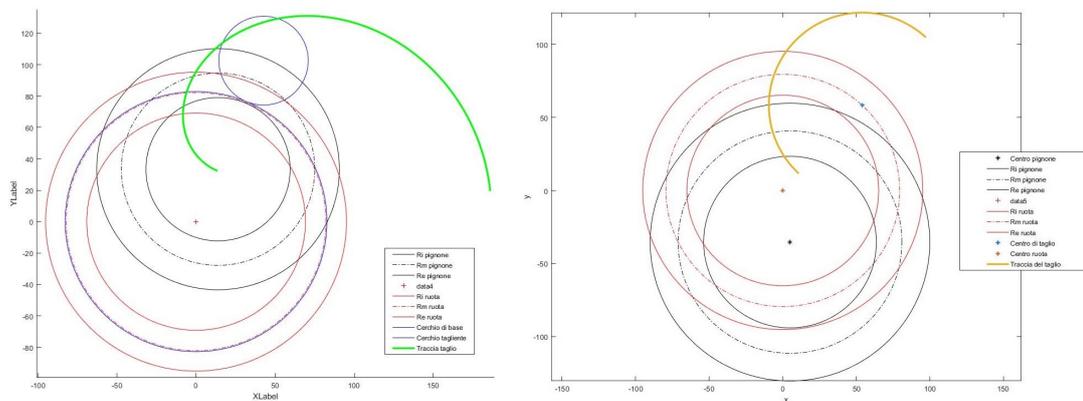


Figura 3.9: Traccia del dente con *Face milling* (dx) e *Face hobbing* (sx)

Una volta delimitata la traccia del dente tra la distanza interna e quella esterna dei due ingranaggi si è misurato l'incremento angolare tra inizio e fine della traccia del dente. Questo valore angolare è stato poi proiettato sul cono dei due ingranaggi con l'equazione 3.4 [10]:

$$\theta_{spirale} = \frac{\theta_{traccia}}{\sin(\delta_p)} \quad (3.4)$$

dove δ_p è il semiangolo del cono primitivo di ciascun ingranaggio.

Quest'angolo è stato poi usato per ottenere la rotazione di ciascun layer rispetto al precedente dando così come risultato il dente con forma a spirale.

Rifinizione del modello 3D

Una volta terminata l'estrusione del fianco del dente si sono create le superfici per la chiusura superiore e inferiore del dente, in modo tale da avere come risultato la superficie intera delle due ruote dentate, non solo quella del fianco che è l'unica interessata alla misura.

Nelle figure 3.10 e 3.11 si possono vedere due esempi di ingranaggi conici creati attraverso questo script.

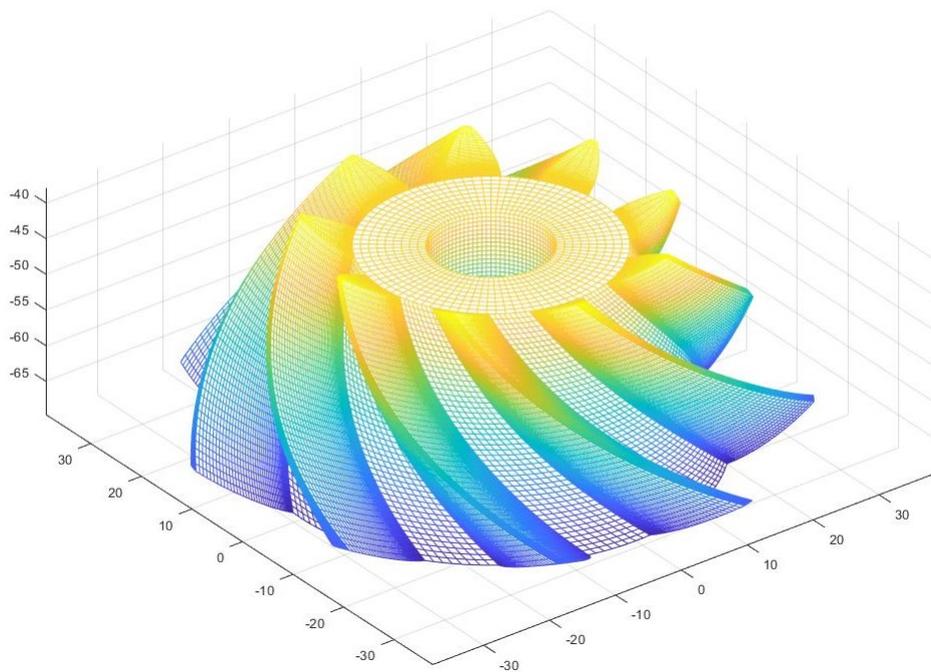


Figura 3.10: Modello tridimensionale del pignone

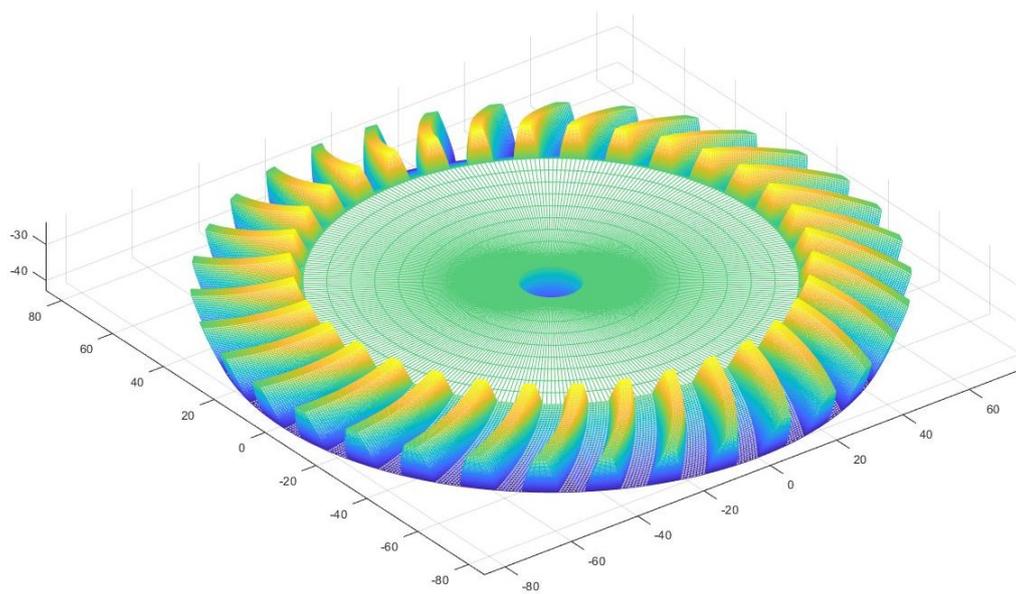


Figura 3.11: Modello tridimensionale della ruota

Capitolo 4

Ispezione e verifica del modello

Matlab[®]

Terminata la modellazione della coppia conica tramite *Matlab*[®] si è potuto procedere alla verifica del modello. Per poterlo validare è stato necessario confrontare i dati ottenuti dallo script *Matlab*[®] con delle geometrie di coppie coniche identiche, considerabili come *'teoricamente esatte'*. Non essendo stato possibile effettuare tale verifica con dei modelli reali di ingranaggi conici si è eseguito un confronto tra il modello matematico generato in *Matlab*[®] e dei CAD aventi stessa geometria generati con un software terzo. Per la creazione di questi CAD si è utilizzato il software *KISSsoft*[®], mentre per la verifica del modello si è usato il programma di misura *ArcoCad*[®] dell'azienda *MetroStaff S.R.L.*

4.1 Generazione dei modelli CAD

Per generare i modelli CAD ci si è affidati all'uso congiunto di due software: *KISSsoft*[®] e *SolidWorks*[®]. Il primo programma genera dei modelli

tridimensionali delle ruote dentate in formato *.stp* sfruttando gli algoritmi della norma ISO 23509:2016. Queste geometrie 3D sono state poi allineate all'interno dell'ambiente di *SolidWorks*[®], creando così i prototipi CAD degli ingranaggi desiderati.

All'interno dell'interfaccia di *KISSsoft*[®] è possibile inserire i parametri iniziali necessari a determinare la geometria della coppia conica. Questi dati iniziali sono del tutto simili a quelli che vengono immessi negli algoritmi di calcolo della norma ISO 23509:2016. Utilizzando poi queste procedure di calcolo il software determina tutte le misure geometriche degli ingranaggi.

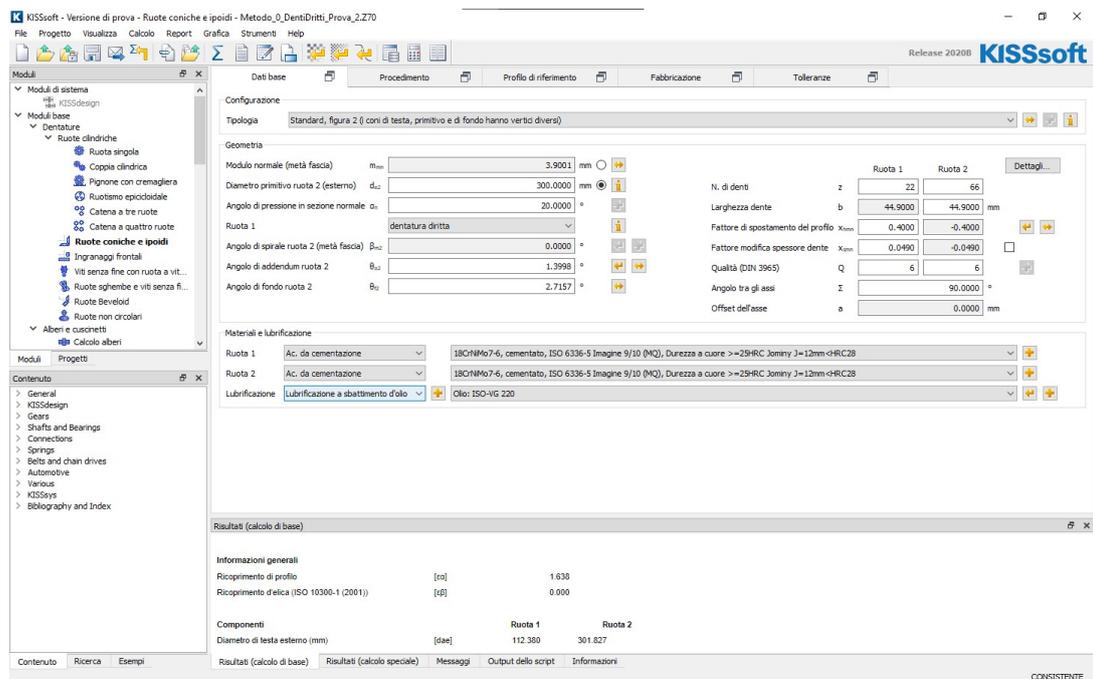


Figura 4.1: Interfaccia di *KISSsoft*[®]

Una volta terminato il calcolo il programma può generare il modello tridimensionale della coppia conica, che sarà poi possibile esportare in formato *.stp*.

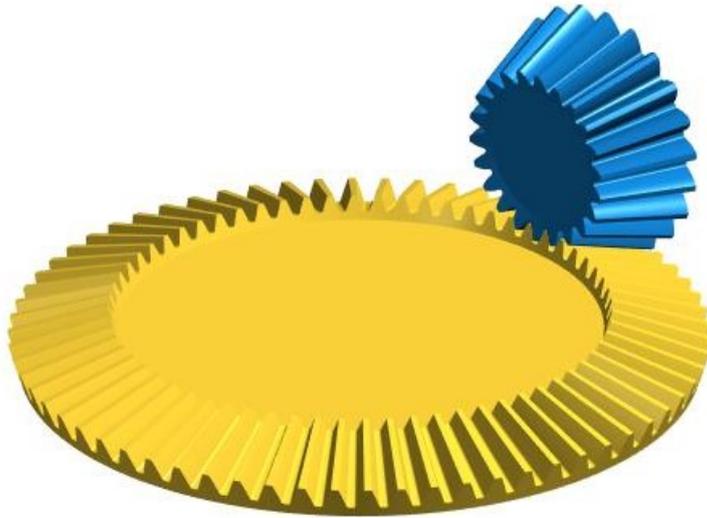


Figura 4.2: Modelli solidi creati da *KISSsoft*[®]

Una volta esportati, i modelli *.stp* sono stati allineati al modello creato in *Matlab*[®] per avere coerenza tra CAD e coordinate di misura. Quest'operazione è stata effettuata usando il software *SolidWorks*[®]. Il file creato in *SolidWorks*[®] è stato poi inserito nel programma di misura per effettuare le ispezioni.

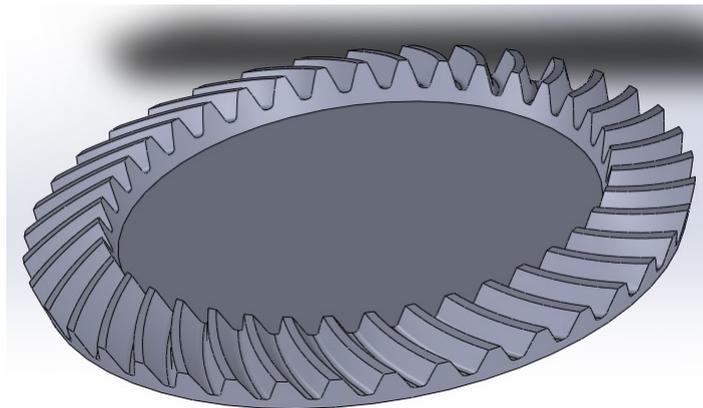


Figura 4.3: Modello CAD generato in *SolidWorks*[®]

4.2 Confronto tra i due modelli

Per validare il modello creato tramite il codice *Matlab*[®] è stato effettuato un confronto tra ingranaggi generati con quest'ultima procedura e dei modelli CAD corrispondenti creati secondo i passaggi esposti nel paragrafo precedente. Questa comparazione è stata fatta utilizzando il software di misura *ArcoCad*[®] dell'azienda *MetroStaff S.R.L.* Questo programma, che nasce come software di comando per macchine di misura a controllo numerico, se utilizzato su un comune personal computer permette di simulare il processo di misura su dei modelli CAD importati dall'esterno, emulando così l'ispezione metrologica di un pezzo reale tramite macchina CNC. Per la validazione del modello si è deciso di misurare solamente la superficie del fianco dei denti delle ruote dentate.

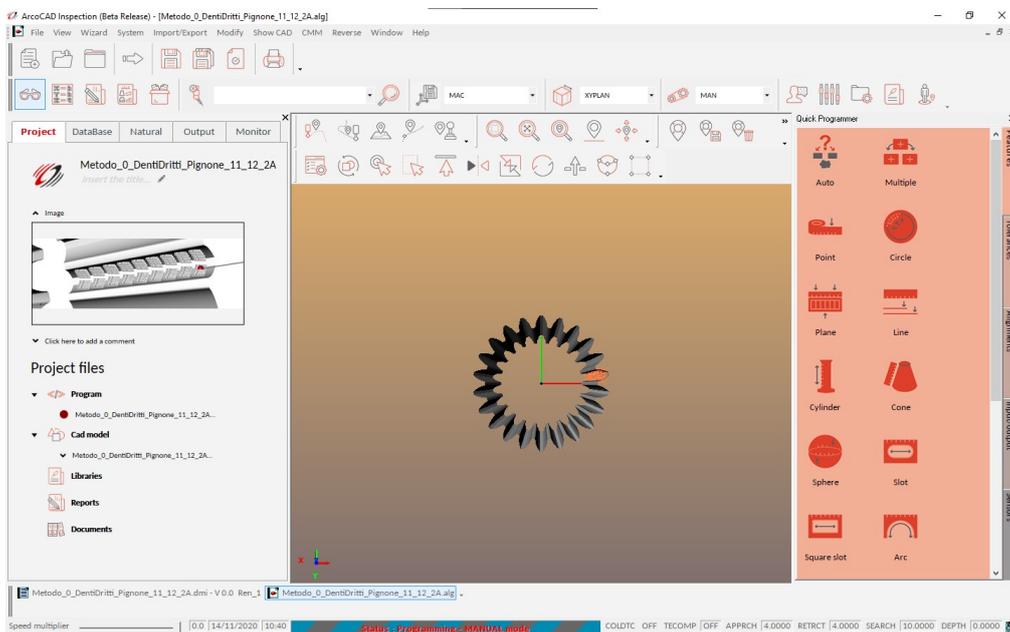


Figura 4.4: Interfaccia d grafica di *ArcoCad*[®]

In questo caso il modello CAD rappresenta la geometria *teoricamente esatta* dell'ingranaggio oggetto di ispezione, mentre tramite lo script *Matlab*[®]

sono state ricavate le coordinate dei punti che la macchina di misura andrebbe a "toccare" durante l'ispezione di un ingranaggio reale. Lo scostamento che viene misurato durante quest'operazione rappresenta la differenza, espressa come distanza euclidea, tra i punti misurati e la geometria *teoricamente esatta*. Le coordinate sono state esportate dal modello *Matlab*[®] secondo una griglia di punti rettangolare posizionata sui fianchi del dente, come suggerito dalla norma ISO/TR 10064-1:2009. La griglia scelta ha dimensioni 5x9.

I passaggi effettuati per l'ispezione del modello sono stati i seguenti:

1. *Importazione del modello CAD desiderato;*
2. *Selezione di un sensore di misura, ne è stato scelto uno ideale a diametro nullo, in modo tale da avere la possibilità di misurare qualsiasi punto della superficie senza aver problemi di interferenze tra modello e sonda ;*
3. *Allineamento del sensore e dichiarazione di inizio misura alla macchina (passaggio in CNC mode);*
4. *Importazione della griglia di misura, esportata precedentemente da Matlab[®] sotto forma di file .txt;*
5. *Lancio del programma CNC di misura;*

Tutti i passaggi elencati nei punti da 1 a 4 possono essere svolti tramite interfaccia grafica, il software provvede autonomamente a creare il listato contenente le operazioni che deve effettuare la macchina di misura. Un esempio di codice è visibile in figura4.5.

```

16 SNSET/CLRSRF,OFF
17 FLY/5.0000
18 FEDRAT/MESVEL,MMPS,3.5
19 FEDRAT/POSVEL,PCENT,0.50
20 FEDRAT/ROTVEL,PCENT,0.75
21 FEDRAT/SCNVEL,PCENT,0.75
22 ACLRAT/MESACL,PCENT,0.75
23 ACLRAT/POSACL,PCENT,0.75
24 GEOALG/CPARLN,ROUND
25 VA(SAXESMODE_ON)=ALGDEF/'SAXESMODE',.TRUE.
26 VA(SAXESMODE_OFF)=ALGDEF/'SAXESMODE',.FALSE.
27 SNSET/VA(SAXESMODE_ON)
28 EQUATE/D(MAC),DA(MAC)
29 $$ *** End of default section ***
30 MODE/PROG,MAN
31 SNSLCT/S(P_1)
32 D(DAT_1) = TRANS/XORIG,0.0000,YORIG,0.0000,ZORIG,0.0000
33 EQUATE/D(MAC),DA(MAC)
34 EQUATE/D(DAT_1),DA(DAT_1)
35
36 F(GSU_1)=FEAT/GSURF
37 G(ALL_THE_MODEL)=GEOM/OFFSET,0.0000
38 F(GSU_1)=FEAT/GEOM,G(ALL_THE_MODEL),CART
39 MEAS/GSURF,F(GSU_1),90
40 PTMEAS/CART,37.1152,2.0200,111.2944,-0.38250553,0.91724555,0.11113114
41 PTMEAS/CART,38.0979,2.5162,110.9517,-0.45173650,0.88184941,0.13518783
42 PTMEAS/CART,39.0658,3.1004,110.5998,-0.50900703,0.84651852,0.15594305
43 PTMEAS/CART,40.0163,3.7652,110.2387,-0.55819096,0.81113854,0.17457695
44 PTMEAS/CART,40.9470,4.5055,109.8685,-0.60164500,0.77538813,0.19182426
45 PTMEAS/CART,38.5768,2.1045,115.6358,-0.38374870,0.91667235,0.11157390
46 PTMEAS/CART,39.6032,2.6243,115.2777,-0.45304552,0.88110354,0.13566985
47 PTMEAS/CART,40.6138,3.2362,114.9099,-0.51043667,0.84555564,0.15649305
48 PTMEAS/CART,41.6062,3.9327,114.5325,-0.55975193,0.80992680,0.17520376
49 PTMEAS/CART,42.5778,4.7084,114.1455,-0.60314574,0.77406401,0.19245812
50 PTMEAS/CART,40.0384,2.1890,119.9772,-0.38480911,0.91627501,0.11118479

```

Figura 4.5: Esempio di codice di misura

Una volta che il software ha terminato l'esecuzione del programma di misura è possibile valutare i risultati dell'ispezione tramite delle etichette che compaiono a video in corrispondenza dei punti definiti dalla griglia importata da *Matlab*[®], come si può vedere in figura 4.6.

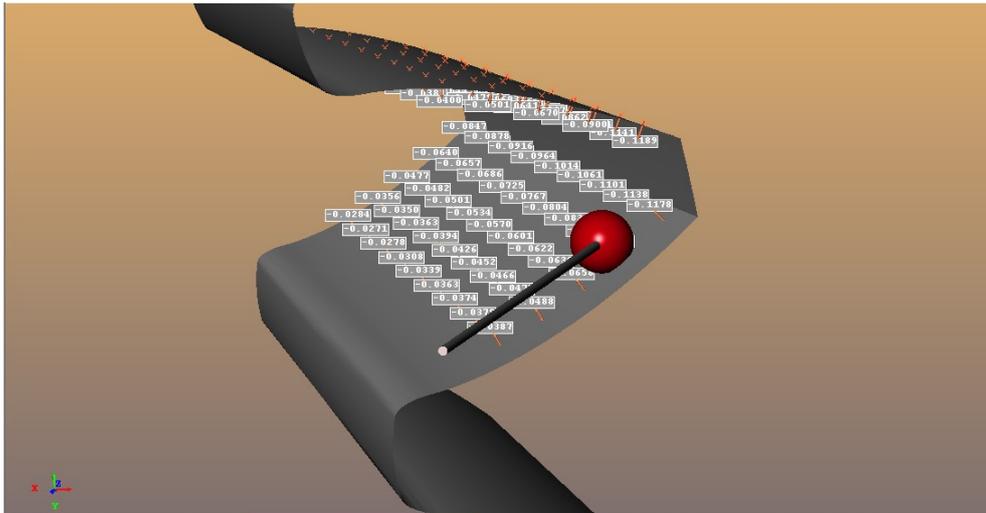


Figura 4.6: Risultati dell'ispezione

4.3 Ingranaggi sottoposti a ispezione

Per la validazione del modello generato in *Matlab*[®] sono state fatte delle ispezioni su cinque diversi tipi di ingranaggi, uno a denti dritti generata secondo il *Metodo 0*, mentre gli altri quattro sono degli ingranaggi a denti spiroidali o ipoidi, uno per ciascun metodo di calcolo della norma ISO 23509:2016.

Le caratteristiche geometriche di tali ruote dentate sono descritte nelle tabelle 4.1, 4.2, 4.3.

Coppia 1 - Metodo 0 - Denti dritti		
Grandezza	Pignone 1	Ruota 2
N° denti	22	66
Angolo tra gli alberi Σ	90°	
Offset tra gli assi	0 mm	
Diametro esterno cono primitivo	-	300 mm
Larghezza di fascia	-	44.9 mm
Angolo medio di spirale	-	0°
Raggio di taglio r_{c0}	-	-
Numero di taglienti z_0 (solo Face Hobbing)	-	-
Angolo di pressione nominale α_c	20°	
Angolo di pressione nominale α_d	20°	
Fattore del limite di angolo di pressione	0	
Coefficiente addendum	1	
Coefficiente dedendum	1.25	
Fattore di correzione del profilo	0.4	
Fattore di correzione del profilo	0.049	
j_{en}	0	
Rastrematura dente	Standard	
Verso spirale	-	-

Tabella 4.1: Dati geometrici della coppia conica 1

Coppia 2 - Metodo 0 - Denti Spiroidali FH		
Grandezza	Pignone 1	Ruota 2
N° denti	14	39
Angolo tra gli alberi Σ	90°	
Offset tra gli assi	0 mm	
Diametro medio cono primitivo	-	176.893 mm
Larghezza di fascia	-	25.4 mm
Angolo medio di spirale	-	35°
Raggio di taglio r_{c0}	114.3 mm	
Numero di taglienti z_0 (solo Face Hobbing)	5	
Angolo di pressione nominale α_c	20°	
Angolo di pressione nominale α_d	20°	
Fattore del limite di angolo di pressione	0	
Coefficiente addendum	1	
Coefficiente dedendum	1.25	
Fattore di correzione del profilo	0.505	
Fattore di correzione del profilo	0.046	
j_{en}	0	
Rastrematura dente	Altezza dente costante	
Verso spirale	Destra	Sinistra
Tipo di spirale	Epicycloide	

Tabella 4.2: Dati geometrici della coppia conica 2

Coppia 3 - Metodo 0 - Denti Spiroidali FM		
Grandezza	Pignone 1	Ruota 2
N° denti	14	39
Angolo tra gli alberi Σ		90°
Offset tra gli assi		0 mm
Diametro medio cono primitivo	-	176.893 mm
Larghezza di fascia	-	25.4 mm
Angolo medio di spirale	-	35°
Raggio di taglio r_{c0}		114.3 mm
Numero di taglienti z_0 (solo Face Hobbing)		-
Angolo di pressione nominale α_c		20°
Angolo di pressione nominale α_d		20°
Fattore del limite di angolo di pressione		0
Coefficiente addendum		1
Coefficiente dedendum		1.25
Fattore di correzione del profilo		0.505
Fattore di correzione del profilo		0.046
j_{en}		0
Rastrematura dente		Duplex
Verso spirale	Destra	Sinistra
Tipo di spirale	Arco di cerchio	

Tabella 4.3: Dati geometrici della coppia conica 3

4.4 Risultati dell'ispezione

La validazione del modello è stata effettuata misurando i fianchi di due denti opposti degli ingranaggi descritti nel precedente paragrafo. La misura è stata eseguita seguendo le procedure indicate dalla norma ISO 10064-1:2009 [9], descritte nel paragrafo 2.2.5 di questo testo. È stata creata una griglia di punti 5x9 su ciascuno dei fianchi ispezionati, cercando di seguire al meglio le raccomandazioni dettate dalla normativa. È possibile identificare sul fianco del dente i punti della griglia di misura tramite due indici i e j . Il primo numera i punti lungo la sezione trasversale del dente, mentre il secondo identifica i punti lungo la larghezza di fascia della ruota dentata. L'ordine di questa griglia viene descritto in figura 4.7.

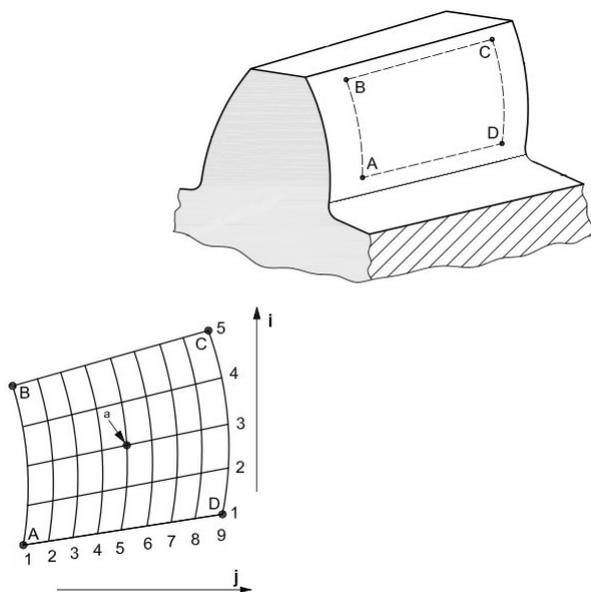


Figura 4.7: Numerazione degli indici della griglia di misura

Riferendoci alla figura 4.7 i punti A e B si trovano verso la cima del tronco di cono, mentre C e D si trovano verso la base dell'ingranaggio.

Algoritmo di Best-Fitting

Per andare a correggere micro-errori di allineamento tra i due modelli *ArcoCad*[®] possiede al suo interno un algoritmo, detto di "*Best-Fit*", che attraverso piccole rotazioni delle coordinate di misura inserite nel programma attorno ai tre assi trova l'allineamento tra i due modelli che genera minor errore.

4.4.1 Coppia conica 1

In tabella 4.4 e 4.5 vengono esposti i risultati delle misure effettuate sulla coppia conica a denti dritti i cui dati sono stati descritti nella tabella 4.1.

Metodo 0 - Denti dritti - Pignone											
Dente 1						Dente 11					
Fianco sx			Fianco dx			Fianco dx			Fianco sx		
<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]
1	1	-0,0007	1	1	0,0007	1	1	-0,0007	1	1	0,0007
1	2	0,0006	1	2	-0,0006	1	2	0,0006	1	2	-0,0006
1	3	-0,0002	1	3	0,0002	1	3	-0,0002	1	3	0,0002
1	4	-0,0009	1	4	0,0009	1	4	-0,0009	1	4	0,0009
1	5	-0,0026	1	5	0,0026	1	5	-0,0026	1	5	0,0026
2	1	-0,0007	2	1	0,0007	2	1	-0,0007	2	1	0,0007
2	2	0,0006	2	2	-0,0006	2	2	0,0006	2	2	-0,0006
2	3	-0,0003	2	3	0,0003	2	3	-0,0003	2	3	0,0003
2	4	-0,0008	2	4	0,0008	2	4	-0,0008	2	4	0,0008
2	5	-0,0027	2	5	0,0027	2	5	-0,0027	2	5	0,0027
3	1	-0,0007	3	1	0,0007	3	1	-0,0007	3	1	0,0007
3	2	0,0006	3	2	-0,0006	3	2	0,0006	3	2	-0,0006
3	3	-0,0003	3	3	0,0003	3	3	-0,0003	3	3	0,0003
3	4	-0,0009	3	4	0,0009	3	4	-0,0009	3	4	0,0009
3	5	-0,0028	3	5	0,0028	3	5	-0,0028	3	5	0,0028

4	1	-0,0007	4	1	0,0007	4	1	-0,0007	4	1	0,0007
4	2	0,0006	4	2	-0,0006	4	2	0,0006	4	2	-0,0006
4	3	-0,0002	4	3	0,0002	4	3	-0,0002	4	3	0,0002
4	4	-0,0009	4	4	0,0009	4	4	-0,0009	4	4	0,0009
4	5	-0,0028	4	5	0,0028	4	5	-0,0028	4	5	0,0028
5	1	-0,0006	5	1	0,0006	5	1	-0,0006	5	1	0,0006
5	2	0,0005	5	2	-0,0005	5	2	0,0005	5	2	-0,0005
5	3	-0,0003	5	3	0,0003	5	3	-0,0003	5	3	0,0003
5	4	-0,0010	5	4	0,0010	5	4	-0,0010	5	4	0,0010
5	5	-0,0029	5	5	0,0029	5	5	-0,0029	5	5	0,0029
6	1	-0,0005	6	1	0,0005	6	1	-0,0005	6	1	0,0005
6	2	0,0004	6	2	-0,0004	6	2	0,0004	6	2	-0,0004
6	3	-0,0003	6	3	0,0003	6	3	-0,0003	6	3	0,0003
6	4	-0,0009	6	4	0,0009	6	4	-0,0009	6	4	0,0009
6	5	-0,0030	6	5	0,0030	6	5	-0,0030	6	5	0,0030
7	1	-0,0004	7	1	0,0004	7	1	-0,0004	7	1	0,0004
7	2	0,0003	7	2	-0,0003	7	2	0,0003	7	2	-0,0003
7	3	-0,0002	7	3	0,0002	7	3	-0,0002	7	3	0,0002
7	4	-0,0010	7	4	0,0010	7	4	-0,0010	7	4	0,0010
7	5	-0,0031	7	5	0,0031	7	5	-0,0031	7	5	0,0031
8	1	-0,0003	8	1	0,0003	8	1	-0,0003	8	1	0,0003
8	2	0,0002	8	2	-0,0002	8	2	0,0002	8	2	-0,0002
8	3	-0,0003	8	3	0,0003	8	3	-0,0003	8	3	0,0003
8	4	-0,0010	8	4	0,0010	8	4	-0,0010	8	4	0,0010
8	5	-0,0032	8	5	0,0032	8	5	-0,0032	8	5	0,0032
9	1	-0,0002	9	1	0,0002	9	1	-0,0002	9	1	0,0002
9	2	0,0001	9	2	-0,0001	9	2	0,0001	9	2	-0,0001
9	3	-0,0003	9	3	0,0003	9	3	-0,0003	9	3	0,0003
9	4	-0,0010	9	4	0,0010	9	4	-0,0010	9	4	0,0010
9	5	-0,0034	9	5	0,0034	9	5	-0,0034	9	5	0,0034

Tabella 4.4: Risultati di misura Coppia 1 - Pignone

Metodo 0 - Denti dritti - Ruota

Dente 1						Dente 33					
Fianco sx			Fianco dx			Fianco dx			Fianco sx		
<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]									
1	1	0,0005	1	1	-0,0005	1	1	0,0005	1	1	-0,0005
1	2	0,0001	1	2	-0,0001	1	2	0,0001	1	2	-0,0001
1	3	0,0000	1	3	0,0000	1	3	0,0000	1	3	0,0000
1	4	0,0000	1	4	0,0000	1	4	0,0000	1	4	0,0000
1	5	-0,0002	1	5	0,0002	1	5	-0,0002	1	5	0,0002
2	1	0,0005	2	1	-0,0005	2	1	0,0005	2	1	-0,0005
2	2	0,0001	2	2	-0,0001	2	2	0,0001	2	2	-0,0001
2	3	0,0000	2	3	0,0000	2	3	0,0000	2	3	0,0000
2	4	0,0000	2	4	0,0000	2	4	0,0000	2	4	0,0000
2	5	-0,0002	2	5	0,0002	2	5	-0,0002	2	5	0,0002
3	1	0,0005	3	1	-0,0005	3	1	0,0005	3	1	-0,0005
3	2	0,0000	3	2	0,0000	3	2	0,0000	3	2	0,0000
3	3	0,0000	3	3	0,0000	3	3	0,0000	3	3	0,0000
3	4	0,0000	3	4	0,0000	3	4	0,0000	3	4	0,0000
3	5	-0,0002	3	5	0,0002	3	5	-0,0002	3	5	0,0002
4	1	0,0006	4	1	-0,0006	4	1	0,0006	4	1	-0,0006
4	2	0,0001	4	2	-0,0001	4	2	0,0001	4	2	-0,0001
4	3	0,0000	4	3	0,0000	4	3	0,0000	4	3	0,0000
4	4	-0,0001	4	4	0,0001	4	4	-0,0001	4	4	0,0001
4	5	-0,0003	4	5	0,0003	4	5	-0,0003	4	5	0,0003
5	1	0,0006	5	1	-0,0006	5	1	0,0006	5	1	-0,0006
5	2	0,0000	5	2	0,0000	5	2	0,0000	5	2	0,0000
5	3	0,0000	5	3	0,0000	5	3	0,0000	5	3	0,0000
5	4	0,0000	5	4	0,0000	5	4	0,0000	5	4	0,0000
5	5	-0,0003	5	5	0,0003	5	5	-0,0003	5	5	0,0003
6	1	0,0007	6	1	-0,0007	6	1	0,0007	6	1	-0,0007
6	2	0,0000	6	2	0,0000	6	2	0,0000	6	2	0,0000
6	3	0,0000	6	3	0,0000	6	3	0,0000	6	3	0,0000

6	4	0,0000	6	4	0,0000	6	4	0,0000	6	4	0,0000
6	5	-0,0003	6	5	0,0003	6	5	-0,0003	6	5	0,0003
7	1	0,0007	7	1	-0,0007	7	1	0,0007	7	1	-0,0007
7	2	0,0000	7	2	0,0000	7	2	0,0000	7	2	0,0000
7	3	0,0000	7	3	0,0000	7	3	0,0000	7	3	0,0000
7	4	-0,0001	7	4	0,0001	7	4	-0,0001	7	4	0,0001
7	5	-0,0002	7	5	0,0002	7	5	-0,0002	7	5	0,0002
8	1	0,0008	8	1	-0,0008	8	1	0,0008	8	1	-0,0008
8	2	0,0000	8	2	0,0000	8	2	0,0000	8	2	0,0000
8	3	0,0000	8	3	0,0000	8	3	0,0000	8	3	0,0000
8	4	-0,0001	8	4	0,0001	8	4	-0,0001	8	4	0,0001
8	5	-0,0003	8	5	0,0003	8	5	-0,0003	8	5	0,0003
9	1	0,0008	9	1	-0,0008	9	1	0,0008	9	1	-0,0008
9	2	0,0000	9	2	0,0000	9	2	0,0000	9	2	0,0000
9	3	0,0001	9	3	-0,0001	9	3	0,0001	9	3	-0,0001
9	4	0,0000	9	4	0,0000	9	4	0,0000	9	4	0,0000
9	5	-0,0003	9	5	0,0003	9	5	-0,0003	9	5	0,0003

Tabella 4.5: Risultati di misura Coppia 1 - Ruota

Come si può verificare nelle tabelle 4.4 e 4.5 i due modelli hanno degli scostamenti minori di $1 \mu m$ nei punti centrali della mesh, con $2 < i < 4$ e $2 < j < 8$, mentre nei punti esterni della mesh l'errore aumenta. Questo accade a causa della presenza nel modello CAD di smussi di testa e dei raccordi di piede del dente, che non sono stati inclusi negli ingranaggi generati dallo script *Matlab*[®]. Si può dunque concludere che per questa tipologia di ingranaggio si è riusciti ad ottenere una buona corrispondenza tra modello CAD e il modello generato con lo script *Matlab*[®]. I report grafici generati dal software *ArcoCad*[®] relativi a queste ispezioni sono disponibili per la consultazione negli allegati A e B rispettivamente per il pignone e la ruota.

Risultati del *best-fitting*

Applicando l'algoritmo di *Best-Fitting* sulle ispezioni effettuate per verificare la presenza di eventuali errori di allineamento sono state applicate delle rotazioni dell'ordine di $10^{-6}deg$ su ciascuno dei tre assi sia per il pignone sia per la ruota. Si può quindi dire che in questo caso i due modelli sono allineati tra loro.

4.4.2 Coppia conica 2

Nelle tabelle 4.6 e 4.7 sono esposti i risultati dell'ispezione effettuata sulla coppia conica 2, con denti spiroidali ad epicicloide, i cui dati principali sono mostrati nella tabella 4.2.

Metodo 0 - Denti Spiroidali FH - Pignone											
Dente 1						Dente 7					
Fianco sx			Fianco dx			Fianco dx			Fianco sx		
<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]
1	1	0,8851	1	1	-0,3489	1	1	0,8851	1	1	-0,3489
1	2	0,8622	1	2	-0,3229	1	2	0,8622	1	2	-0,3229
1	3	0,8424	1	3	-0,2941	1	3	0,8424	1	3	-0,2941
1	4	0,8261	1	4	-0,2606	1	4	0,8261	1	4	-0,2606
1	5	0,8145	1	5	-0,2217	1	5	0,8145	1	5	-0,2217
2	1	1,1261	2	1	-0,1249	2	1	1,1261	2	1	-0,1249
2	2	1,0993	2	2	-0,0946	2	2	1,0993	2	2	-0,0946
2	3	1,0758	2	3	-0,0613	2	3	1,0758	2	3	-0,0613
2	4	1,0561	2	4	-0,0230	2	4	1,0561	2	4	-0,0230
2	5	1,0417	2	5	0,0211	2	5	1,0417	2	5	0,0211
3	1	1,3014	3	1	0,0361	3	1	1,3014	3	1	0,0361
3	2	1,2704	3	2	0,0709	3	2	1,2704	3	2	0,0709
3	3	1,2427	3	3	0,1092	3	3	1,2427	3	3	0,1092
3	4	1,2194	3	4	0,1526	3	4	1,2194	3	4	0,1526
3	5	1,2016	3	5	0,2023	3	5	1,2016	3	5	0,2023
4	1	1,4094	4	1	0,1323	4	1	1,4094	4	1	0,1323
4	2	1,3737	4	2	0,1721	4	2	1,3737	4	2	0,1721
4	3	1,3414	4	3	0,2155	4	3	1,3414	4	3	0,2155
4	4	1,3139	4	4	0,2647	4	4	1,3139	4	4	0,2647
4	5	1,2925	4	5	0,3205	4	5	1,2925	4	5	0,3205
5	1	1,4521	5	1	0,1651	5	1	1,4521	5	1	0,1651
5	2	1,4113	5	2	0,2100	5	2	1,4113	5	2	0,2100
5	3	1,3739	5	3	0,2592	5	3	1,3739	5	3	0,2592

5	4	1,3418	5	4	0,3145	5	4	1,3418	5	4	0,3145
5	5	1,3160	5	5	0,3769	5	5	1,3160	5	5	0,3769
6	1	1,4310	6	1	0,1361	6	1	1,4310	6	1	0,1361
6	2	1,3847	6	2	0,1866	6	2	1,3847	6	2	0,1866
6	3	1,3420	6	3	0,2418	6	3	1,3420	6	3	0,2418
6	4	1,3046	6	4	0,3038	6	4	1,3046	6	4	0,3038
6	5	1,2741	6	5	0,3733	6	5	1,2741	6	5	0,3733
7	1	1,3479	7	1	0,0467	7	1	1,3479	7	1	0,0467
7	2	1,2958	7	2	0,1030	7	2	1,2958	7	2	0,1030
7	3	1,2472	7	3	0,1648	7	3	1,2472	7	3	0,1648
7	4	1,2042	7	4	0,2337	7	4	1,2042	7	4	0,2337
7	5	1,1684	7	5	0,3109	7	5	1,1684	7	5	0,3109
8	1	1,2021	8	1	-0,1022	8	1	1,2021	8	1	-0,1022
8	2	1,1438	8	2	-0,0398	8	2	1,1438	8	2	-0,0398
8	3	1,0892	8	3	0,0288	8	3	1,0892	8	3	0,0288
8	4	1,0401	8	4	0,1053	8	4	1,0401	8	4	0,1053
8	5	0,9985	8	5	0,1905	8	5	0,9985	8	5	0,1905
9	1	1,0023	9	1	-0,3086	9	1	1,0023	9	1	-0,3086
9	2	0,9375	9	2	-0,2396	9	2	0,9375	9	2	-0,2396
9	3	0,8762	9	3	-0,1638	9	3	0,8762	9	3	-0,1638
9	4	0,8205	9	4	-0,0795	9	4	0,8205	9	4	-0,0795
9	5	0,7725	9	5	0,0144	9	5	0,7725	9	5	0,0144

Tabella 4.6: Risultati di misura Coppia 2 - Pignone

Metodo 0 - Denti Spiroidali FH - Ruota											
Dente 1						Dente 19					
Fianco sx			Fianco dx			Fianco dx			Fianco sx		
<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]
1	1	0,1466	1	1	-0,7174	1	1	0,1466	1	1	-0,7174
1	2	0,1259	1	2	-0,6838	1	2	0,1260	1	2	-0,6838
1	3	0,1034	1	3	-0,6526	1	3	0,1034	1	3	-0,6525
1	4	0,0787	1	4	-0,6234	1	4	0,0787	1	4	-0,6235

1	5	0,0517	1	5	-0,5967	1	5	0,0517	1	5	-0,5967
2	1	-0,0693	2	1	-0,9731	2	1	-0,0693	2	1	-0,9732
2	2	-0,0938	2	2	-0,9345	2	2	-0,0938	2	2	-0,9345
2	3	-0,1204	2	3	-0,8982	2	3	-0,1205	2	3	-0,8982
2	4	-0,1495	2	4	-0,8644	2	4	-0,1494	2	4	-0,8644
2	5	-0,1810	2	5	-0,8331	2	5	-0,1809	2	5	-0,8330
3	1	-0,2157	3	1	-1,1615	3	1	-0,2157	3	1	-1,1616
3	2	-0,2445	3	2	-1,1174	3	2	-0,2445	3	2	-1,1174
3	3	-0,2755	3	3	-1,0757	3	3	-0,2755	3	3	-1,0757
3	4	-0,3092	3	4	-1,0366	3	4	-0,3092	3	4	-1,0366
3	5	-0,3457	3	5	-1,0005	3	5	-0,3457	3	5	-1,0004
4	1	-0,2974	4	1	-1,2866	4	1	-0,2973	4	1	-1,2866
4	2	-0,3306	4	2	-1,2365	4	2	-0,3307	4	2	-1,2366
4	3	-0,3666	4	3	-1,1892	4	3	-0,3666	4	3	-1,1891
4	4	-0,4053	4	4	-1,1446	4	4	-0,4053	4	4	-1,1446
4	5	-0,4471	4	5	-1,1031	4	5	-0,4471	4	5	-1,1030
5	1	-0,3150	5	1	-1,3487	5	1	-0,3150	5	1	-1,3486
5	2	-0,3532	5	2	-1,2924	5	2	-0,3532	5	2	-1,2924
5	3	-0,3942	5	3	-1,2390	5	3	-0,3942	5	3	-1,2390
5	4	-0,4383	5	4	-1,1885	5	4	-0,4383	5	4	-1,1885
5	5	-0,4858	5	5	-1,1413	5	5	-0,4858	5	5	-1,1413
6	1	-0,2689	6	1	-1,3480	6	1	-0,2689	6	1	-1,3479
6	2	-0,3123	6	2	-1,2851	6	2	-0,3122	6	2	-1,2851
6	3	-0,3587	6	3	-1,2254	6	3	-0,3587	6	3	-1,2253
6	4	-0,4085	6	4	-1,1687	6	4	-0,4085	6	4	-1,1687
6	5	-0,4620	6	5	-1,1154	6	5	-0,4620	6	5	-1,1155
7	1	-0,1598	7	1	-1,2850	7	1	-0,1599	7	1	-1,2851
7	2	-0,2086	7	2	-1,2155	7	2	-0,2086	7	2	-1,2155
7	3	-0,2607	7	3	-1,1490	7	3	-0,2608	7	3	-1,1490
7	4	-0,3165	7	4	-1,0859	7	4	-0,3165	7	4	-1,0859
7	5	-0,3763	7	5	-1,0262	7	5	-0,3763	7	5	-1,0263
8	1	0,0093	8	1	-1,1650	8	1	0,0093	8	1	-1,1649
8	2	-0,0453	8	2	-1,0881	8	2	-0,0453	8	2	-1,0881

8	3	-0,1035	8	3	-1,0146	8	3	-0,1035	8	3	-1,0146
8	4	-0,1656	8	4	-0,9446	8	4	-0,1656	8	4	-0,9446
8	5	-0,2320	8	5	-0,8782	8	5	-0,2320	8	5	-0,8782
9	1	0,2332	9	1	-0,9890	9	1	0,2331	9	1	-0,9890
9	2	0,1726	9	2	-0,9049	9	2	0,1726	9	2	-0,9049
9	3	0,1082	9	3	-0,8242	9	3	0,1082	9	3	-0,8243
9	4	0,0395	9	4	-0,7472	9	4	0,0395	9	4	-0,7472
9	5	-0,0338	9	5	-0,6740	9	5	-0,0338	9	5	-0,6740

Tabella 4.7: Risultati di misura Coppia 2 - Ruota

Leggendo i dati delle tabelle 4.6 e 4.7 si nota la presenza di uno scostamento importante che va da qualche centesimo di mm fino a raggiungere errori intorno al mm. Si nota su entrambi gli ingranaggi della coppia un andamento simile degli scostamenti: L'errore (in valore assoluto) tende a diminuire andando dalla radice verso la cresta del dente. In maniera analoga andando dalla cima dell'ingranaggio verso la sua base l'errore diminuisce in valore assoluto. Questi scostamenti sono probabilmente figli di una diversa gestione nella generazione delle spirali del dente (causando l'andamento dell'errore lungo la larghezza di fascia), ma anche di una diversa gestione dei giochi laterali che vanno ad influenzare l'andamento della larghezza del dente lungo le varie sezioni. I report grafici generati dal software *ArcoCad*[®] relativi a queste ispezioni sono disponibili per la consultazione negli allegati C per il pignone e D per la ruota.

Risultati del *best-fitting*

L'applicazione all'ispezione dell'algoritmo di *Best-Fitting* restituisce una rotazione massima del modello nell'ordine di $2 \times 10^{-4} \text{deg}$ su entrambi gli ingranaggi. Questa maggiore rotazione rispetto al caso a denti dritti può

essere ricondotta al fatto che l'algoritmo cerca di andare a compensare un errore molto più grande in valore assoluto rispetto al caso precedente. Si può dire che anche in questo caso tra i due modelli non sia presente un errore di allineamento degno di nota.

4.4.3 Coppia conica 3

Nelle tabelle 4.8 e 4.9 sono esposti i risultati dell'ispezione effettuata sulla coppia conica 3, con denti spiroidali ad arco di cerchio, i cui dati principali sono mostrati nella tabella 4.3.

Metodo 0 - Denti Spiroidali FM - Pignone											
Dente 1						Dente 7					
Fianco sx			Fianco dx			Fianco dx			Fianco sx		
<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]
1	1	0,5101	1	1	-0,4712	1	1	0,5101	1	1	-0,4712
1	2	0,4808	1	2	-0,4385	1	2	0,4808	1	2	-0,4385
1	3	0,4540	1	3	-0,4022	1	3	0,4540	1	3	-0,4022
1	4	0,4305	1	4	-0,3612	1	4	0,4305	1	4	-0,3612
1	5	0,4116	1	5	-0,3146	1	5	0,4116	1	5	-0,3146
2	1	0,5426	2	1	-0,4710	2	1	0,5426	2	1	-0,4710
2	2	0,5118	2	2	-0,4367	2	2	0,5118	2	2	-0,4367
2	3	0,4836	2	3	-0,3988	2	3	0,4836	2	3	-0,3988
2	4	0,4589	2	4	-0,3560	2	4	0,4589	2	4	-0,3560
2	5	0,4388	2	5	-0,3073	2	5	0,4388	2	5	-0,3073
3	1	0,5735	3	1	-0,4747	3	1	0,5735	3	1	-0,4747
3	2	0,5412	3	2	-0,4389	3	2	0,5412	3	2	-0,4389
3	3	0,5117	3	3	-0,3992	3	3	0,5117	3	3	-0,3992
3	4	0,4858	3	4	-0,3543	3	4	0,4858	3	4	-0,3543
3	5	0,4646	3	5	-0,3035	3	5	0,4646	3	5	-0,3035
4	1	0,5995	4	1	-0,4813	4	1	0,5995	4	1	-0,4813
4	2	0,5658	4	2	-0,4438	4	2	0,5658	4	2	-0,4438
4	3	0,5348	4	3	-0,4021	4	3	0,5348	4	3	-0,4021
4	4	0,5076	4	4	-0,3553	4	4	0,5076	4	4	-0,3553
4	5	0,4852	4	5	-0,3021	4	5	0,4852	4	5	-0,3021
5	1	0,6207	5	1	-0,4916	5	1	0,6207	5	1	-0,4916
5	2	0,5852	5	2	-0,4523	5	2	0,5852	5	2	-0,4523
5	3	0,5525	5	3	-0,4086	5	3	0,5525	5	3	-0,4086

5	4	0,5239	5	4	-0,3595	5	4	0,5239	5	4	-0,3595
5	5	0,5003	5	5	-0,3039	5	5	0,5003	5	5	-0,3039
6	1	0,6366	6	1	-0,5068	6	1	0,6366	6	1	-0,5068
6	2	0,5993	6	2	-0,4656	6	2	0,5993	6	2	-0,4656
6	3	0,5648	6	3	-0,4197	6	3	0,5648	6	3	-0,4197
6	4	0,5345	6	4	-0,3683	6	4	0,5345	6	4	-0,3683
6	5	0,5096	6	5	-0,3100	6	5	0,5096	6	5	-0,3100
7	1	0,6458	7	1	-0,5277	7	1	0,6458	7	1	-0,5277
7	2	0,6064	7	2	-0,4844	7	2	0,6064	7	2	-0,4844
7	3	0,5701	7	3	-0,4362	7	3	0,5701	7	3	-0,4362
7	4	0,5381	7	4	-0,3822	7	4	0,5381	7	4	-0,3822
7	5	0,5116	7	5	-0,3212	7	5	0,5116	7	5	-0,3212
8	1	0,6472	8	1	-0,5544	8	1	0,6472	8	1	-0,5544
8	2	0,6058	8	2	-0,5089	8	2	0,6058	8	2	-0,5089
8	3	0,5674	8	3	-0,4583	8	3	0,5674	8	3	-0,4583
8	4	0,5335	8	4	-0,4017	8	4	0,5335	8	4	-0,4017
8	5	0,5052	8	5	-0,3378	8	5	0,5052	8	5	-0,3378
9	1	0,6458	9	1	-0,5880	9	1	0,6458	9	1	-0,5880
9	2	0,6023	9	2	-0,5401	9	2	0,6023	9	2	-0,5401
9	3	0,5620	9	3	-0,4871	9	3	0,5620	9	3	-0,4871
9	4	0,5262	9	4	-0,4276	9	4	0,5262	9	4	-0,4276
9	5	0,4963	9	5	-0,3605	9	5	0,4963	9	5	-0,3605

Tabella 4.8: Risultati di misura Coppia 3 - Pignone

Metodo 0 - Denti Spiroidali FM - Ruota											
Dente 1						Dente 19					
Fianco sx			Fianco dx			Fianco dx			Fianco sx		
<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]	<i>i</i>	<i>j</i>	Δ [mm]
1	1	0,3563	1	1	-0,4164	1	1	0,3563	1	1	-0,4164
1	2	0,3287	1	2	-0,3761	1	2	0,3287	1	2	-0,3761
1	3	0,2990	1	3	-0,3380	1	3	0,2990	1	3	-0,3380
1	4	0,2671	1	4	-0,3020	1	4	0,2671	1	4	-0,3020

1	5	0,2327	1	5	-0,2682	1	5	0,2327	1	5	-0,2682
2	1	0,3541	2	1	-0,4483	2	1	0,3541	2	1	-0,4483
2	2	0,3253	2	2	-0,4063	2	2	0,3252	2	2	-0,4062
2	3	0,2943	2	3	-0,3663	2	3	0,2942	2	3	-0,3664
2	4	0,2608	2	4	-0,3287	2	4	0,2608	2	4	-0,3286
2	5	0,2249	2	5	-0,2933	2	5	0,2248	2	5	-0,2933
3	1	0,3552	3	1	-0,4774	3	1	0,3552	3	1	-0,4775
3	2	0,3250	3	2	-0,4335	3	2	0,3250	3	2	-0,4335
3	3	0,2925	3	3	-0,3917	3	3	0,2924	3	3	-0,3916
3	4	0,2574	3	4	-0,3522	3	4	0,2574	3	4	-0,3523
3	5	0,2198	3	5	-0,3152	3	5	0,2198	3	5	-0,3152
4	1	0,3600	4	1	-0,5031	4	1	0,3600	4	1	-0,5032
4	2	0,3283	4	2	-0,4570	4	2	0,3282	4	2	-0,4570
4	3	0,2941	4	3	-0,4133	4	3	0,2941	4	3	-0,4133
4	4	0,2574	4	4	-0,3719	4	4	0,2574	4	4	-0,3718
4	5	0,2179	4	5	-0,3330	4	5	0,2179	4	5	-0,3330
5	1	0,3695	5	1	-0,5245	5	1	0,3694	5	1	-0,5245
5	2	0,3360	5	2	-0,4763	5	2	0,3360	5	2	-0,4762
5	3	0,3001	5	3	-0,4303	5	3	0,3002	5	3	-0,4303
5	4	0,2616	5	4	-0,3869	5	4	0,2616	5	4	-0,3869
5	5	0,2202	5	5	-0,3461	5	5	0,2202	5	5	-0,3461
6	1	0,3843	6	1	-0,5408	6	1	0,3843	6	1	-0,5409
6	2	0,3491	6	2	-0,4903	6	2	0,3491	6	2	-0,4903
6	3	0,3114	6	3	-0,4421	6	3	0,3114	6	3	-0,4421
6	4	0,2709	6	4	-0,3965	6	4	0,2709	6	4	-0,3965
6	5	0,2274	6	5	-0,3537	6	5	0,2274	6	5	-0,3536
7	1	0,4053	7	1	-0,5516	7	1	0,4053	7	1	-0,5517
7	2	0,3682	7	2	-0,4985	7	2	0,3682	7	2	-0,4985
7	3	0,3285	7	3	-0,4480	7	3	0,3285	7	3	-0,4479
7	4	0,2860	7	4	-0,4000	7	4	0,2859	7	4	-0,4001
7	5	0,2403	7	5	-0,3550	7	5	0,2402	7	5	-0,3550
8	1	0,4331	8	1	-0,5561	8	1	0,4331	8	1	-0,5562
8	2	0,3940	8	2	-0,5004	8	2	0,3940	8	2	-0,5004

8	3	0,3523	8	3	-0,4472	8	3	0,3523	8	3	-0,4473
8	4	0,3075	8	4	-0,3969	8	4	0,3075	8	4	-0,3969
8	5	0,2594	8	5	-0,3495	8	5	0,2594	8	5	-0,3495
9	1	0,4683	9	1	-0,5536	9	1	0,4683	9	1	-0,5537
9	2	0,4271	9	2	-0,4951	9	2	0,4272	9	2	-0,4951
9	3	0,3832	9	3	-0,4393	9	3	0,3832	9	3	-0,4393
9	4	0,3361	9	4	-0,3864	9	4	0,3361	9	4	-0,3864
9	5	0,2855	9	5	-0,3365	9	5	0,2854	9	5	-0,3365

Tabella 4.9: Risultati di misura Coppia 3 - Ruota

Leggendo le tabelle 4.8 e 4.9 si nota che su entrambe le ruote dentate è presente un errore massimo in valore assoluto di circa 0.6 mm. Si può verificare anche che c'è un andamento dell'errore molto simile a quello riscontrato nella coppia conica 2, con un errore che decresce andando dalla radice alla cresta del dente e che ha andamento analogo andando dalla sezione di testa verso la sezione di base della ruota. Anche qui si può attribuire questo errore sia ad una diversa modalità di generazione delle spirali tra i due modelli sia ad una diversa gestione dei giochi, il che causa l'assenza di un errore nullo o quasi sulla sezione di testa delle ruote. I report grafici generati dal software *ArcoCad*[®] relativi a queste ispezioni sono disponibili per la consultazione negli allegati E e F rispettivamente per il pignone e per la ruota.

Risultati del *best-fitting*

L'applicazione dell'algoritmo di *Best-Fitting* restituisce una rotazione massima del modello nell'ordine di $4 \times 10^{-4} \text{deg}$ su entrambi gli ingranaggi. Le cause di queste rotazioni rispetto ai 3 assi sono da attribuire in maggior parte ad un tentativo del software di ridurre al minimo l'errore presente nella mi-

sura, significativo in valore assoluto, piuttosto che conseguenza di un errato allineamento tra coordinate e modello CAD.

Capitolo 5

Conclusioni

Lo scopo principale di questo lavoro di tesi è stato quello di generare un modello matematico che potesse permettere la creazione delle superfici geometriche di vari tipi di ingranaggi conici partendo dall'inserimento di un numero minimo di dati iniziali. Prima di arrivare a questo punto è stato però necessario circoscrivere il problema effettuando una ricerca bibliografica che permettesse di capire quali fossero le caratteristiche geometriche che differenziassero le diverse coppie coniche presenti in commercio. Parallelamente si è cercato di ricondurre queste differenze di forma a delle equazioni che han permesso così di calcolare le grandezze geometriche principali di questo tipo di ingranaggi. Si è quindi così giunti ad una classificazione esaustiva degli ingranaggi conici, presente nel primo capitolo di questa tesi. In maniera analoga si è raggiunto lo scopo di definire le grandezze geometriche principali di questo tipo di ingranaggi grazie agli algoritmi della normativa ISO 23509:2016, come descritto nei primi paragrafi del terzo capitolo di questo lavoro.

Contemporaneamente, il lavoro di ricerca bibliografica si è concentrato sulla definizione delle pratiche di misura definite dalle norme ISO e sul calcolo

delle relative tolleranze, sempre secondo gli standard normativi.

Terminata questa ricerca bibliografica si è potuto quindi procedere con la scrittura in *Matlab*[®] dei codici necessari a calcolare le grandezze geometriche e a generare le superfici tridimensionali degli ingranaggi. Terminata la scrittura del codice si è riusciti ad ottenere dei modelli solidi macroscopicamente simili alle controparti reali, riuscendo a gestire le varie tipologie classificate nella prima fase del lavoro.

Infine si è cercato di verificare la validità di questo modello andandolo a confrontare con degli ingranaggi CAD considerati come "teoricamente esatti", generati col software *KISSsoft*[®]. Questo confronto è stato eseguito usando il software di misura *ArcoCad*[®] dell'azienda *MetroStaff S.R.L.*

Al termine di questo confronto è emersa una corrispondenza tra le coppie a denti dritti generati con i due diversi metodi. Per ciò che riguarda le ruote a denti spiroidali non è stato invece possibile trovare la corrispondenza tra i due metodi, a causa di una diversa gestione della modalità di generazione delle spirali e anche di una diversa valutazioni dei giochi laterali dei denti.

5.1 Sviluppi futuri

Gli sviluppi futuri di questo lavoro si concentreranno nel migliorare il modello generato correggendo gli errori presenti nella creazione delle spirali degli ingranaggi spiroidali ed ipoidi e andando ad inserire le micro-correzioni del profilo come smussi di testa o raccordi di piede, permettendo così una modellazione più completa e precisa delle coppie coniche.

Una volta che il modello matematico avrà raggiunto una precisione accettabile per le principali tipologie di ingranaggi conici esso potrà essere inserito all'interno di software metrologici. In questo modo l'utente finale potrà otte-

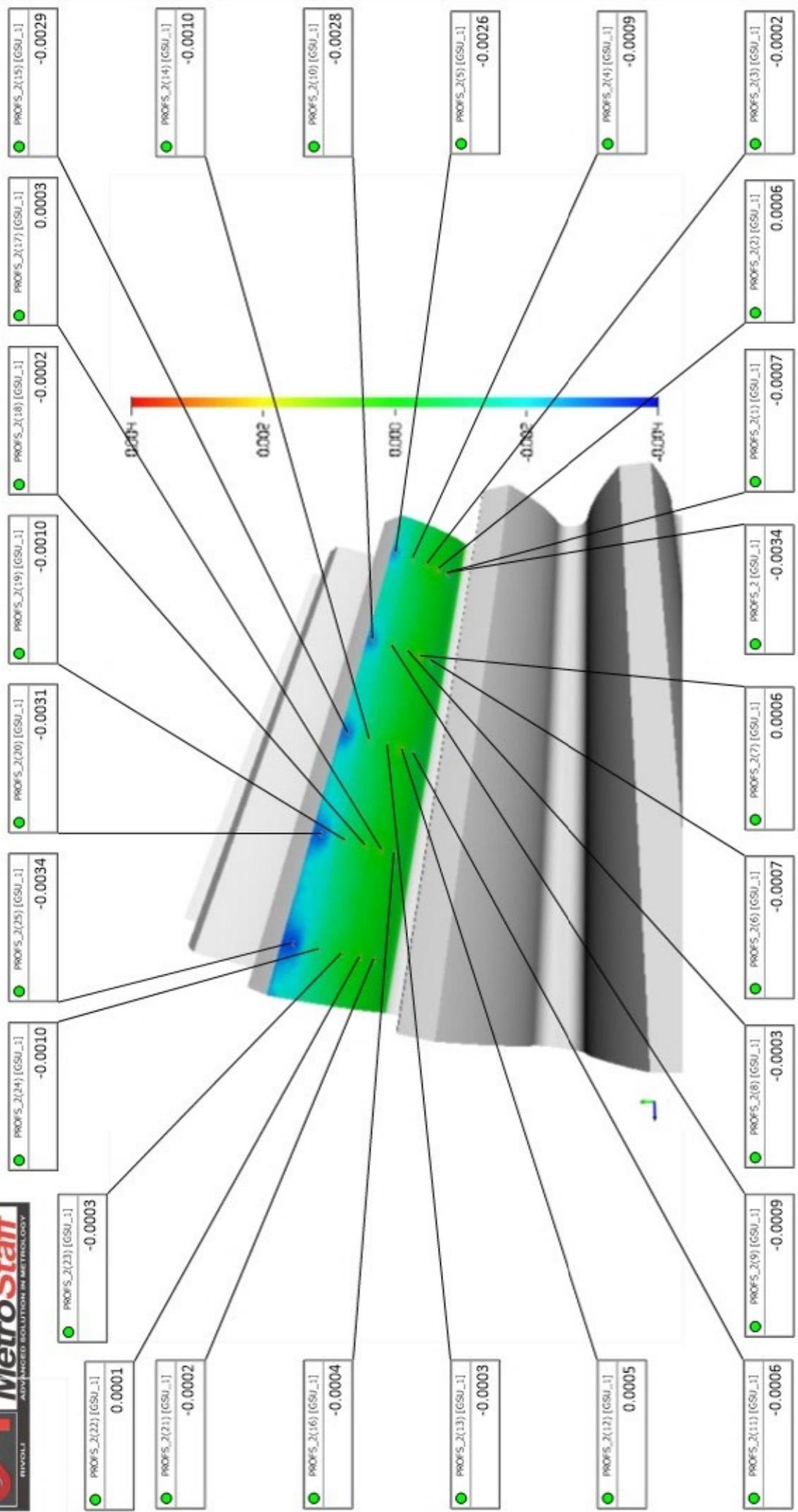
nera automaticamente le coordinate utilizzate dalla macchina di misura per l'ispezione della ruota dentata desiderata in seguito all'inserimento di pochi dati iniziali che ne definiscano univocamente la geometria.

Appendice A

Report grafici Coppia 1 Pignone



Overall view



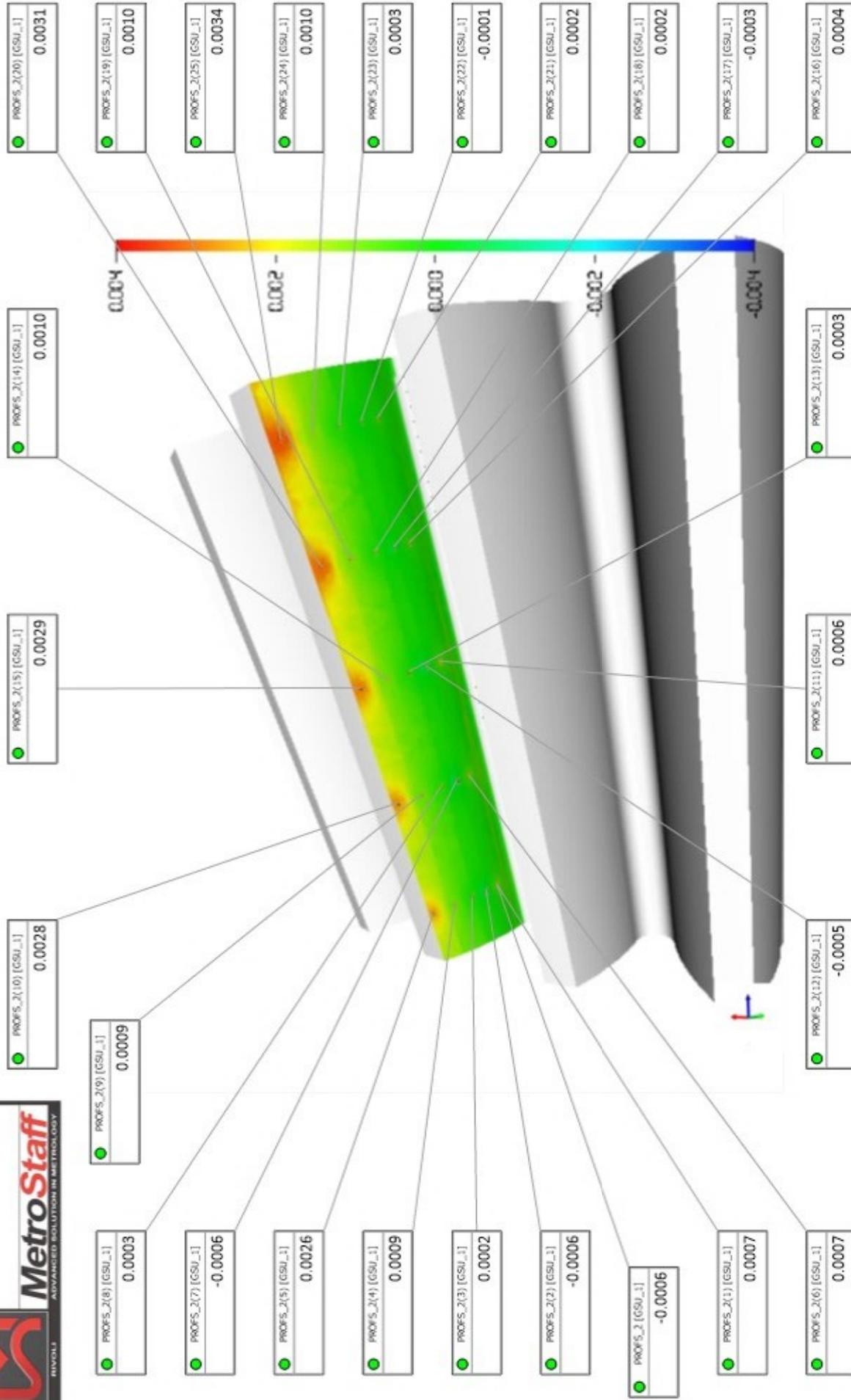
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_1_DENTI_DRITTI	Customer	
Drawing	1	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 1	Notes	
CAD model			
Date	06-12-2020	Page	1 of 1



Overall view



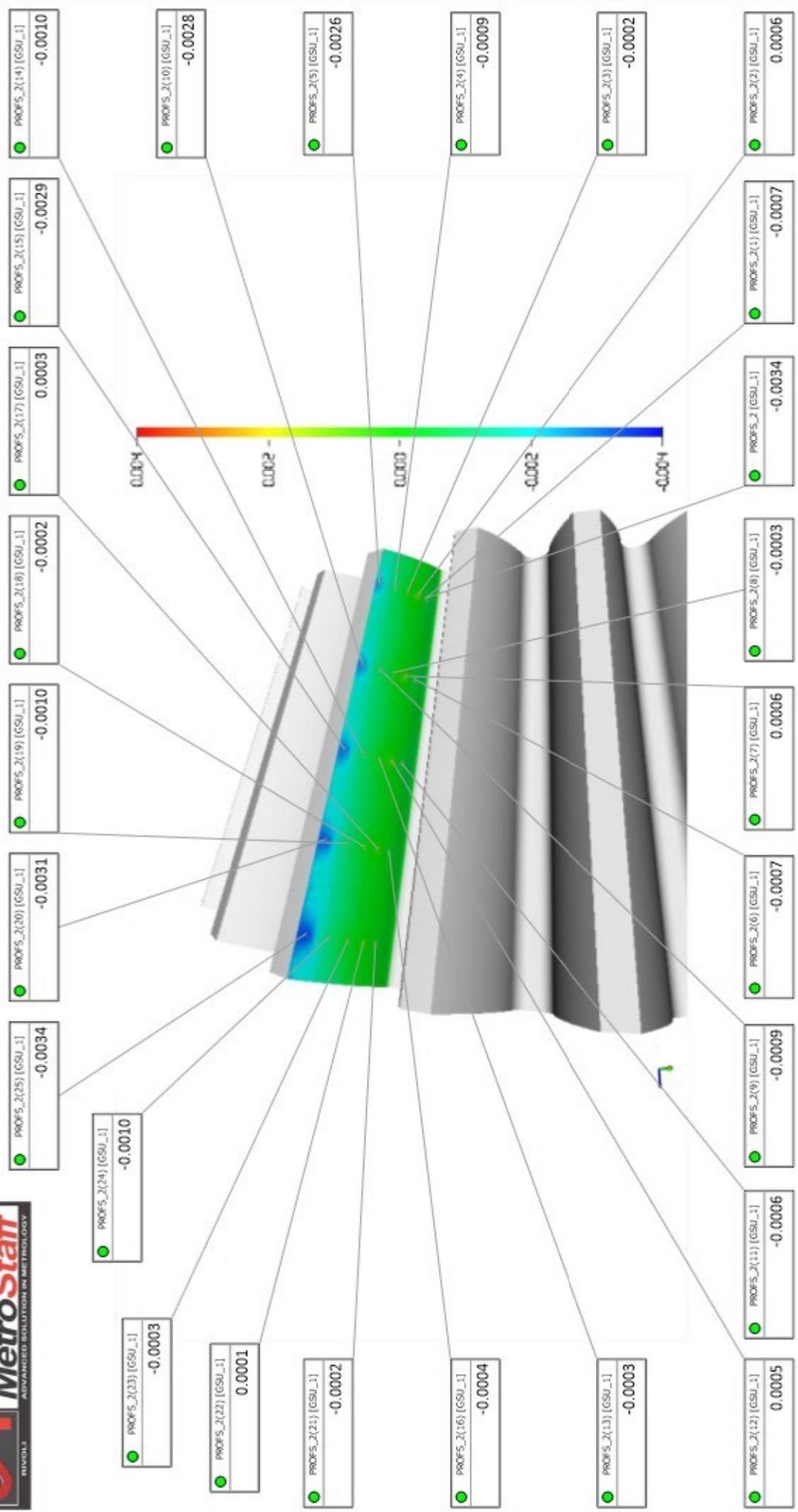
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_1_DENTI_DRITTI	Customer	
Drawing	1	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 2	Notes	
CAD model		Date	06-12-2020
Date		Page	1 of 1



Overall view



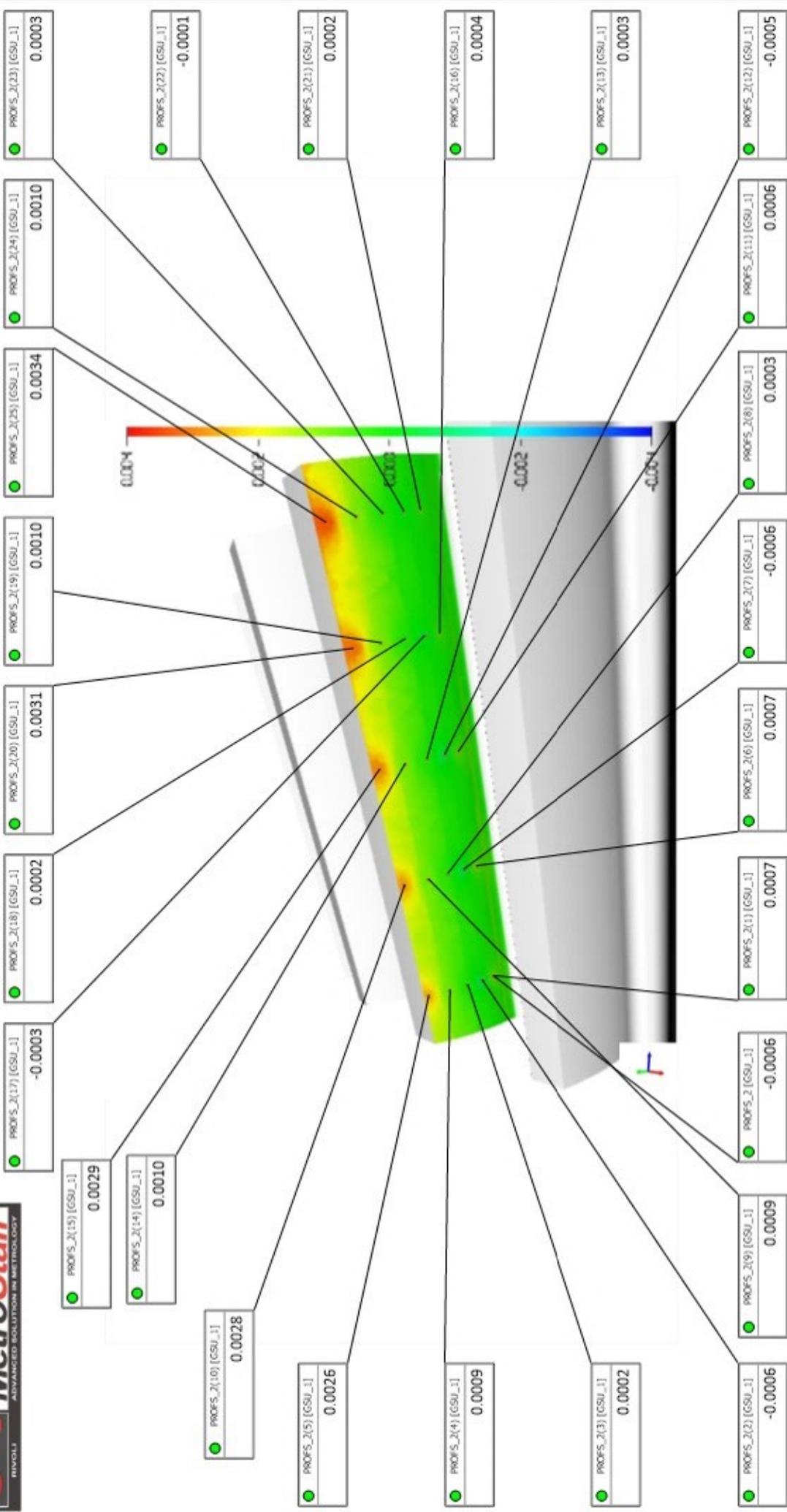
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_1_DENTI_DRITTI	Customer
Drawing	1	Operator
Serial number		Sign
Part ID	FIANCO 3	
CAD model		Notes
Date	06-12-2020	Page 1 of 1



Overall view



POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

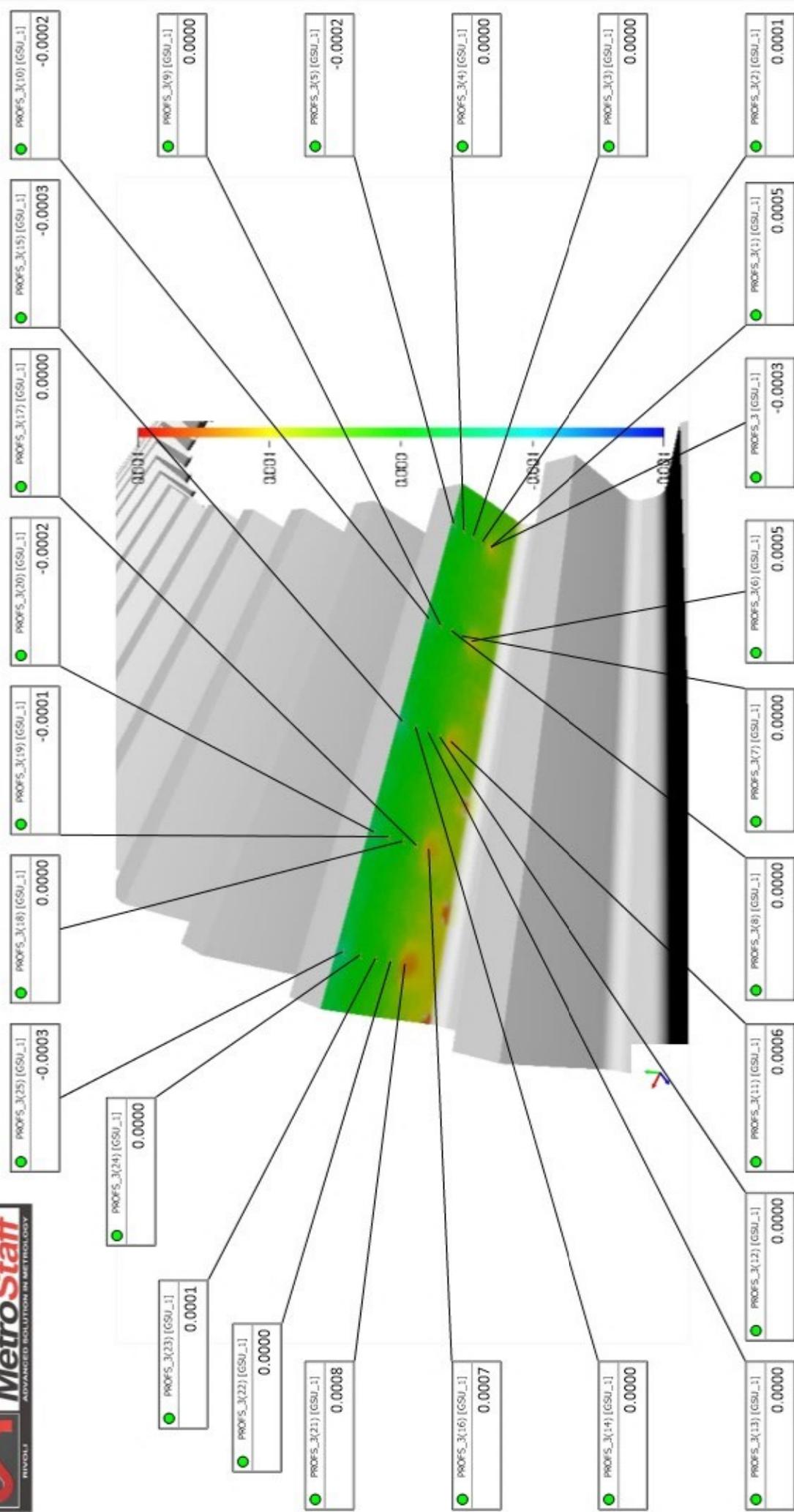
Project	COPPIA_1_DENTI_DRITTI	Customer	
Drawing	1	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 4	Notes	
CAD model		Page	1 of 1
Date	06-12-2020		

Appendice B

Report grafici Coppia 1 Ruota



Overall view



POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project COPPIA_1_DENTI_DRITTI

Drawing 2 Customer

Serial number Sign Operator

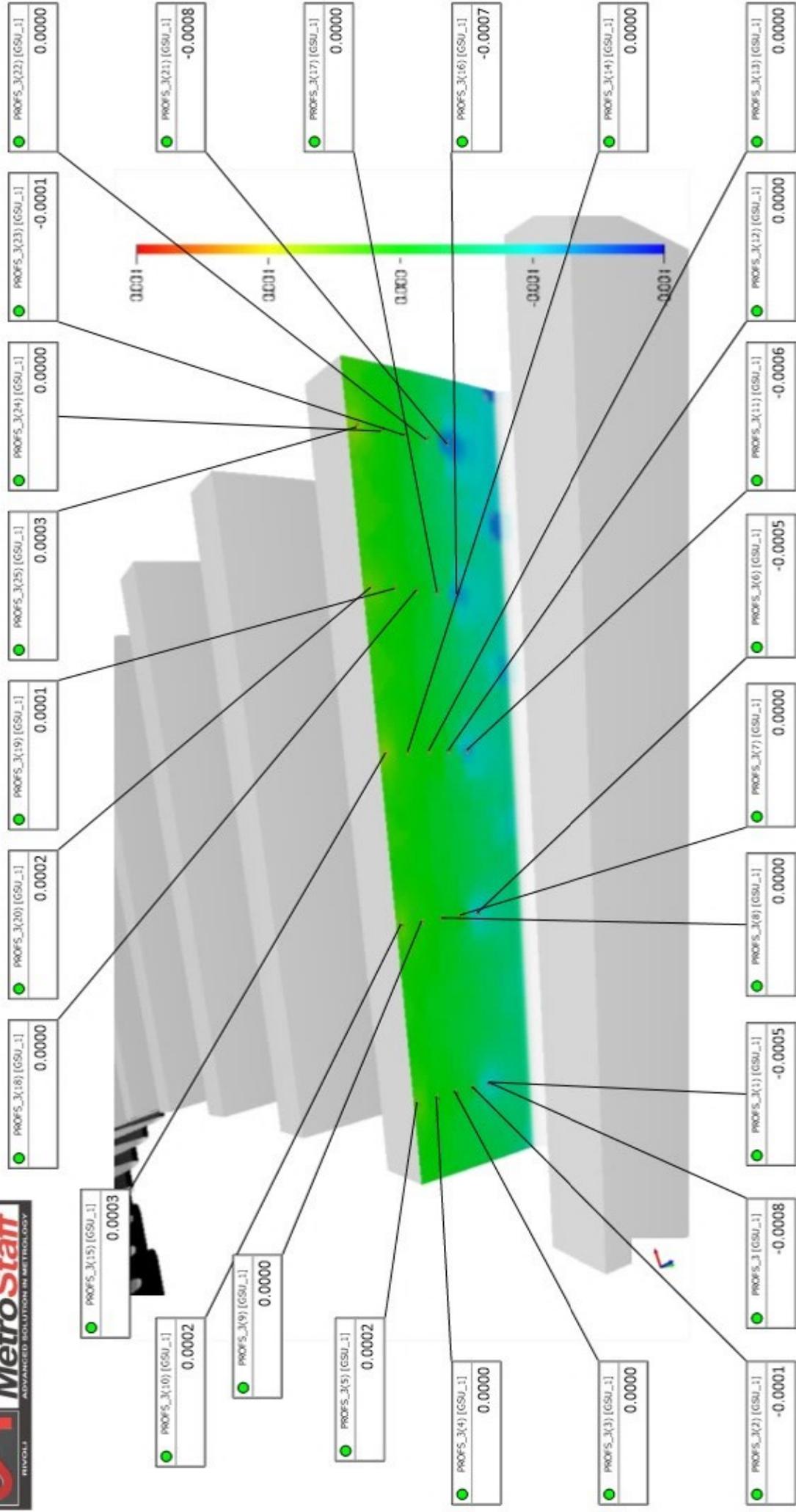
Part ID RUOTA_FIANCO 1

CAD model Notes

Date 06-12-2020 Page 1 of 1



Overall view



POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project COPPIA_1_DENTI_DRITTI

Drawing 2 Customer Operator

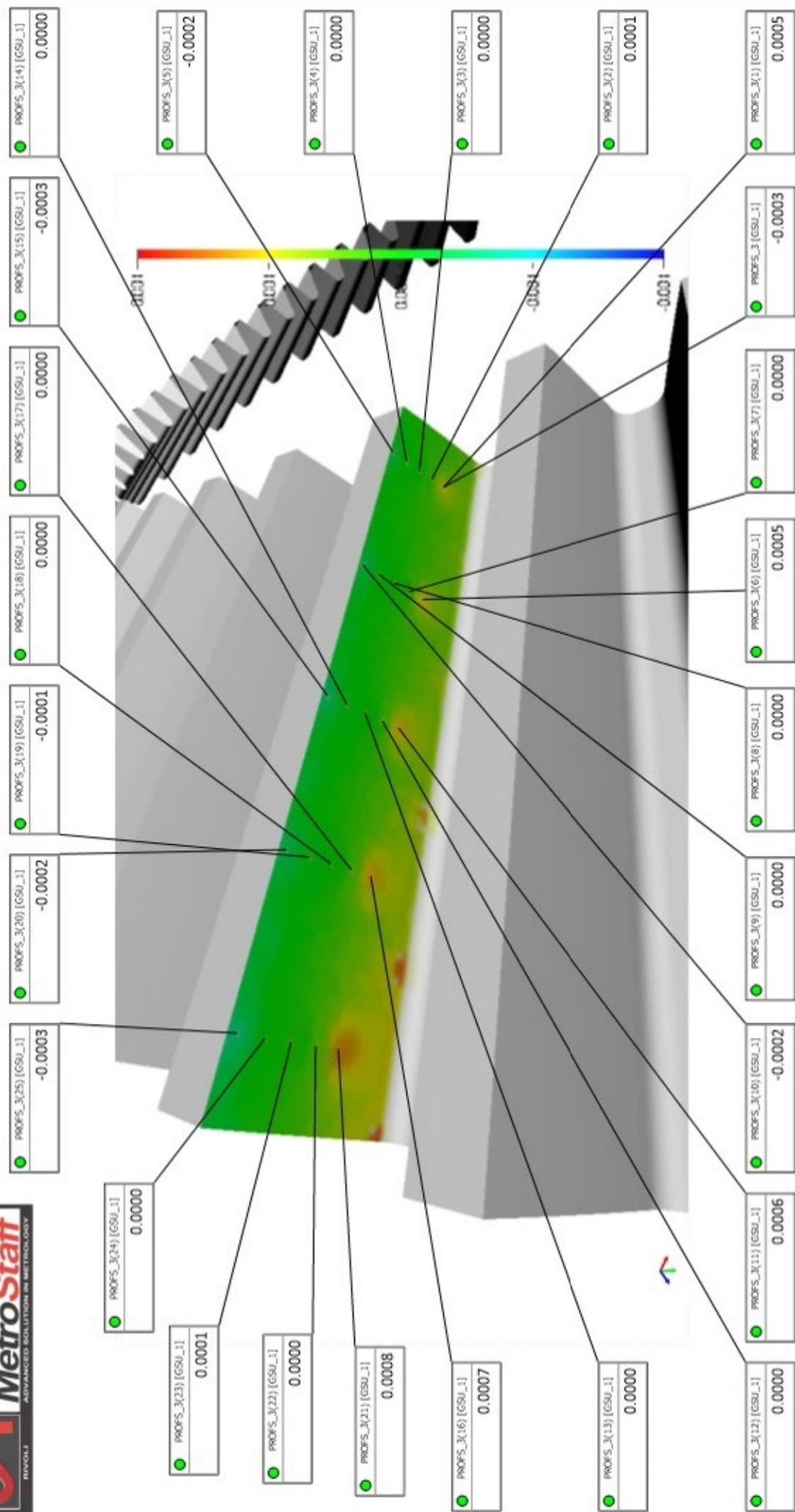
Serial number Sign

Part ID RUOTA_FIANCO 2

CAD model Notes

Date 06-12-2020 Page 1 of 1

Overall view



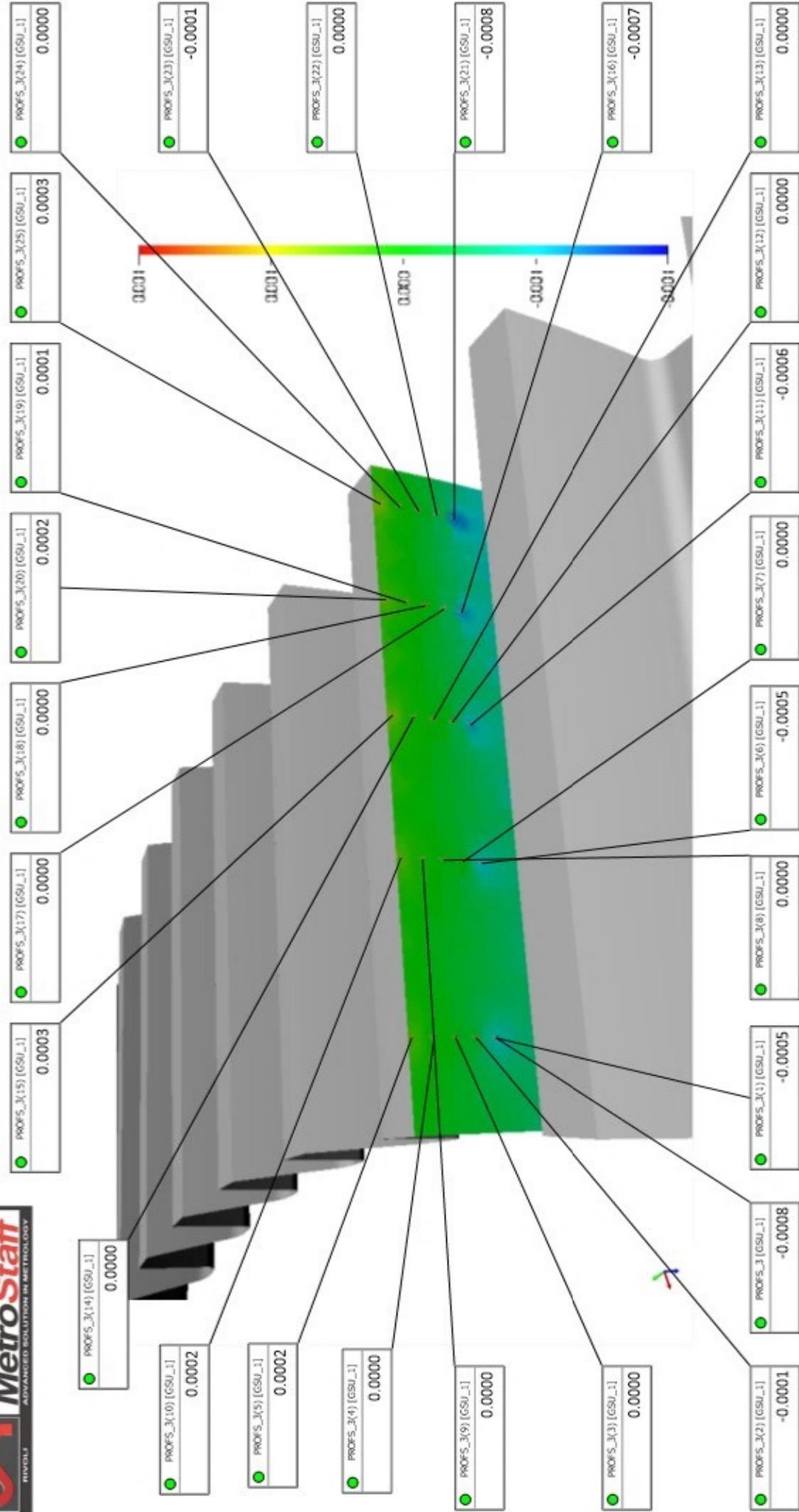
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_1_DENTI_DRITTI	Customer	
Drawing	2	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	RUOTA_FIANCO 2	Notes	
CAD model			
Date	06-12-2020	Page	1 of 1



Overall view



POLITECNICO TORINO

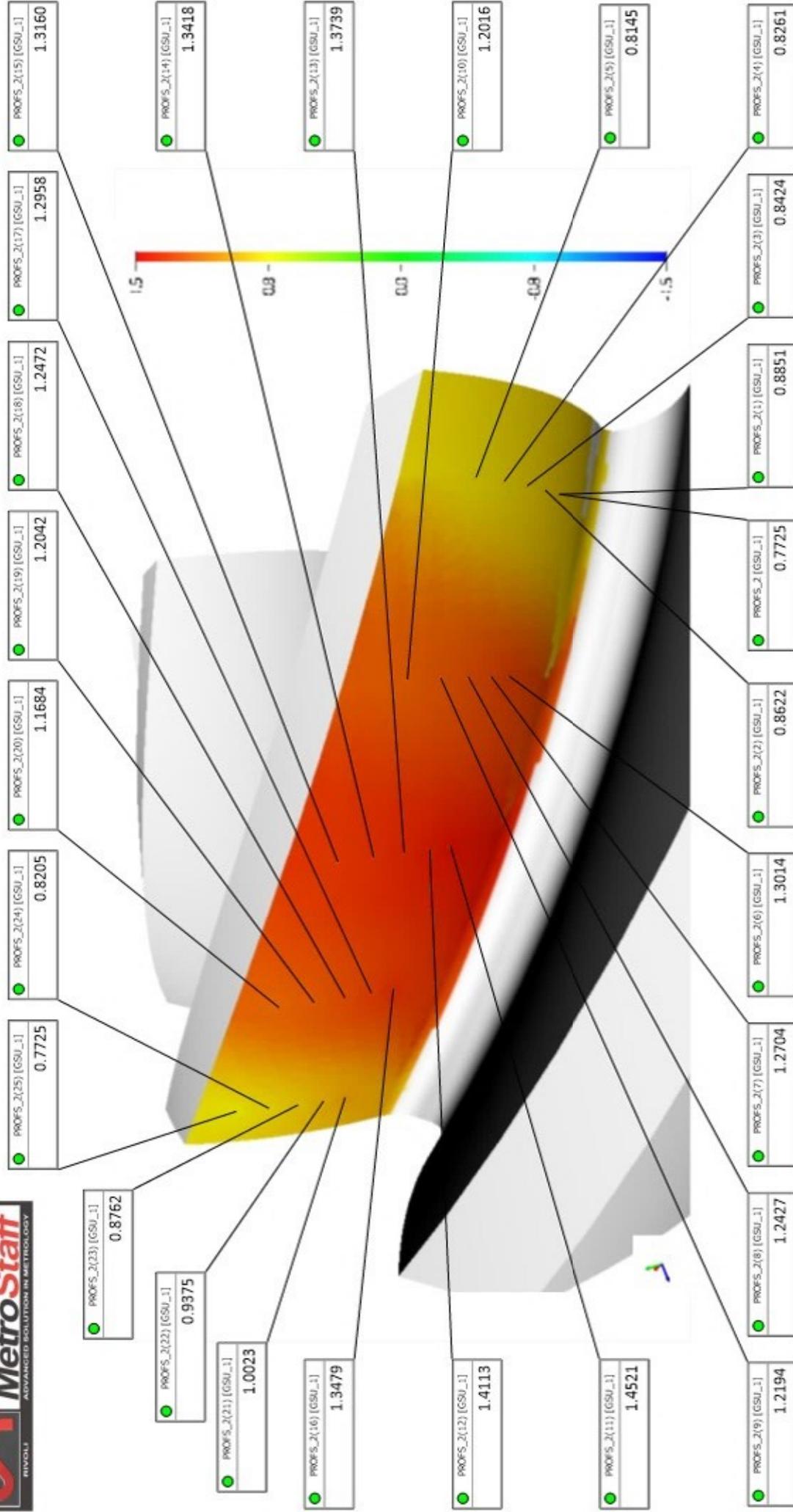
Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_1_DENTI_DRITTI	Customer	
Drawing	4	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	RUOTA_FIANCO 4	Notes	
CAD model		Date	06-12-2020
		Page	1 of 1

Appendice C

Report grafici Coppia 2 Pignone

Overall view



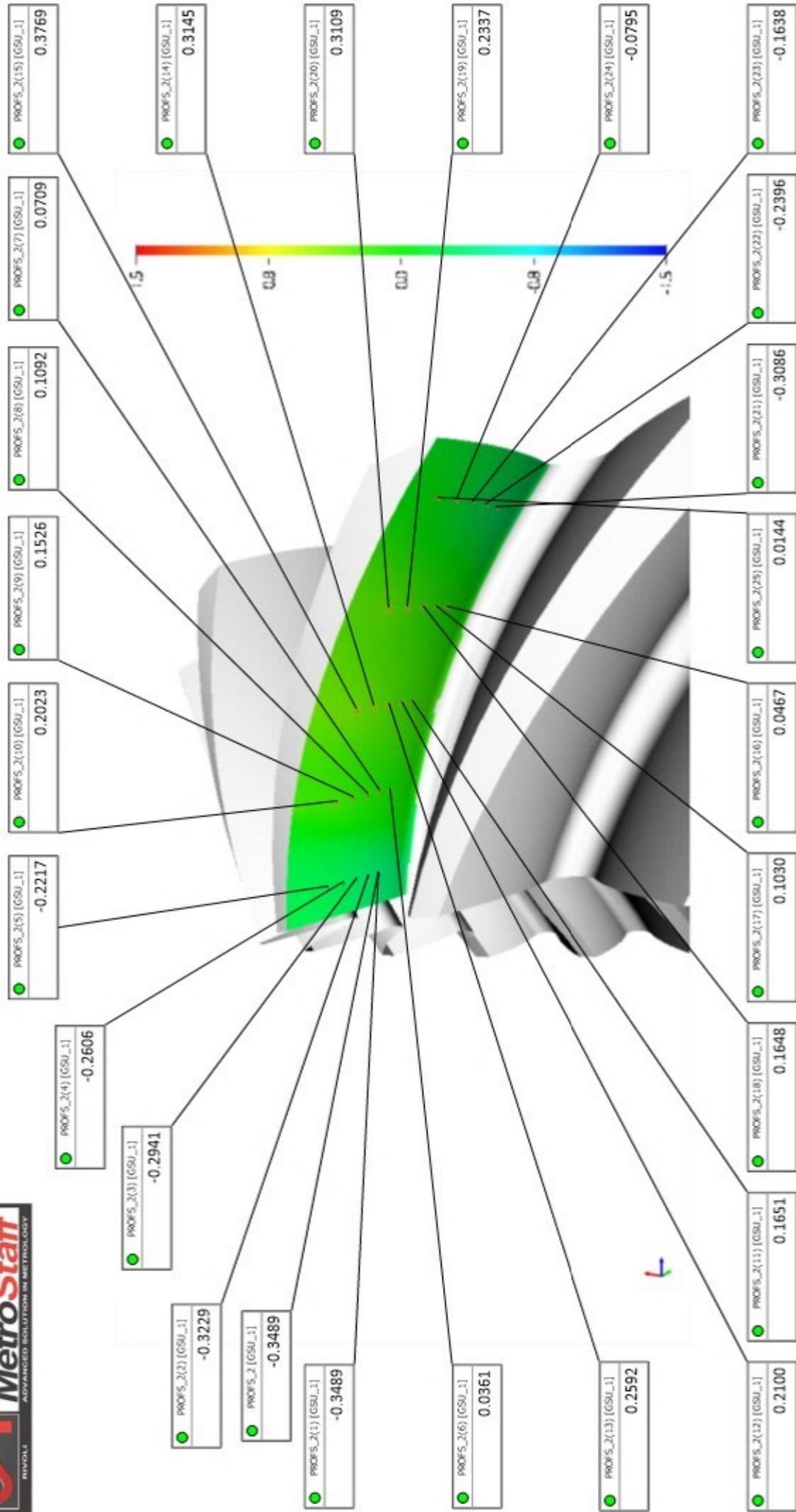
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_2_FACE_HOBBLING	Customer	
Drawing	1	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 1	Notes	
CAD model		Page	1 of 1
Date	06-12-2020		



Overall view



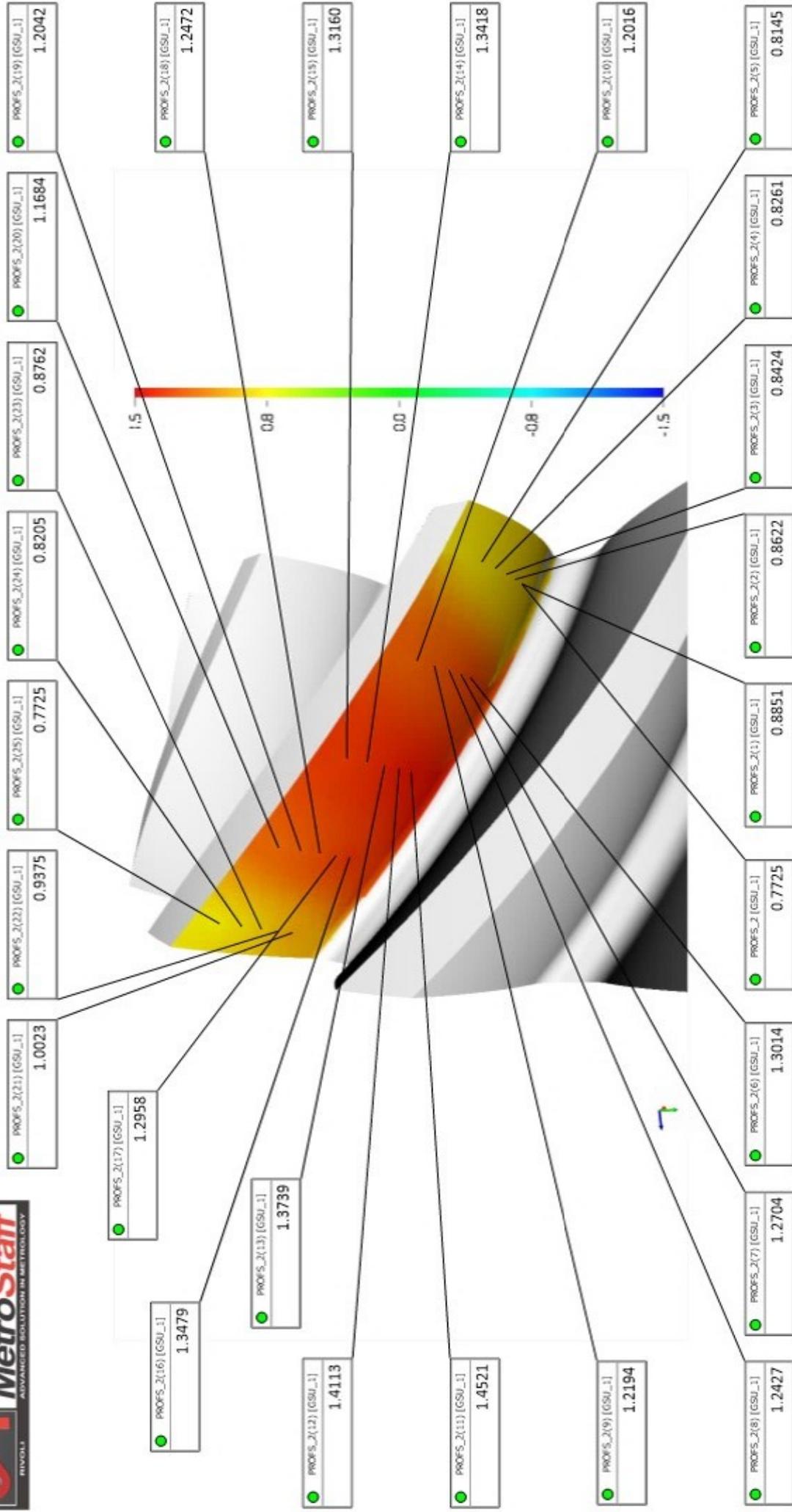
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_2_FACE_HOBGING	Customer	
Drawing	2	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	PIGNONE_FIANCO 2	Notes	
CAD model		Date	06-12-2020
		Page	1 of 1



Overall view



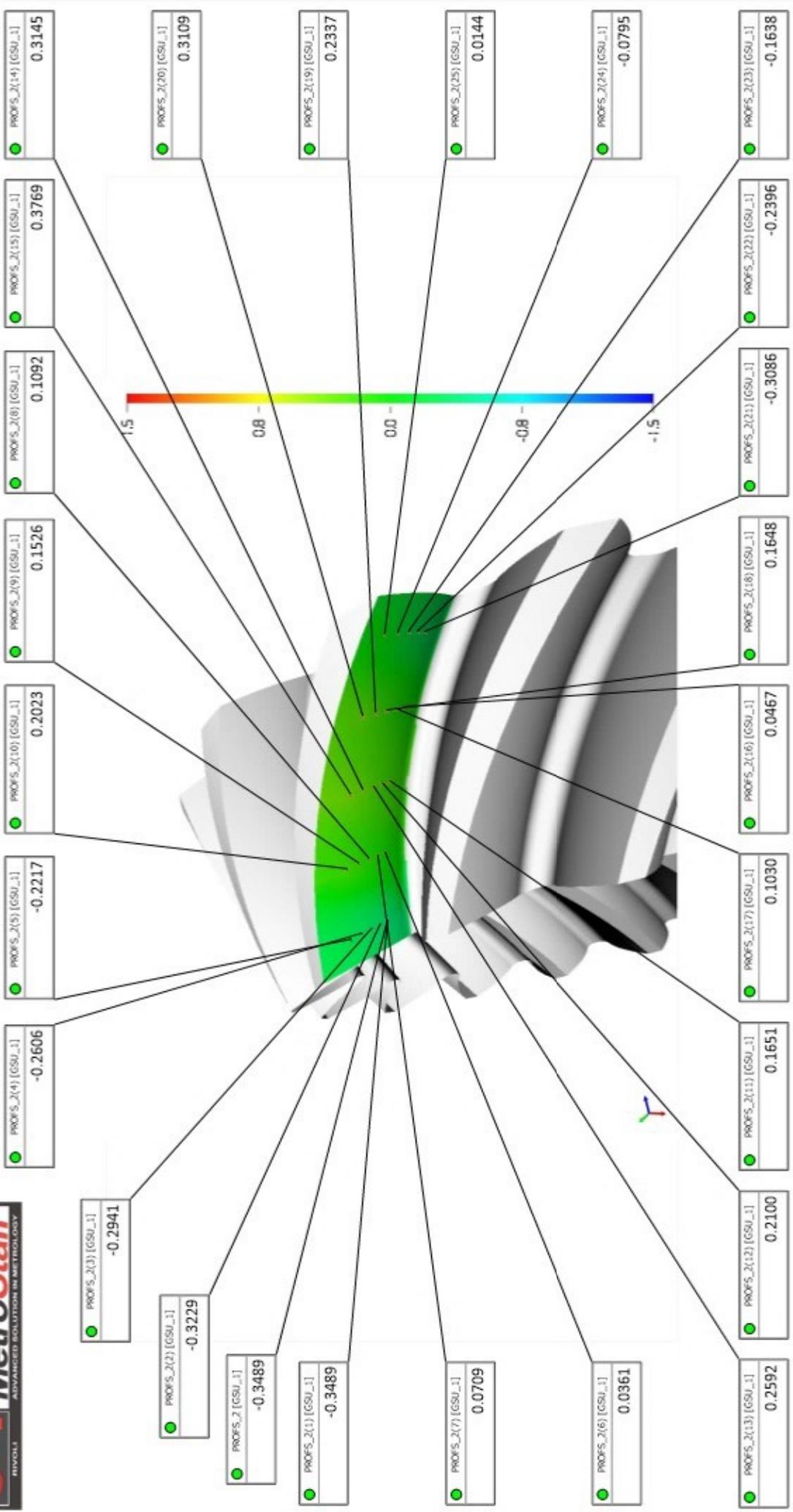
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_2_FACE_HOBBLING	Customer	
Drawing	3	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	PIGNONE_FIANCO 3	Notes	
CAD model		Page	1 of 1
Date	06-12-2020		



Overall view



POLITECNICO TORINO

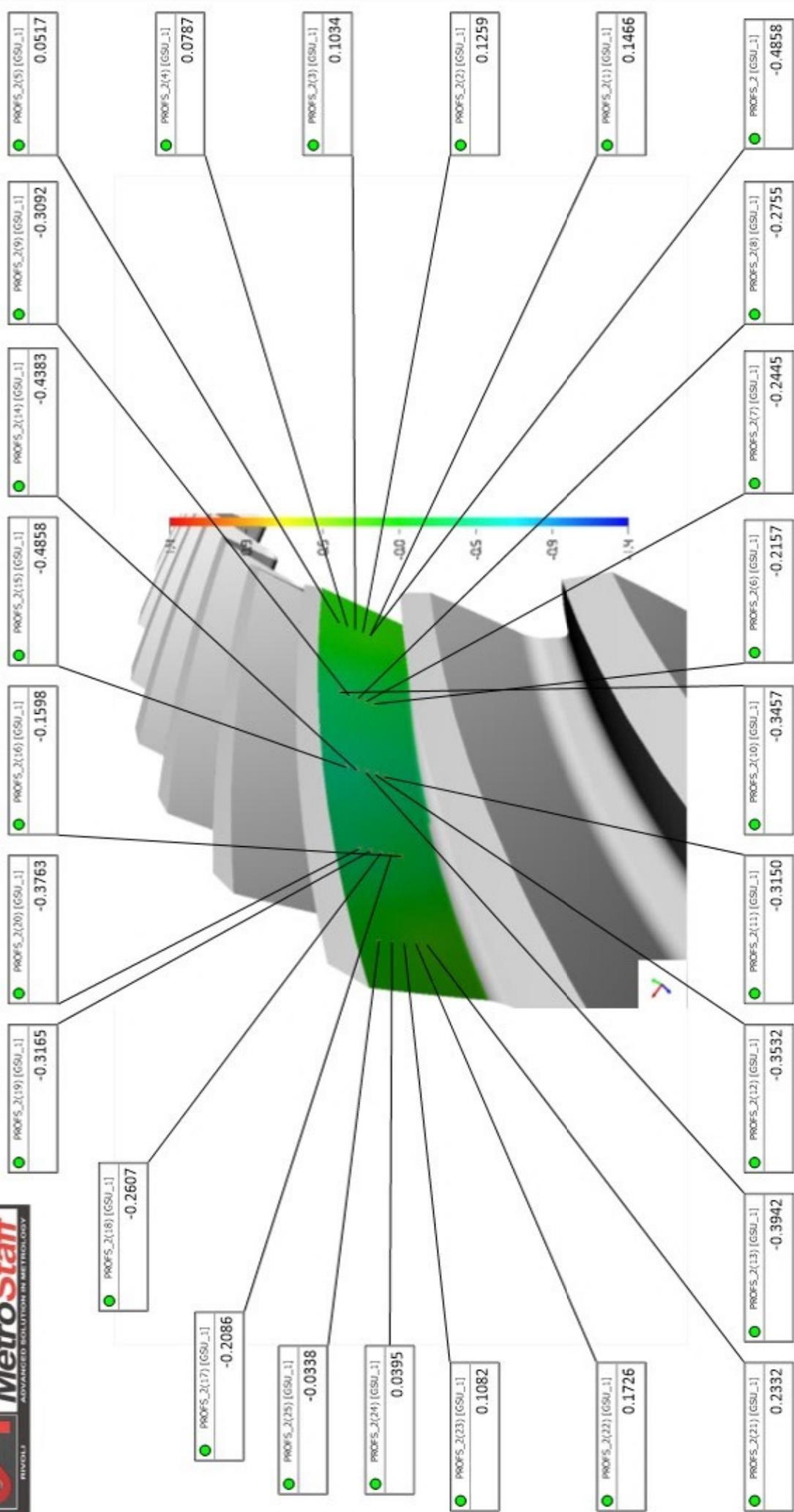
Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_2_FACE_HOBGING	Customer	
Drawing	4	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	PIGNONE_FIANCO 4	Notes	
CAD model		Page	1 of 1
Date	06-12-2020		

Appendice D

Report grafici Coppia 2 Ruota

Overall view



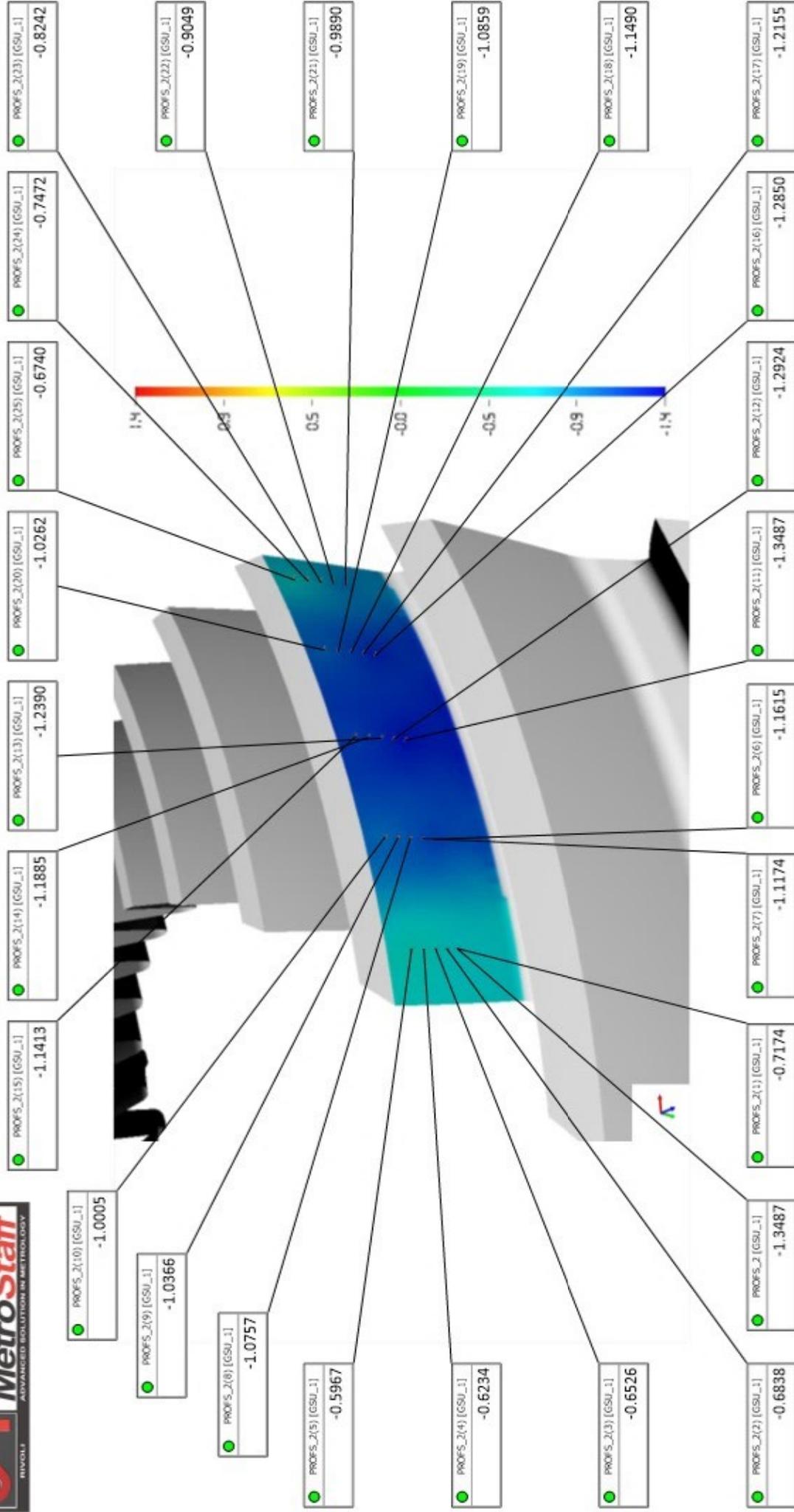
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_2_FACE_HOBBING_RUOTA	Customer	
Drawing	1	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 1	Notes	
CAD model			
Date	06-12-2020	Page	1 of 1



Overall view



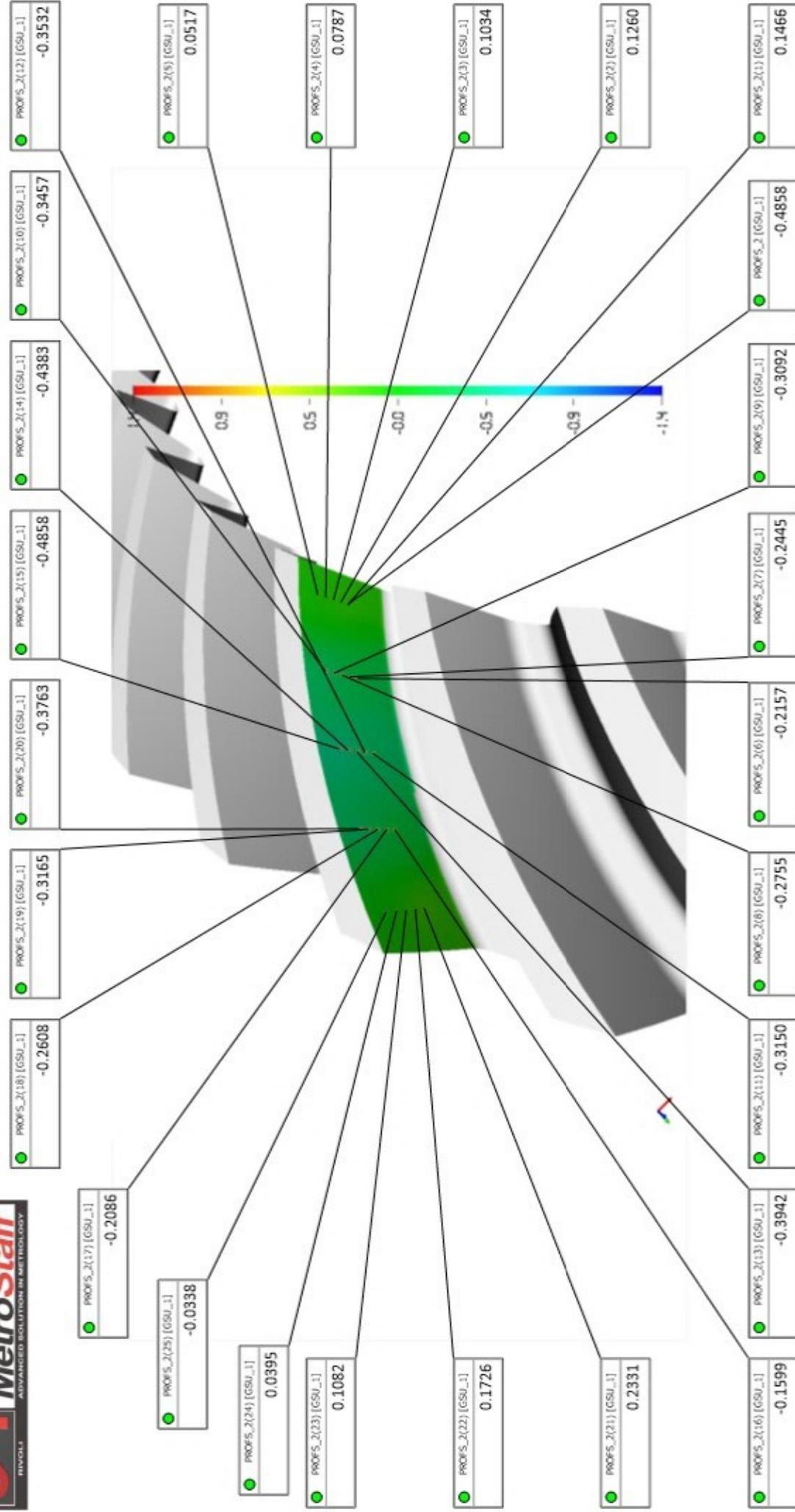
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_2_FACE_HOBBIING_RUOTA	Customer	
Drawing	2	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 2	Notes	
CAD model		Date	06-12-2020
		Page	1 of 1



Overall view



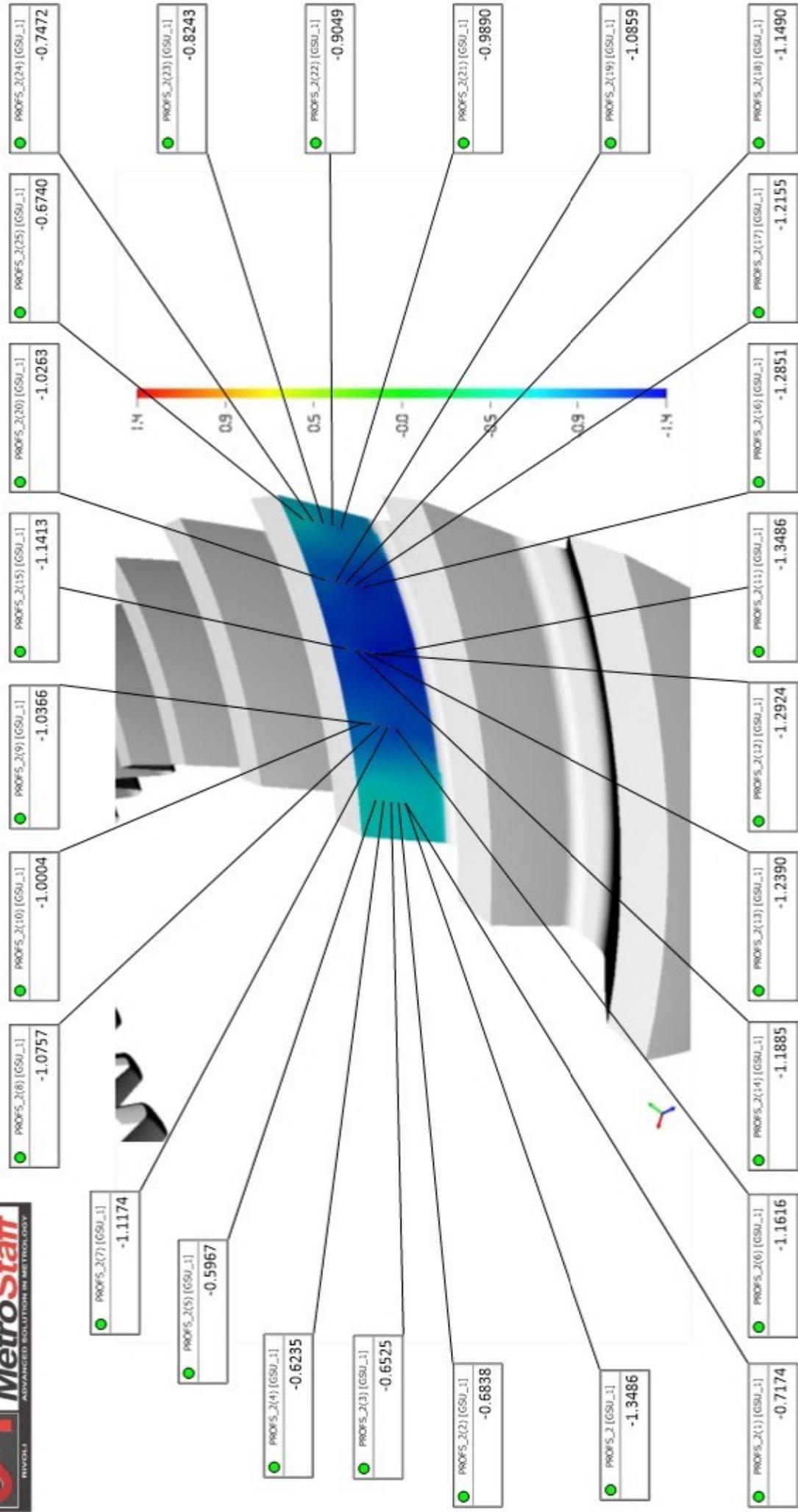
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_2_FACE_HOBBING_RUOTA	Customer	
Drawing	3	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 3	Notes	
CAD model		Date	06-12-2020
		Page	1 of 1



Overall view



POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

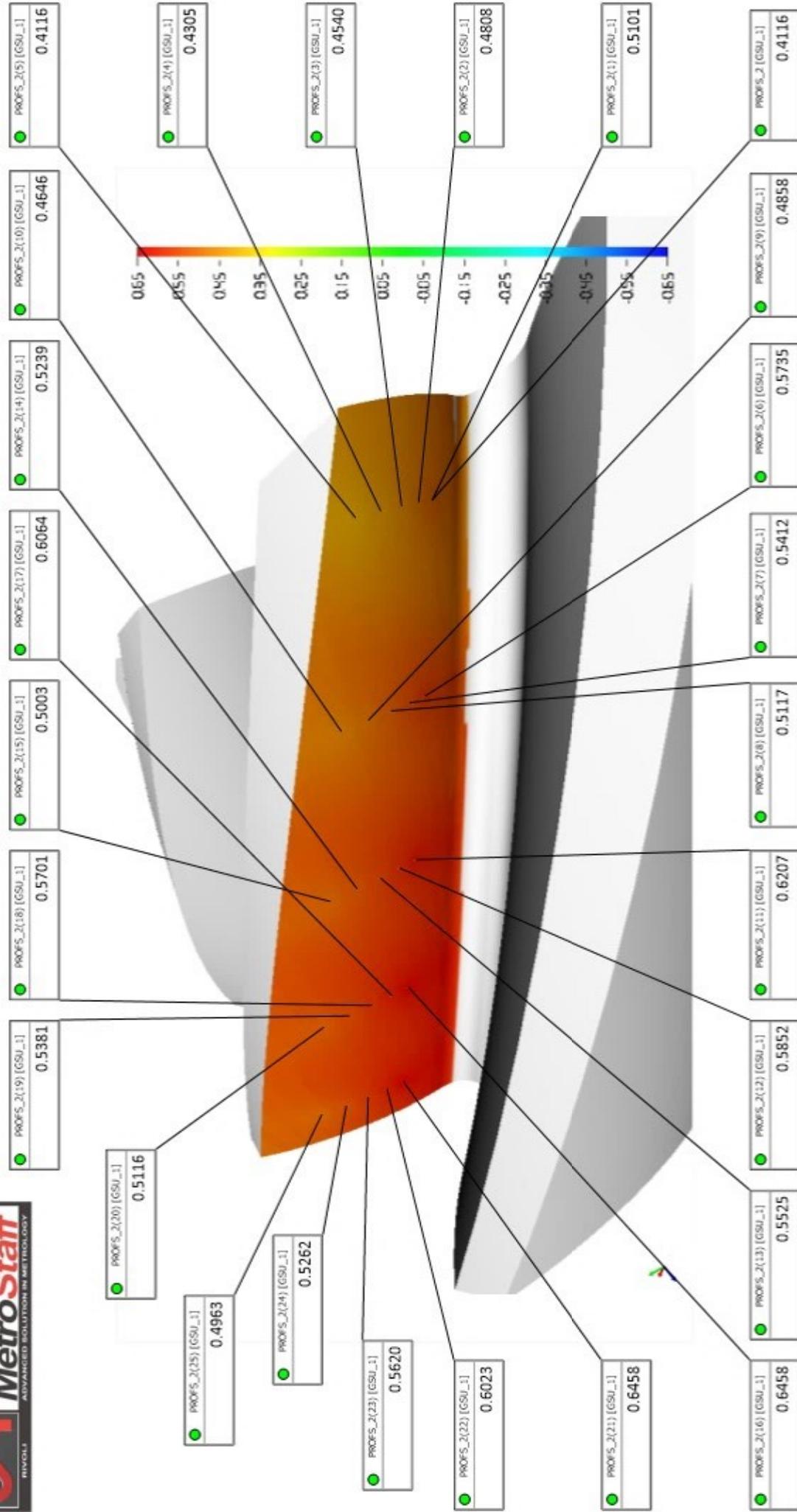
Project	COPPIA_2_FACE_HOBBING_RUOTA	Customer	
Drawing	4	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 4	Notes	
CAD model			
Date	06-12-2020	Page	1 of 1

Appendice E

Report grafici Coppia 3 Pignone



Overall view



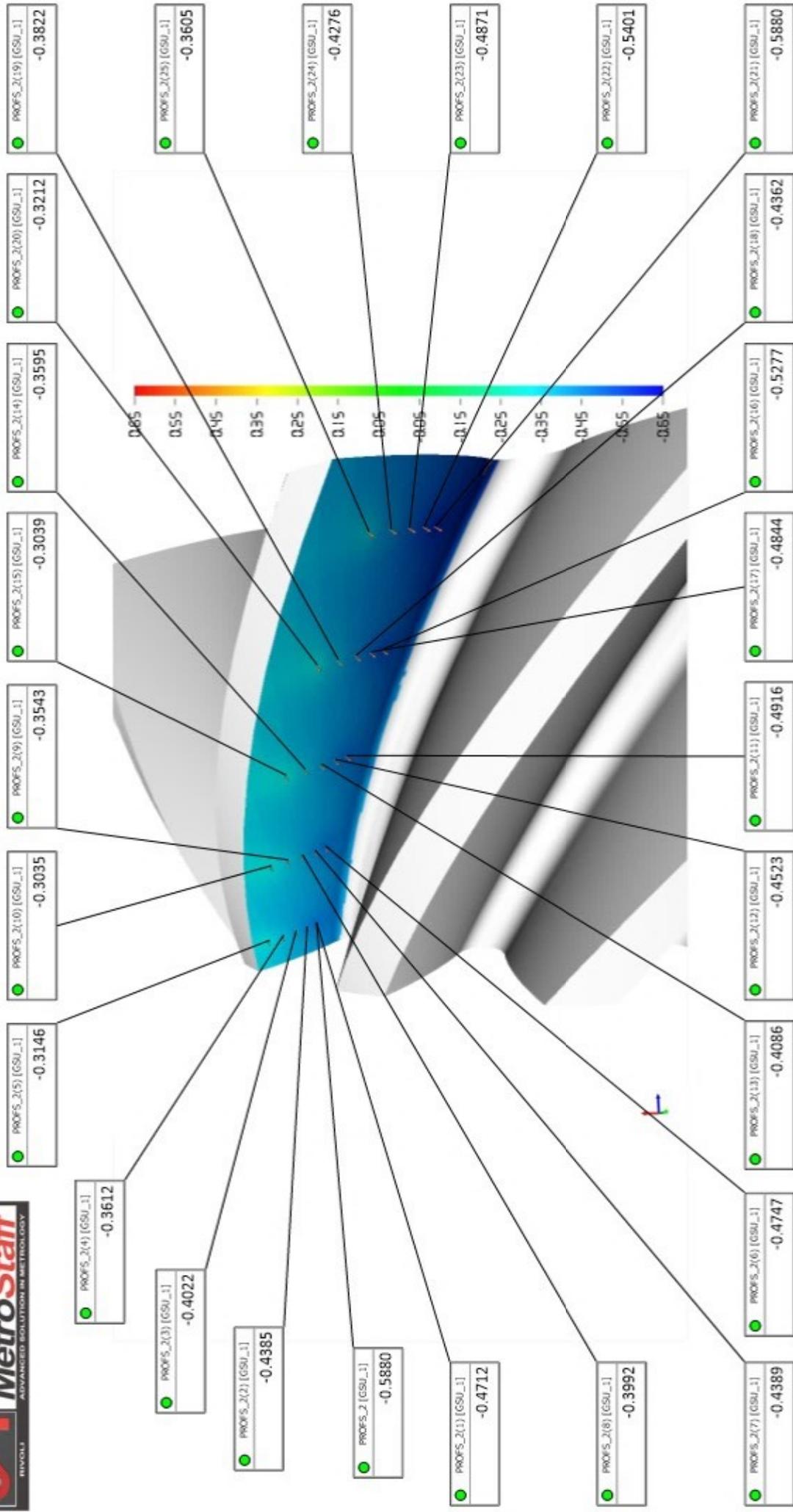
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_3_FACE_MILLING_PIGNONE	Customer	
Drawing	1	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 1	Notes	
CAD model		Date	06-12-2020
		Page	1 of 1



Overall view



POLITECNICO TORINO

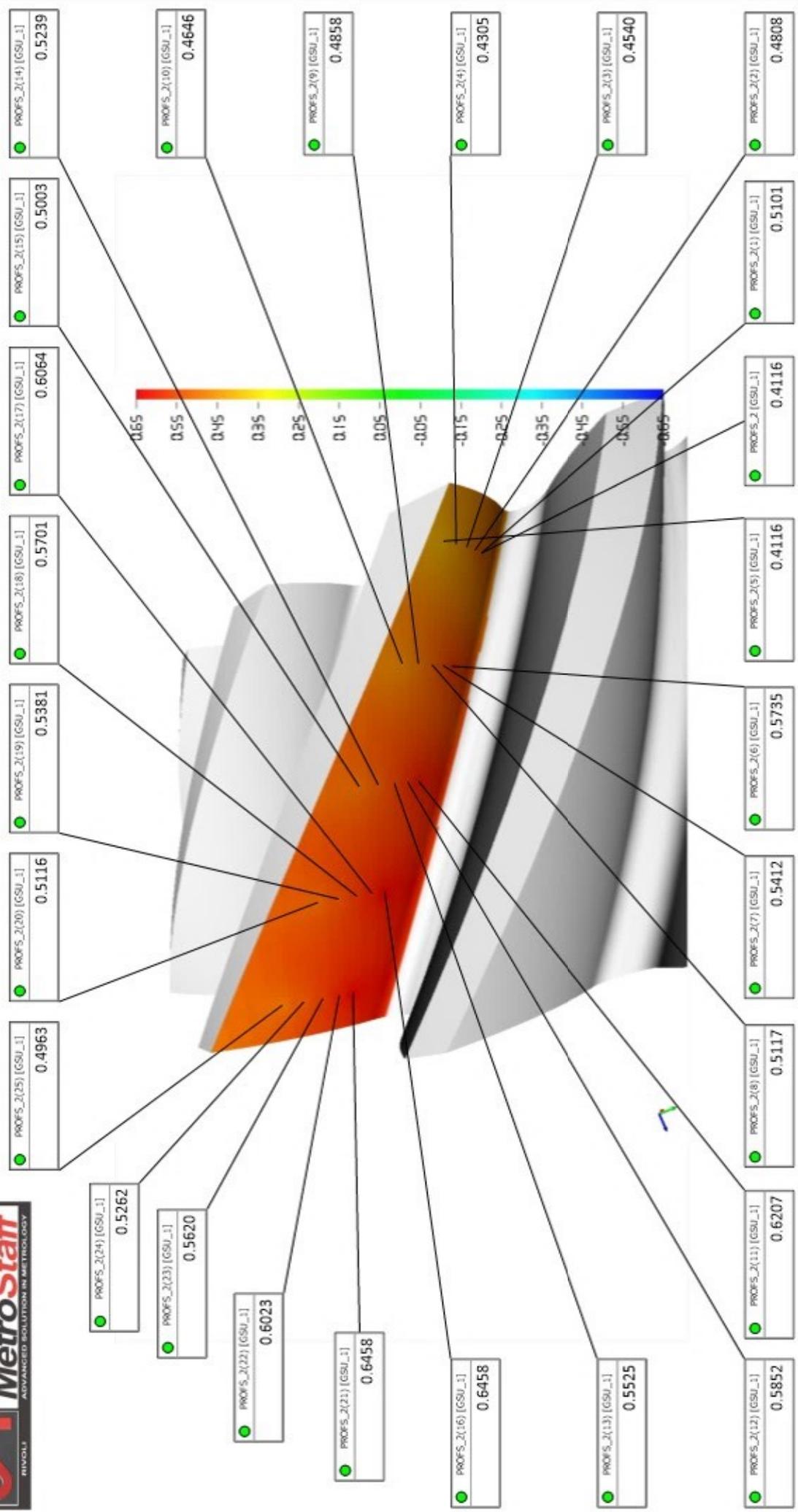
Corso Duca degli Abruzzi

Project COPPIA_3_FACE_MILLING_PIGNONE

Drawing	2	Customer	Operator
Serial number			Sign
Part ID	FIANCO 2		
CAD model		Notes	
Date	06-12-2020	Page	1 of 1



Overall view

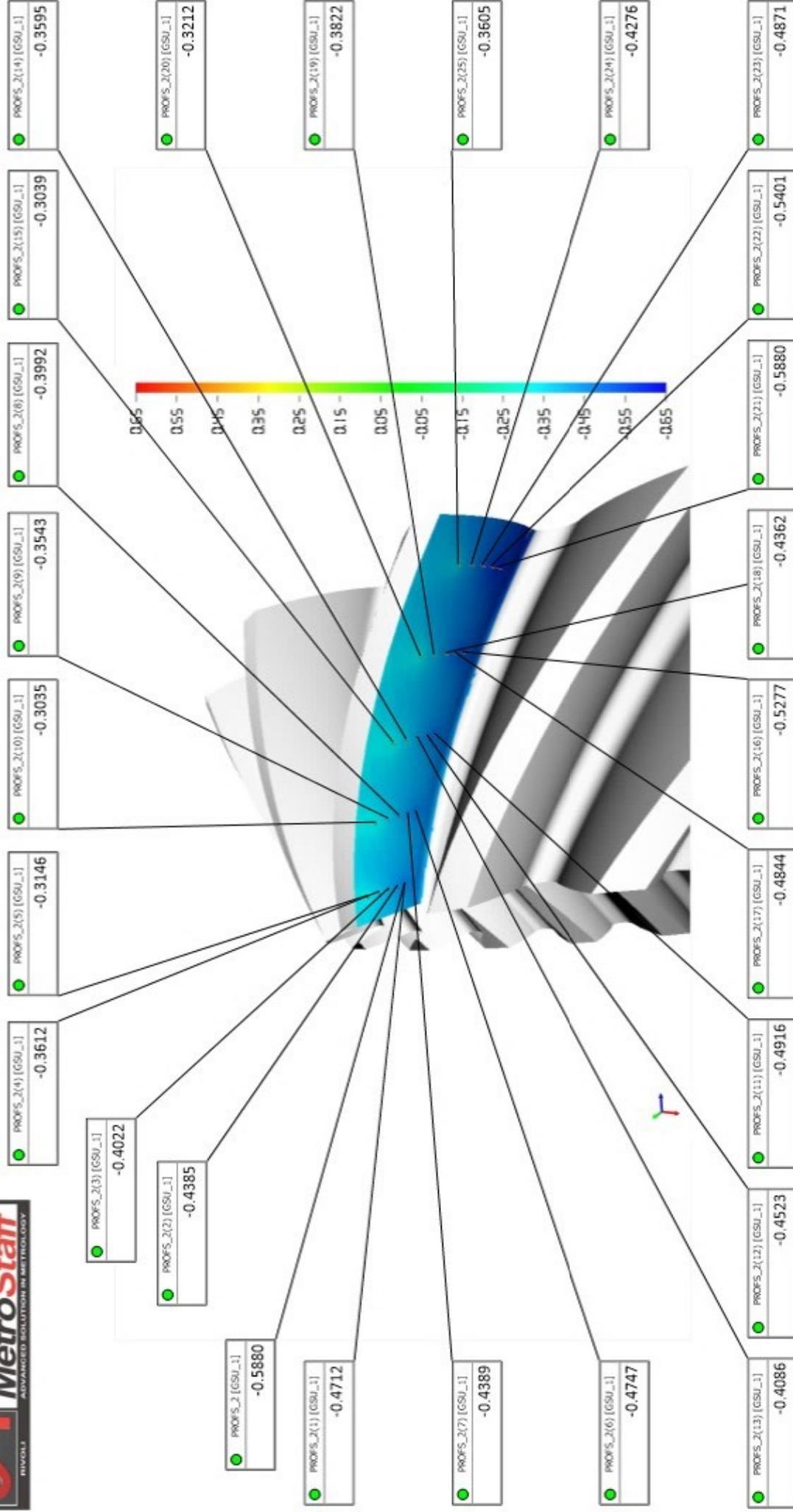


POLITECNICO TORINO
Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_3_FACE_MILLING_PIGNONE	Customer
Drawing	3	Operator
Serial number		Sign
Part ID	FIANCO 3	Notes
CAD model		
Date	06-12-2020	Page 1 of 1



Overall view



POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

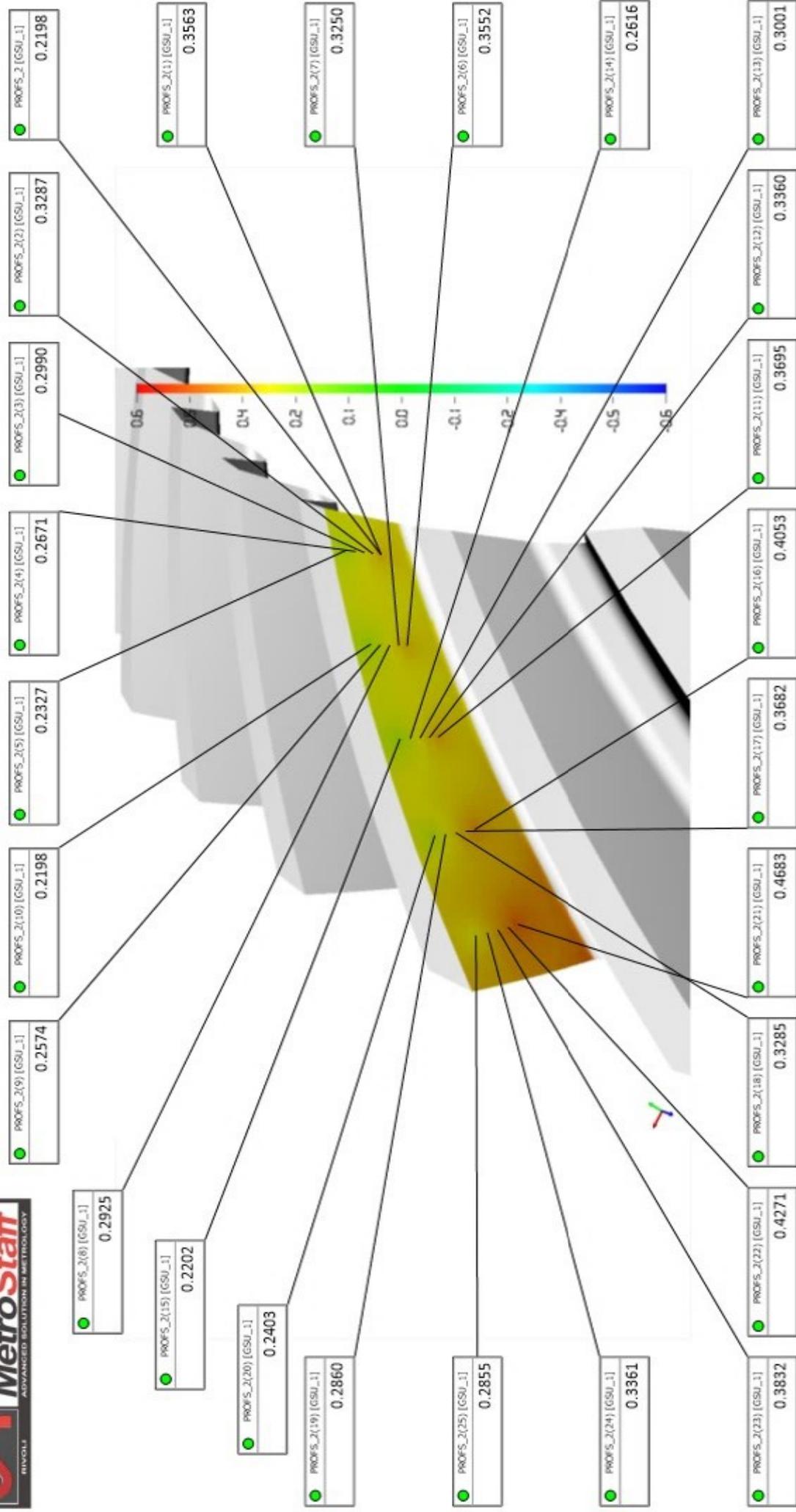
Project	COPPIA_3_FACE_MILLING_PIGNONE	Customer	
Drawing	4	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 4	Notes	
CAD model			
Date	06-12-2020	Page	1 of 1

Appendice F

Report grafici Coppia 3 Ruota



Overall view



POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project: COPPIA_3_FACE_MILLING_RUOTA

Drawing: 1

Serial number:

Part ID: FIANCO 1

CAD model:

Date: 06-12-2020

Customer:

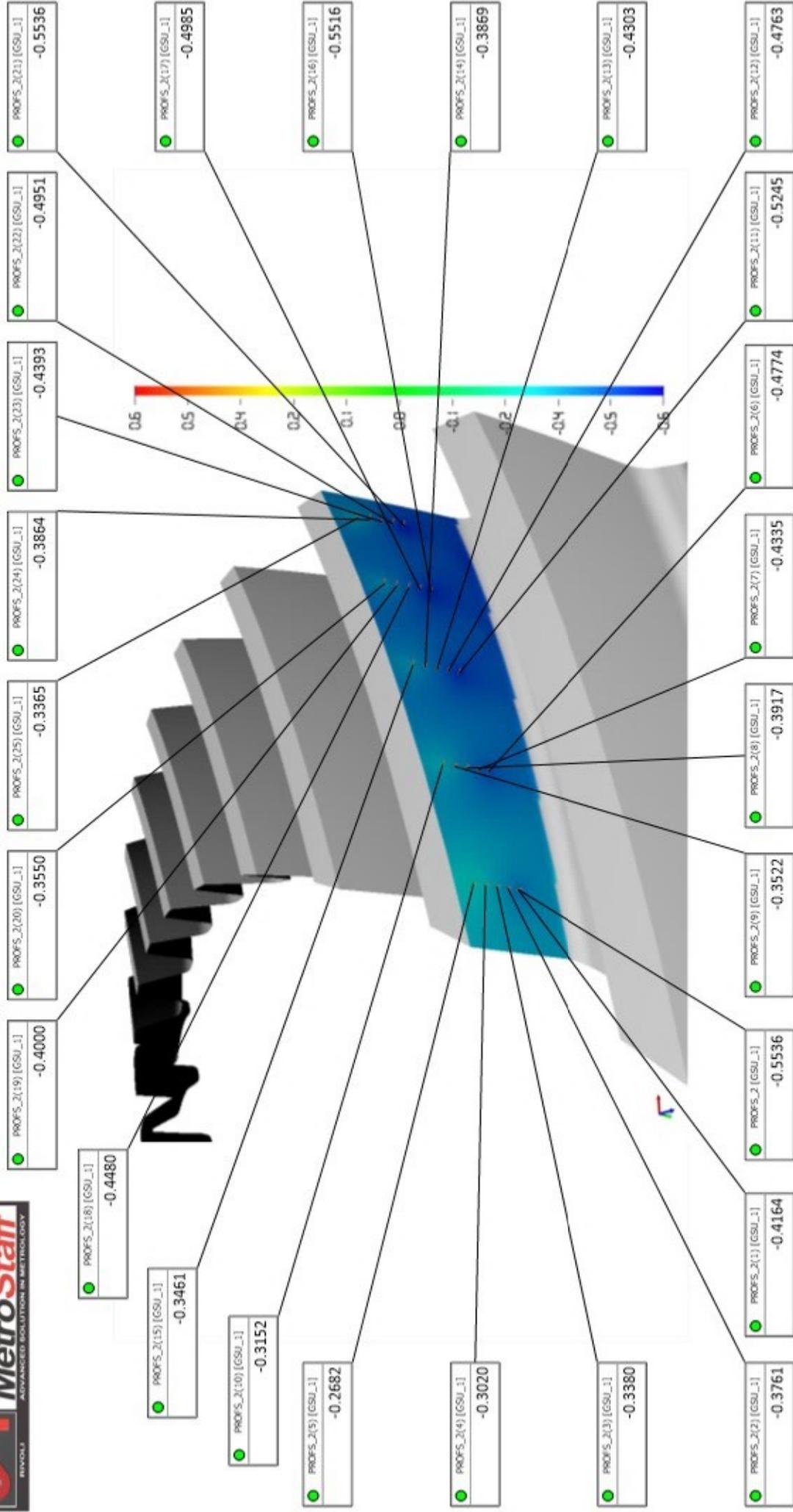
Operator:

Sign:

Notes:



Overall view

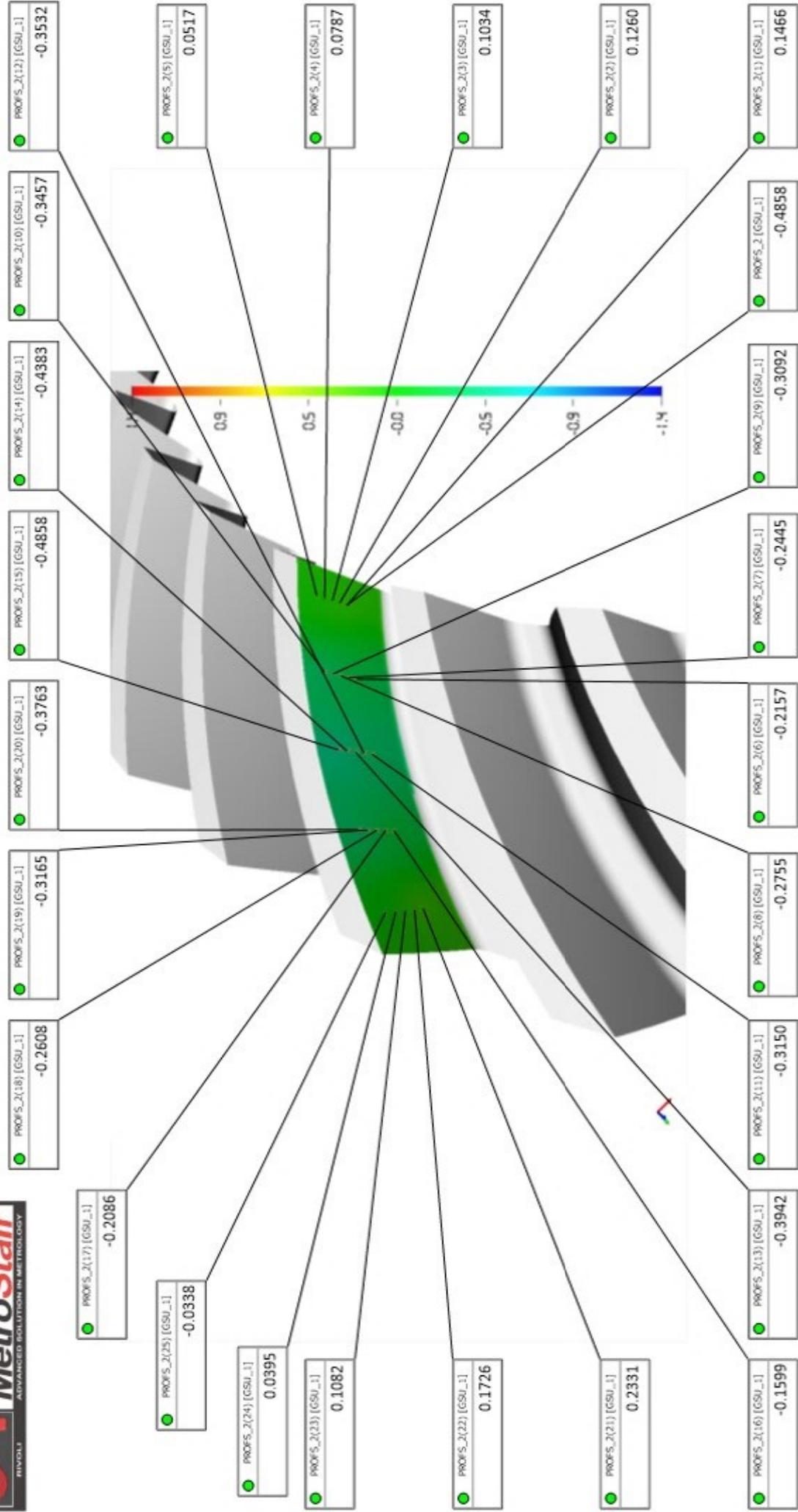


POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_3_FACE_MILLING_RUOTA	Customer	
Drawing	2	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 2	Notes	
CAD model		Page	1 of 1
Date	06-12-2020		

Overall view



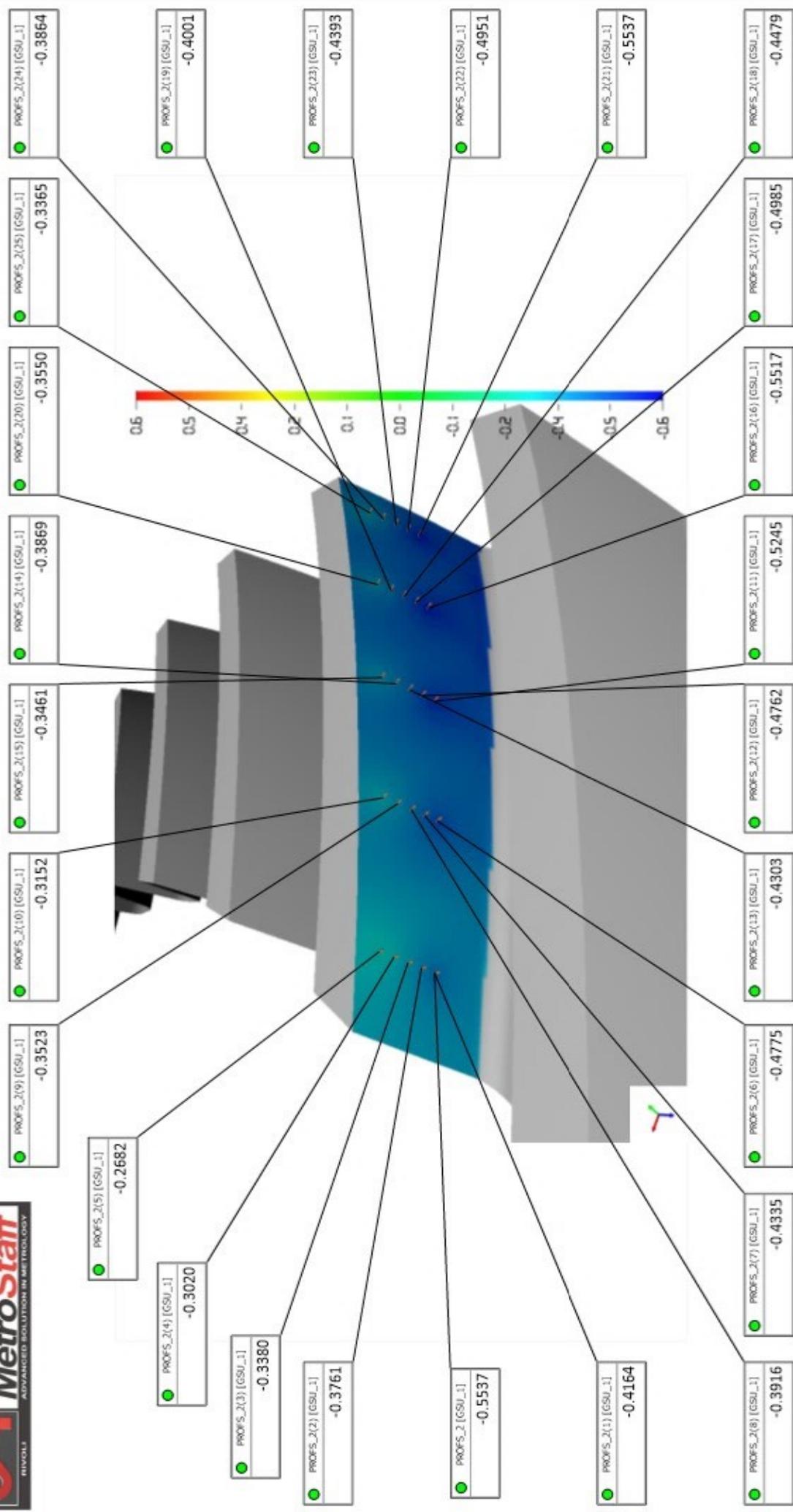
POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_2_FACE_HOBGING_RUOTA	Customer	
Drawing	3	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 3	Notes	
CAD model		Page	1 of 1
Date	06-12-2020		



Overall view



POLITECNICO TORINO

Corso Duca degli Abruzzi

Project	COPPIA_3_FACE_MILLING_RUOTA	Customer	
Drawing	4	Operator	
Serial number		Sign	
Part ID	FIANCO 4	Notes	
CAD model			
Date	06-12-2020	Page	1 of 1

Bibliografia

- [1] ISO23509:2016(E) - Bevel and hypoid gear geometry. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, November 2016.
- [2] Jan Klingelnberg. *Bevel Gear*. Springer, 2016.
- [3] H Ligata and HH Zhang. Geometry definition and contact analysis of spherical involute straight bevel gears. *International Journal of Industrial Engineering*, 23(2):101–111, 2012.
- [4] Vincenzo Vullo. *Gears: Volume 1: Geometric and Kinematic Design*, volume 10. Springer Nature, 2020.
- [5] Damir T Jelaska. *Gears and gear drives*. John Wiley & Sons, 2012.
- [6] Stephen P Radzevich. *Gear cutting tools: fundamentals of design and computation*. CRC Press, 2010.
- [7] I Tsiafis, P Mamouri, and S Kompogiannis. Design and manufacturing of spiral bevel gears using cnc milling machines. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 393, page 012066, 2018.

- [8] ISO17485:2006 Bevel gears - ISO system of accuracy. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, November 2006.
- [9] ISO10064:2009(E) - Code of inspection practice – Part 6: Bevel gear measurement methods. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, February 2009.
- [10] Y. C. Tsai and P. C. Chin. Surface Geometry of Straight and Spiral Bevel Gears. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 109(4):443–449, 12 1987.
- [11] <https://www.kisssoft.com/ru/products/technical-description/brochures/kisssoft-release-2020-user-manual>, November 2020.