

---

# Closed Loop for Gears: come realizzare una “buona” coppia di ingranaggi

---

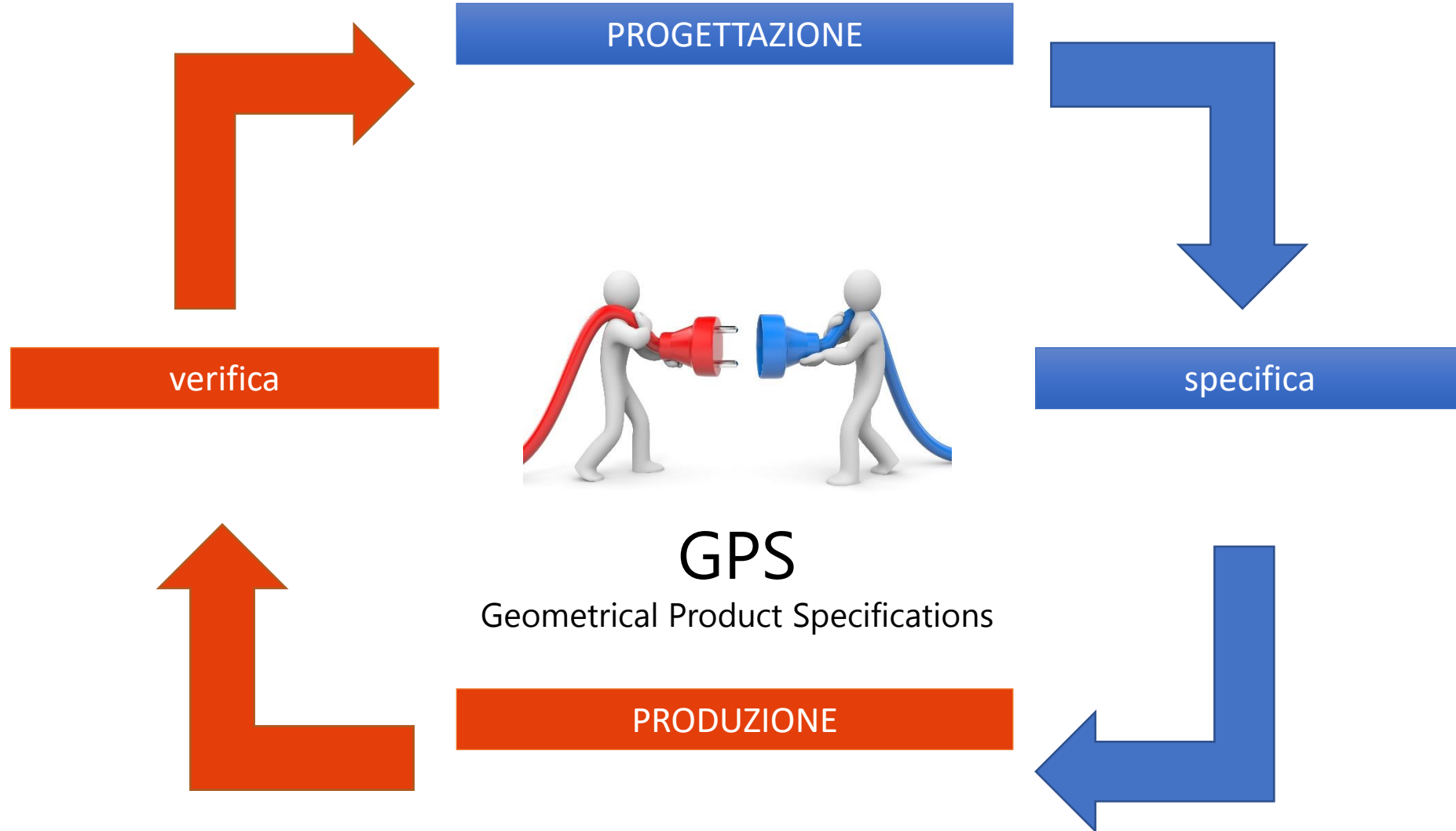
**ing. Ivan Saltini - KISSsoft Italy Country Manager**  
**ing. Massimiliano Turci - Senior Gear Specialist**

**KISSsoft**  
A Gleason Company

Associazione meccanica  
15 giugno 2023

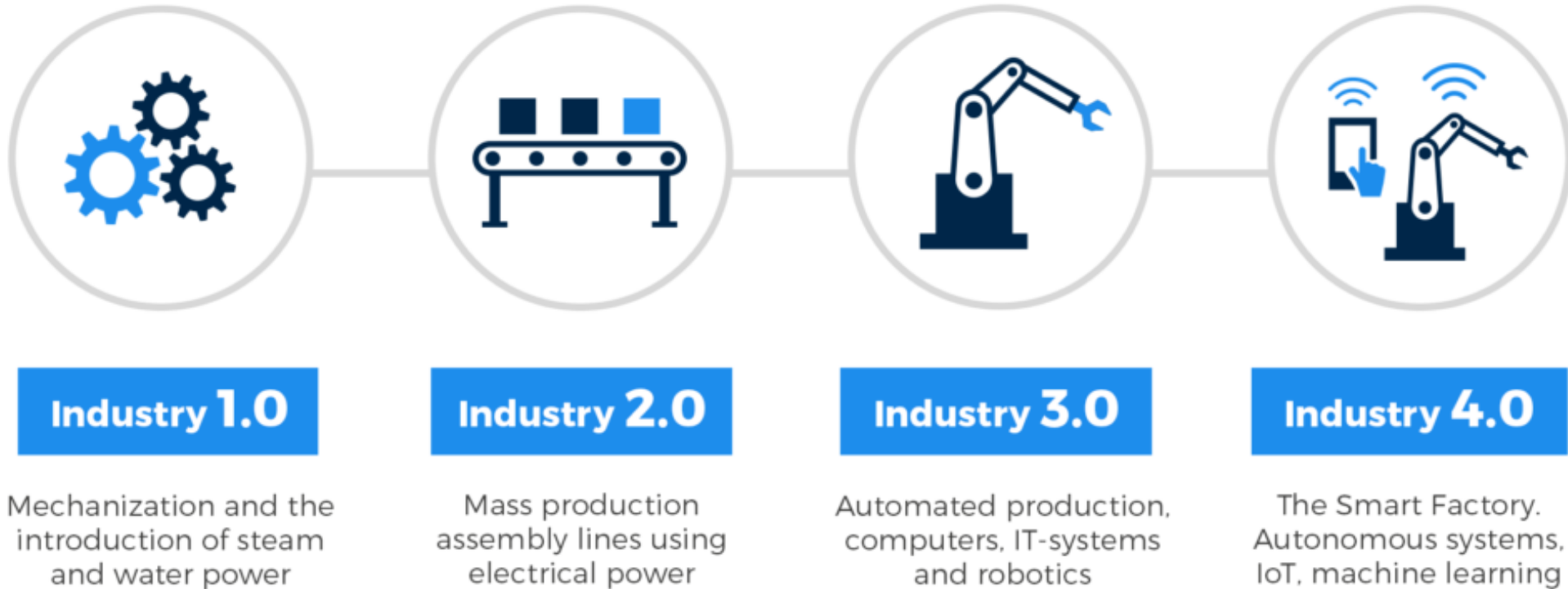


# Closed loop: definizione



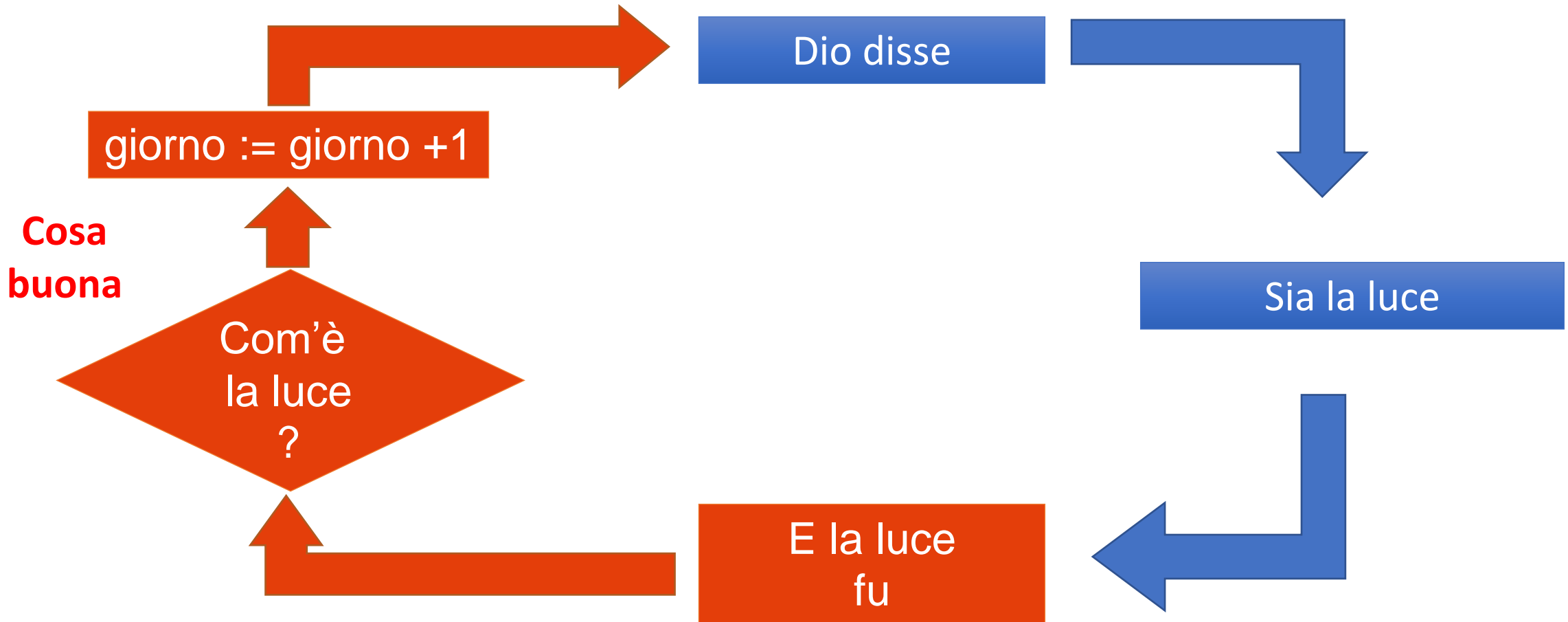
# Closed loop: un po' di storia

“Closed loop” & “Industry 4.0”  
Hannover Messe 2011



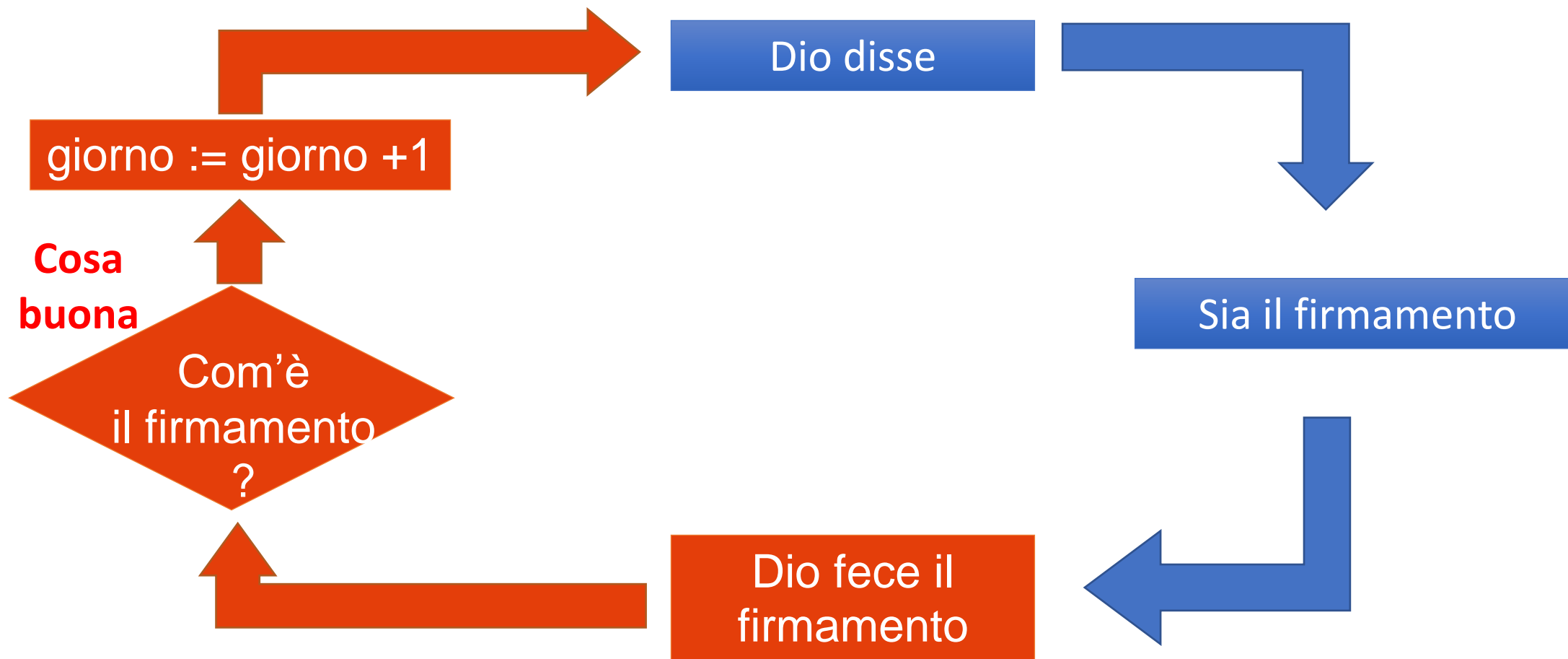
# Closed loop: un po' di storia

“Closed loop” & “Racconto della creazione”  
Genesi (VII-VI secolo AC)



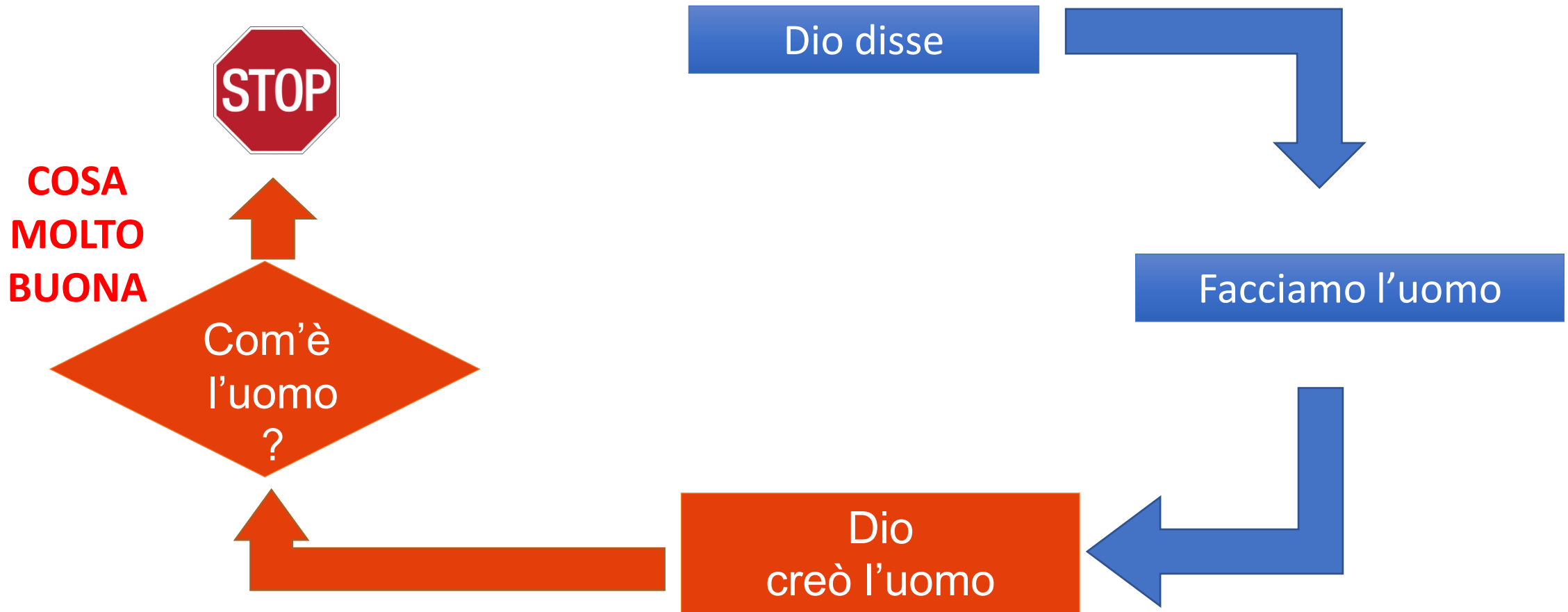
# Closed loop: un po' di storia

“Closed loop” & “Racconto della creazione”  
Genesi (VII-VI secolo AC)



# Closed loop: un po' di storia

“Closed loop” & “Racconto della creazione”  
Genesi (VII-VI secolo AC)

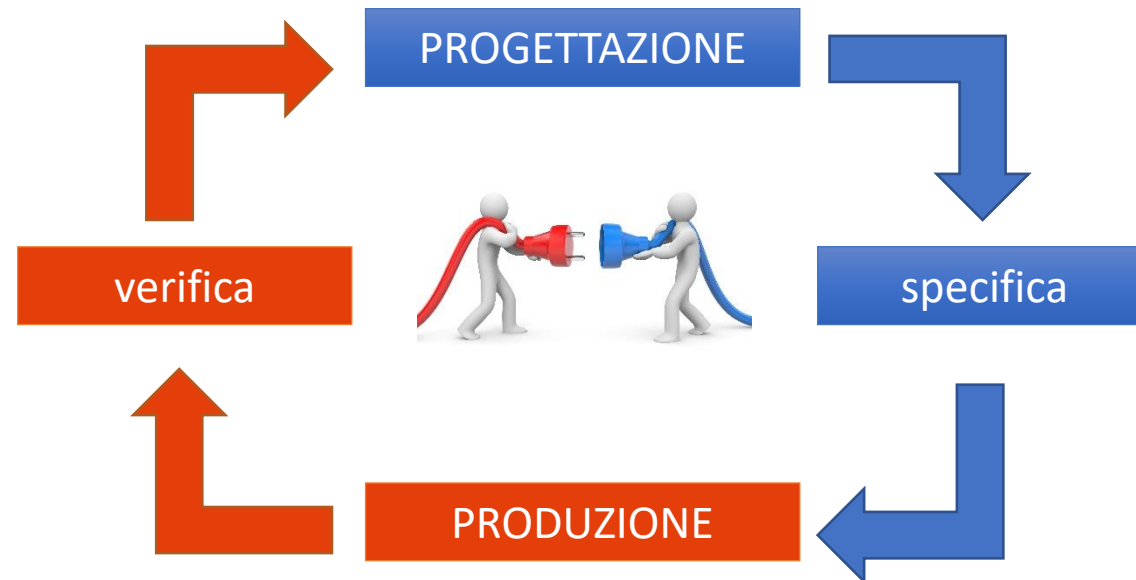


# Closed loop: un po' di storia

Il Closed loop è divino

Closed loop è il metodo migliore per fare le cose

Closed loop è il metodo migliore per fare gli ingranaggi



# Esempi

**Coppie coniche**

**Ingranaggi cilindrici: Waviness**

**Ingranaggi cilindrici: Twist**

**Ingranaggi cilindrici: profilo K**

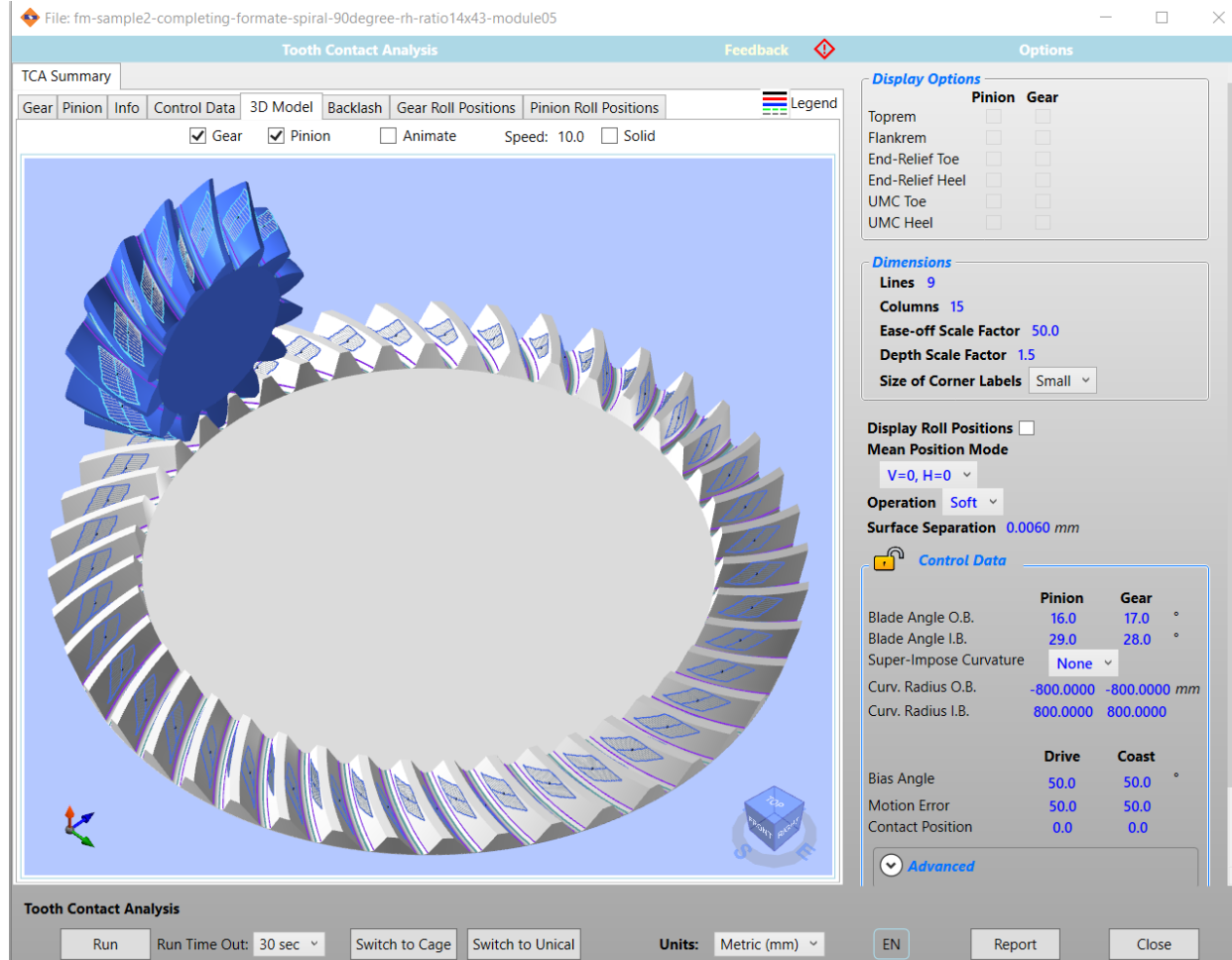
**Corone in bronzo per viti senza fine**

**Dalla telemetria al calcolo con spettro: Rainflow**



# Coppie coniche

Solo pochi eletti\* ne conoscono la vera geometria

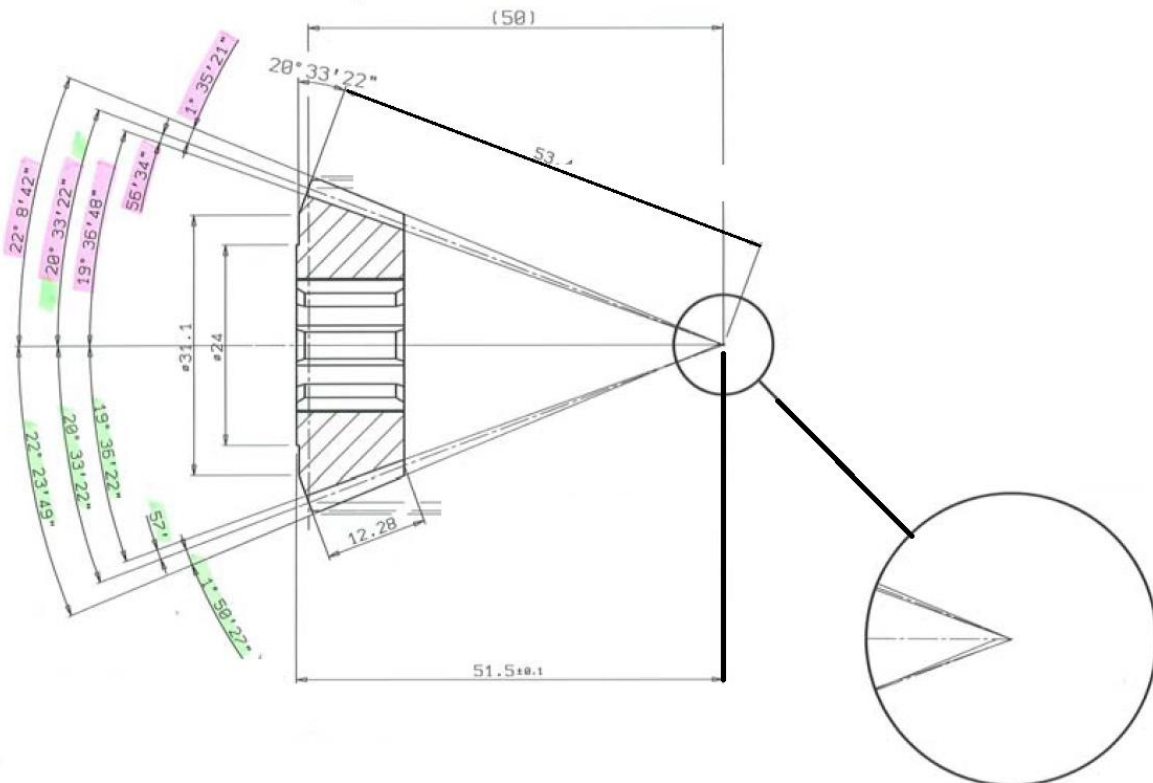


**SELF-CLOSED LOOP**

\* automotive, aerospace, agriculture, ...

# Coppie coniche

La maggior parte delle aziende\*  
non può definirli o conoscerla pienamente



Va richiesta al fornitore  
per poter fare un calcolo a  
resistenza realistico

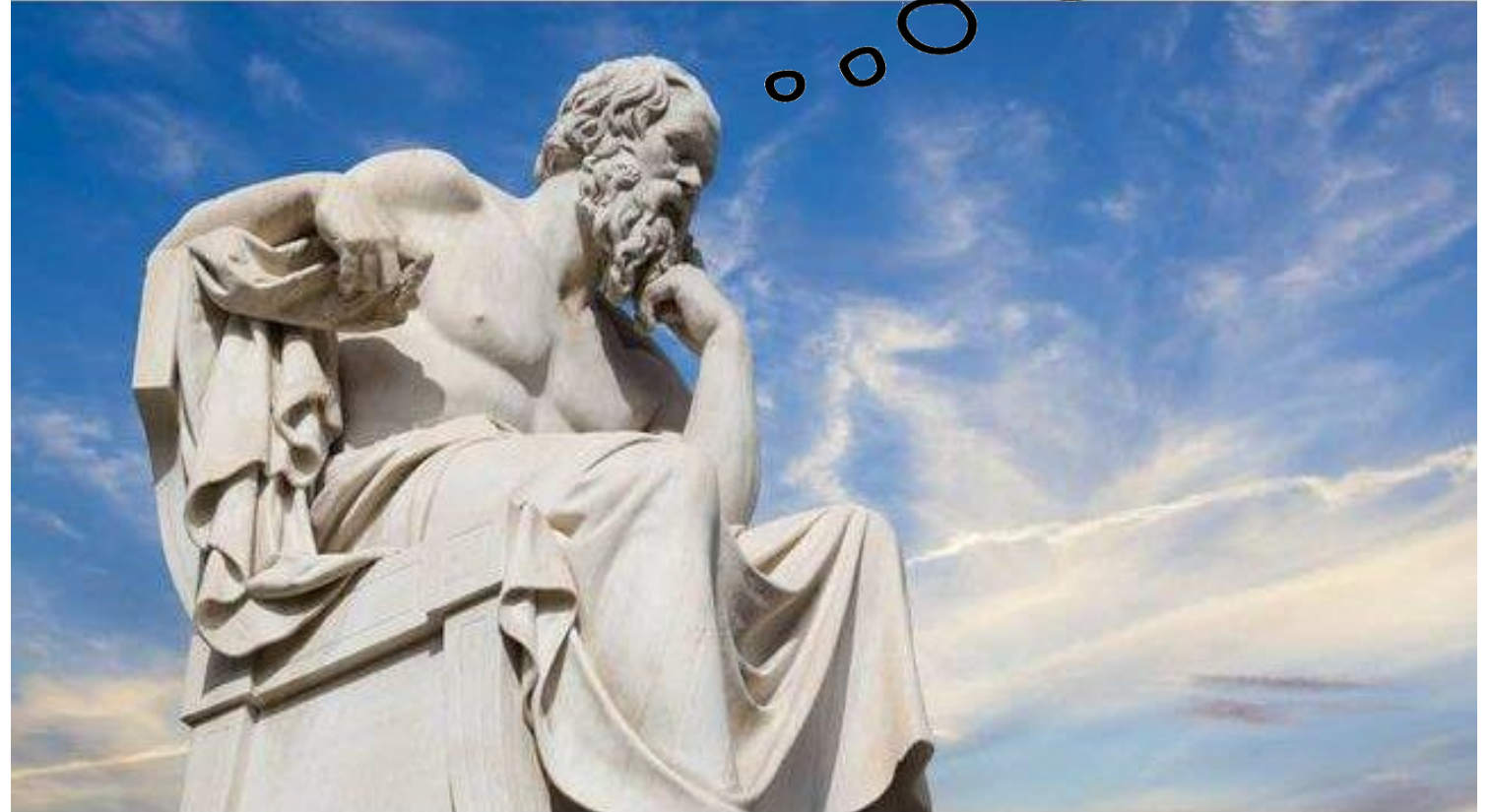
\* Industrial gearboxes, tool machines

# Coppie coniche

**“So di non sapere”**

(Socrate, V secolo AC)

(progettisti di coppie coniche, XXI secolo DC)



# Coppie coniche

Come si progetta una coppia conica:

**de2**

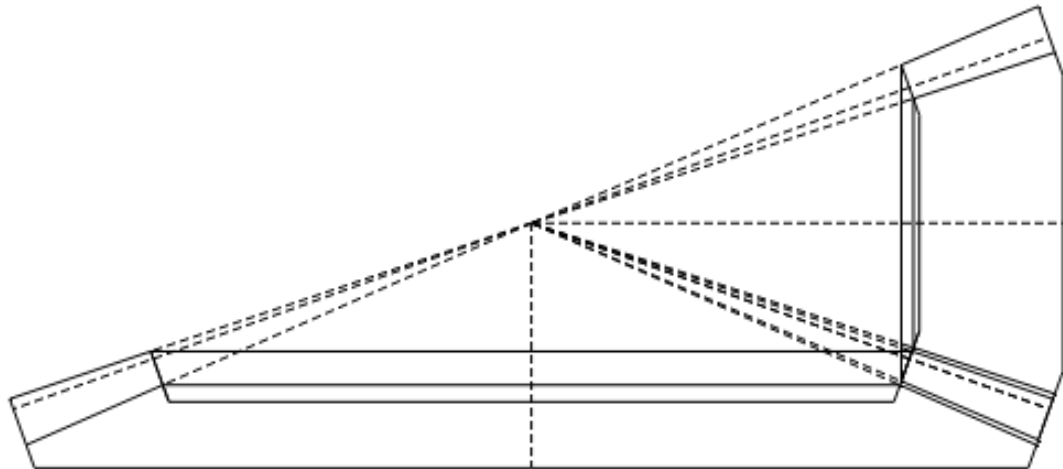
$$de1 = de2 / \mathbf{ratio}$$

$$\begin{cases} z1 + z2 \geq 40 \\ z2 / z1 = \mathbf{ratio} \end{cases}$$

$$\alpha = 22.5^\circ \text{ (or } 20^\circ)$$

$$\beta = 35^\circ \text{ (or } 30^\circ)$$

$$b = 1/3 \text{ lunghezza della generatrice}$$

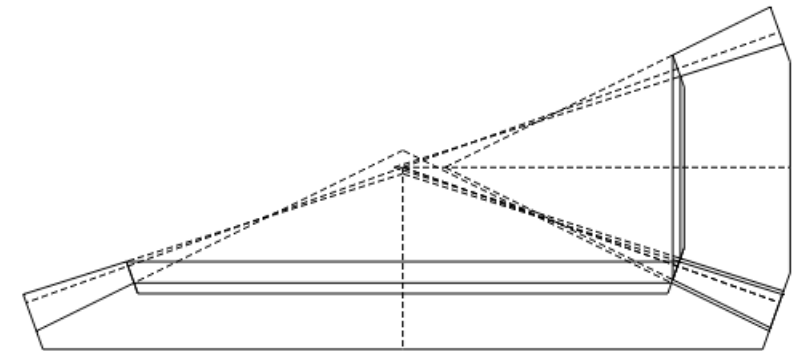
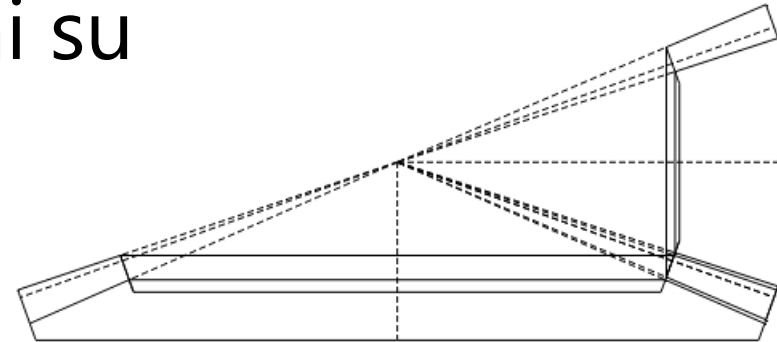
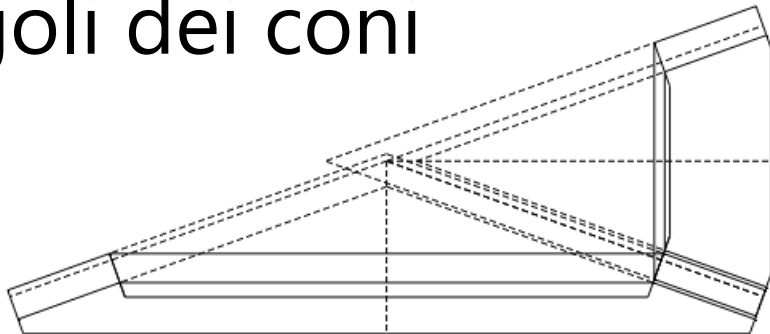


# Coppie coniche

Il progettista può mettere a disegno solo 6 parametri  
 $m$  (or  $d_{e2}$ ),  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $b$

Il progettista non ha informazioni su

- Spessore dente
- Altezza dente
- Raggio fondo dente
- Angoli dei coni



# Coppie coniche

Come si potrà mai calcolare la resistenza in queste condizioni?

## 5.2.1 Fundamental bending stress formula

The fundamental formula for bending stress of gear teeth is:

$$s_t = \frac{2T_P}{F d} \frac{P_d K_o K_v K_s K_m}{1 K_x J} \quad \dots(5)$$

$$\sigma_F = \frac{2000 T_1}{b d_{e1}} \frac{K_A K_v Y_x K_{H\beta}}{m_{et} Y_\beta Y_J} \quad \dots(5M)$$

Pinion geometry factor:

$$J_P = \frac{Y_{KP}}{m_{NJ} K_i} \frac{r_t}{r} \frac{F_{eP}}{F} \frac{P_d}{P_m} \quad \dots(25)$$

$$Y_{J1} = \frac{Y_{K1}}{\epsilon_{NJ} Y_i} \frac{r_{myo1}}{r_{mpt1}} \frac{b_1'}{b} \frac{m_{mt}}{m_{et}} \quad \dots(25M)$$

AGMA 2003

# Coppie coniche

Stessa coppia conica prodotta da tre fornitori diversi  
 $z_1=13$   $z_2=51$   $m=4.126$   $b=30\text{mm}$   $\beta=35^\circ$   $\alpha=22.5^\circ$

	A	B	C
Mean circular thickness pinion [mm]	7.85	7.60	7.01
Mean circular thickness gear [mm]	3.10	3.40	3.98
Whole depth	8.09	8.40	8.09
Edge radius used in strength – pinion [inch]	0.015	0.020	0.040
Edge radius used in strength – gear [inch]	0.060	0.035	0.045
Cutter radius [inch]	3.000	3.750	3.000
Geometry factor - Strength – J pinion	0.2878	0.2831	0.2769
Geometry factor – Strength – J gear	0.2909	0.2861	0.3440
Strength factor Q – pinion	10.889	11.071	11.318
Strength factor Q – gear	2.74577	2.79255	2.32188

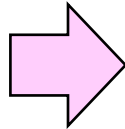


# Coppie coniche

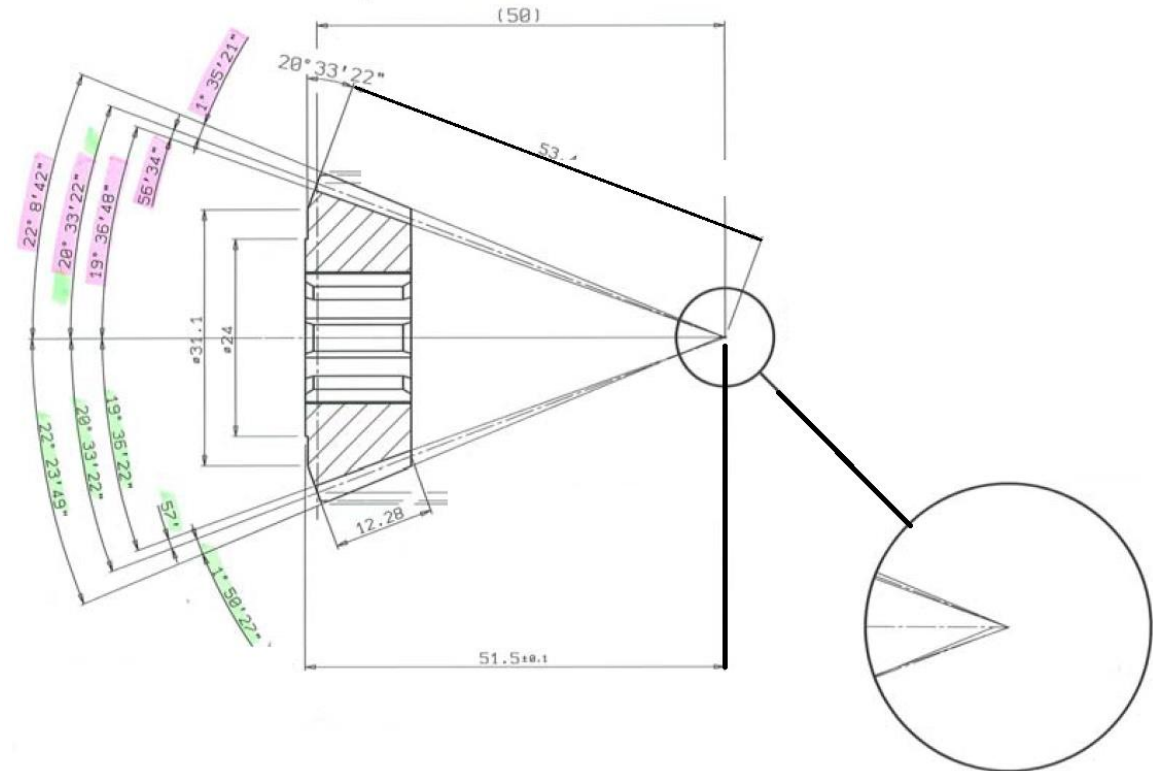
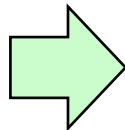
**Closed loop è**

- **Aggiornare il disegno con la geometria reale dal fornitore**
- **Calcolare la resistenza con geometria reale**

STEP 1: dal progettista



STEP 2: dall'officina





# Esempi

**Coppie coniche**

**Ingranaggi cilindrici: Waviness**

**Ingranaggi cilindrici: Twist**

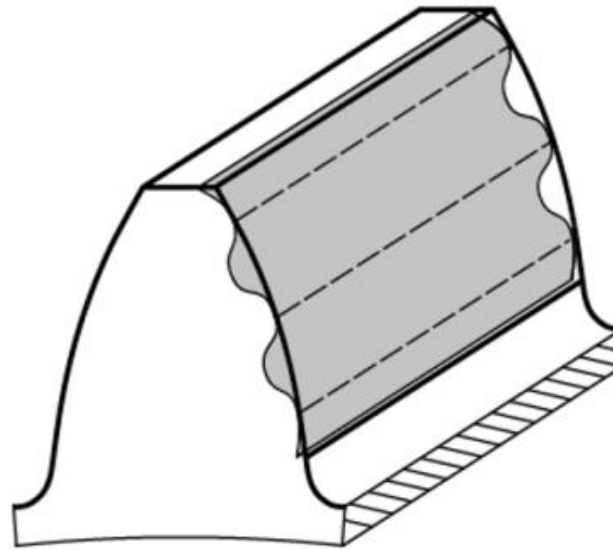
**Ingranaggi cilindrici: profilo K**

**Corone in bronzo per viti senza fine**

**Dalla telemetria al calcolo con spettro: Rainflow**

# Ingranaggi cilindrici: Waviness

La Waviness sul fianco del dente potrebbe aumentare la rumorosità.  
Ma cos'è «waviness» ?



# Ingranaggi cilindrici: Waviness

## Definizione di waviness in VDI/VDE 2612:2018 Part 1

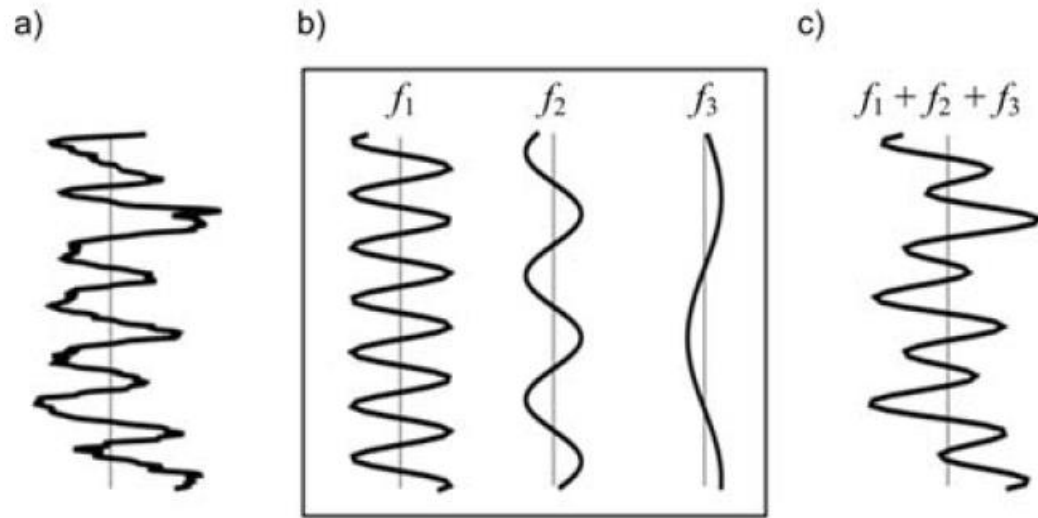


Figure 43. Waviness in measured profile or helix curves

- a) measured form deviations
- b) periodic components  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$
- c) superposition of periodic components

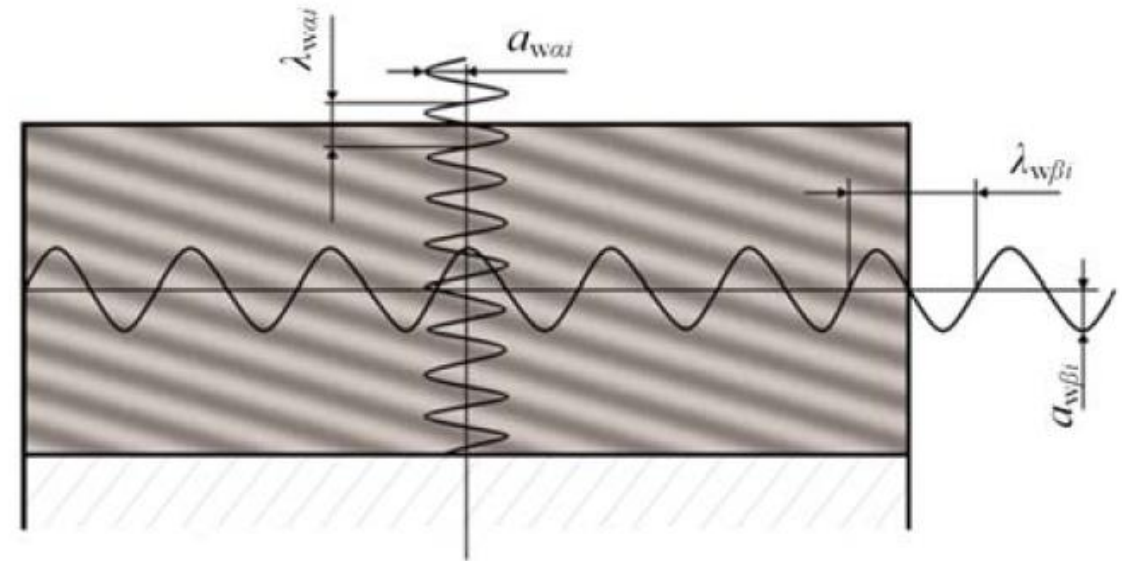
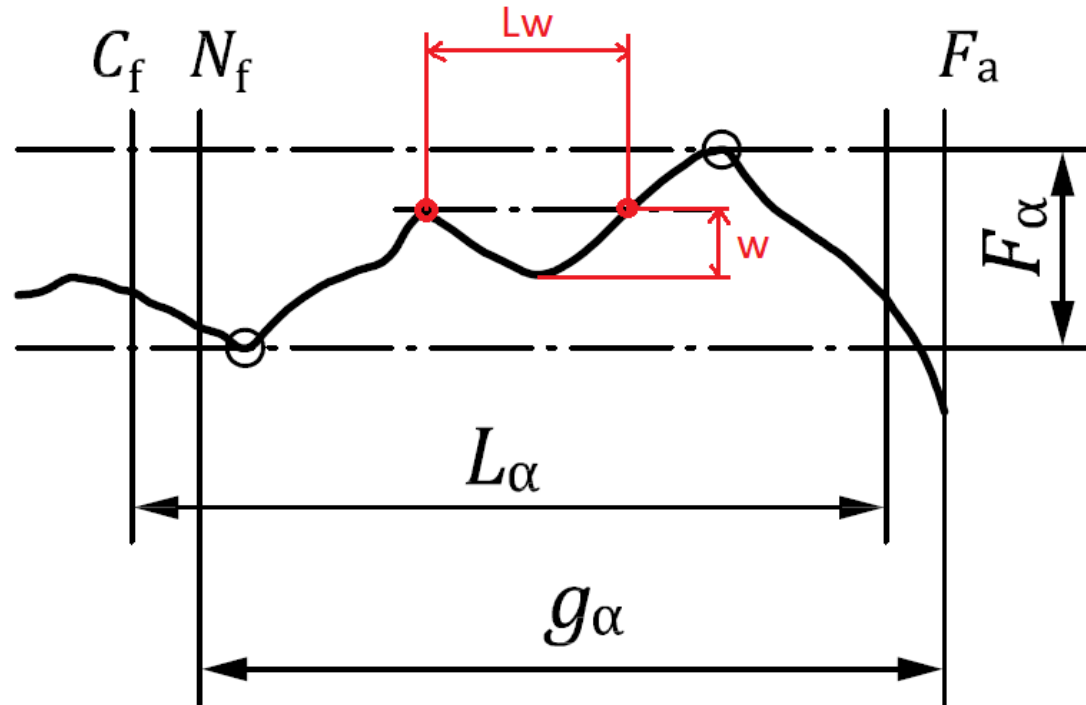


Figure 44. Amplitude and wavelength of a waviness for a profile and helix measurement

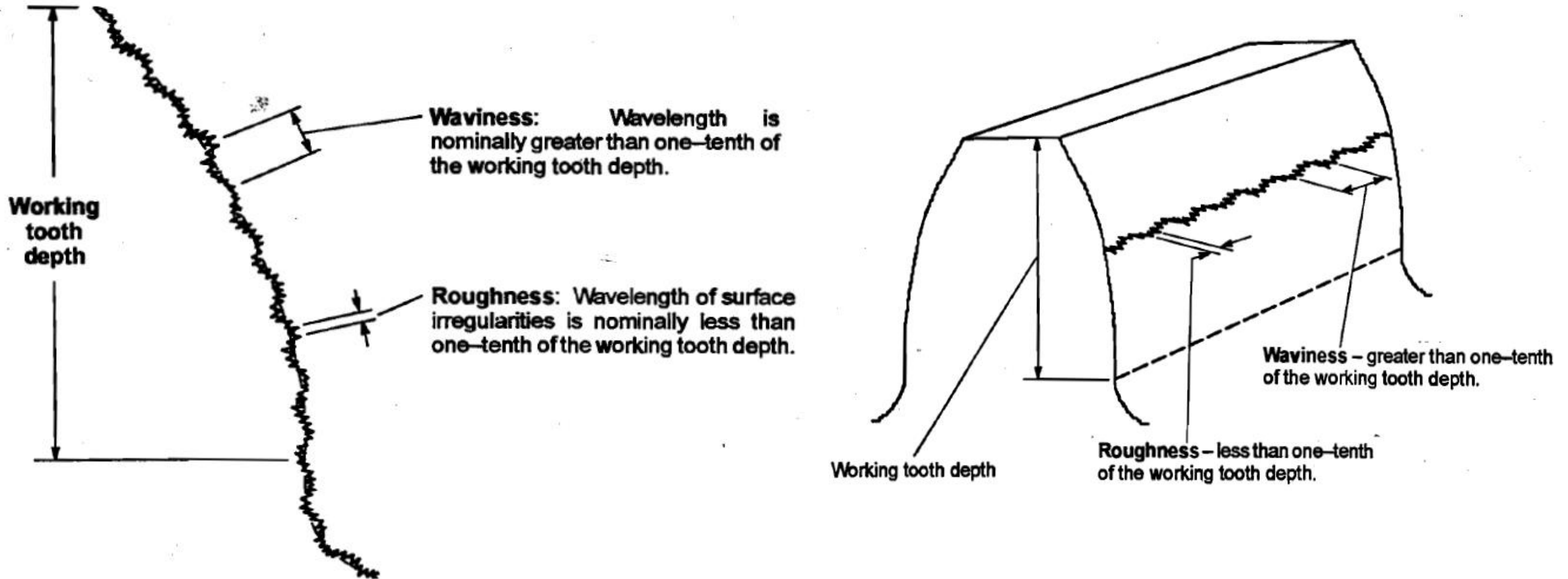
# Ingranaggi cilindrici: Waviness

Altra definizione di waviness, prima della nuova VDI 2612



# Ingranaggi cilindrici: Waviness

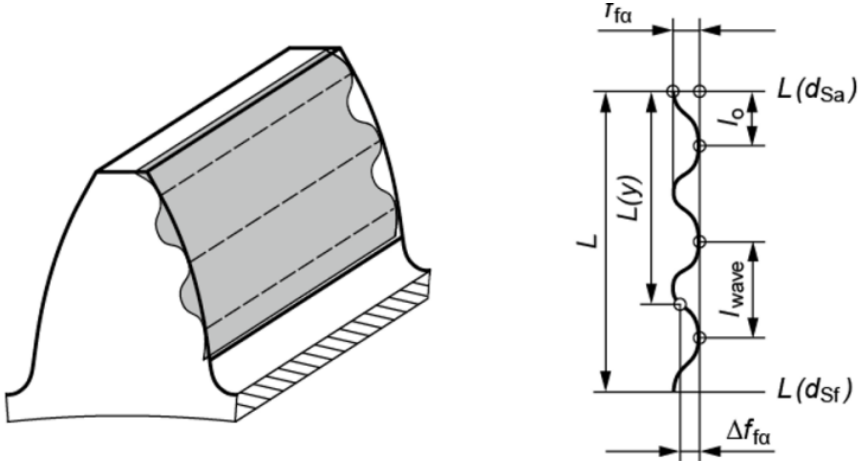
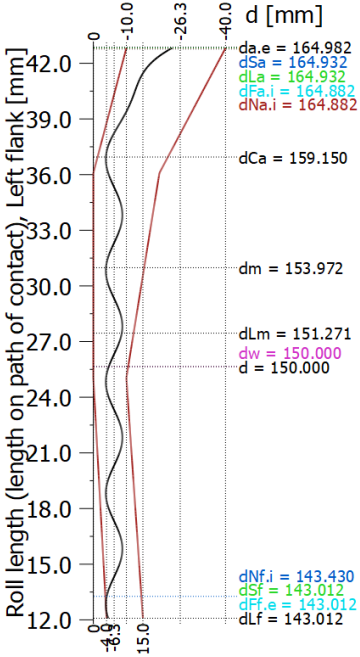
AGMA 906-A94: differenza fra waviness e rugosità



# Ingranaggi cilindrici: Waviness

In KISSsoft

1. Si può inserire la waviness come microgeometria



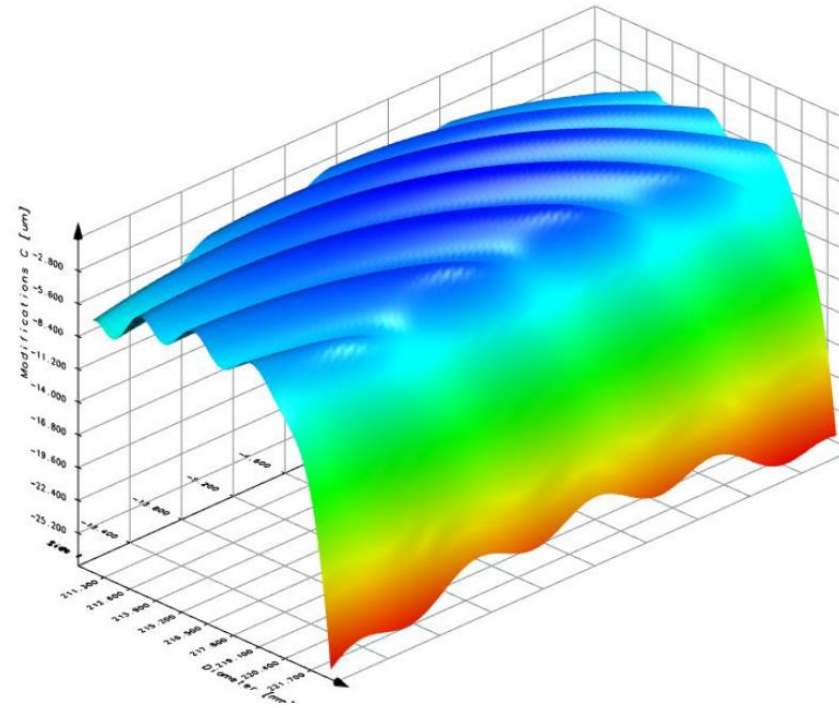
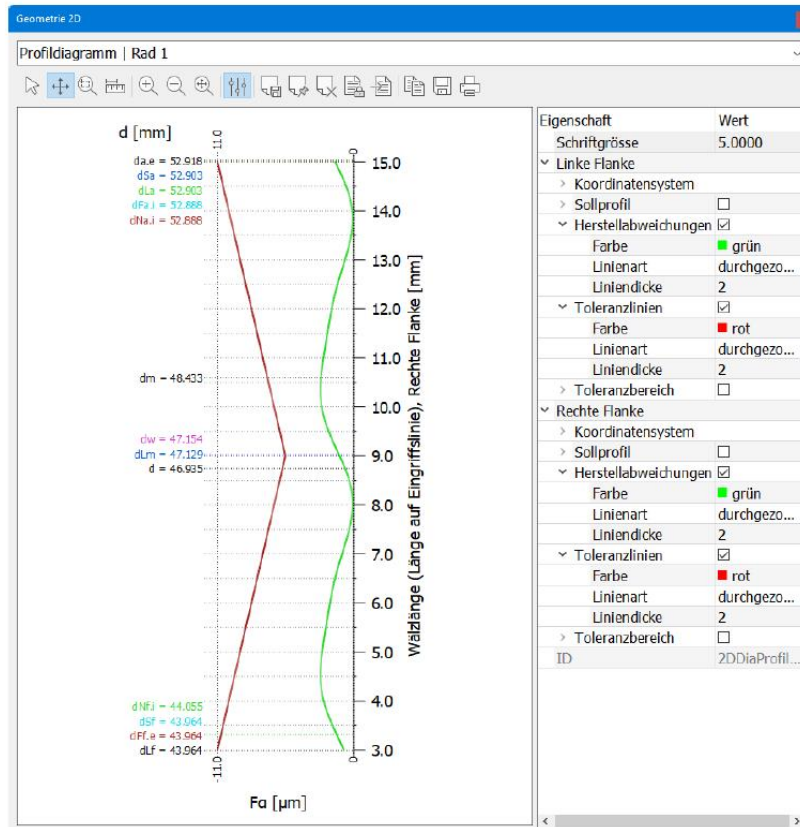
$d_{Sa}$	profile form deviation, start, at tip	$d_{Sf}$	profile form deviation, end, at root
$L$	roll length	$l_o$	phase shift
$l_{wave}$	wave length	$f_{f\alpha}$	profile form deviation, value

	Value	Factor 1	Factor 2
Inputs	$f_{f\alpha}$	$l_{wave}/m_n$	$l_o/m_n$
Conditions	$> 0$	$> 0$	-
Equation	$\Delta f_{f\alpha} = \frac{f_{f\alpha}}{2} \cdot \left[ 1 - \sin \left( 90^\circ + 360^\circ \cdot \left( \frac{L(y)}{\text{Factor 1} \cdot m_n} - \frac{\text{Factor 2}}{\text{Factor 1}} \right) \right) \right]$		

# Ingranaggi cilindrici: Waviness

In KISSsoft

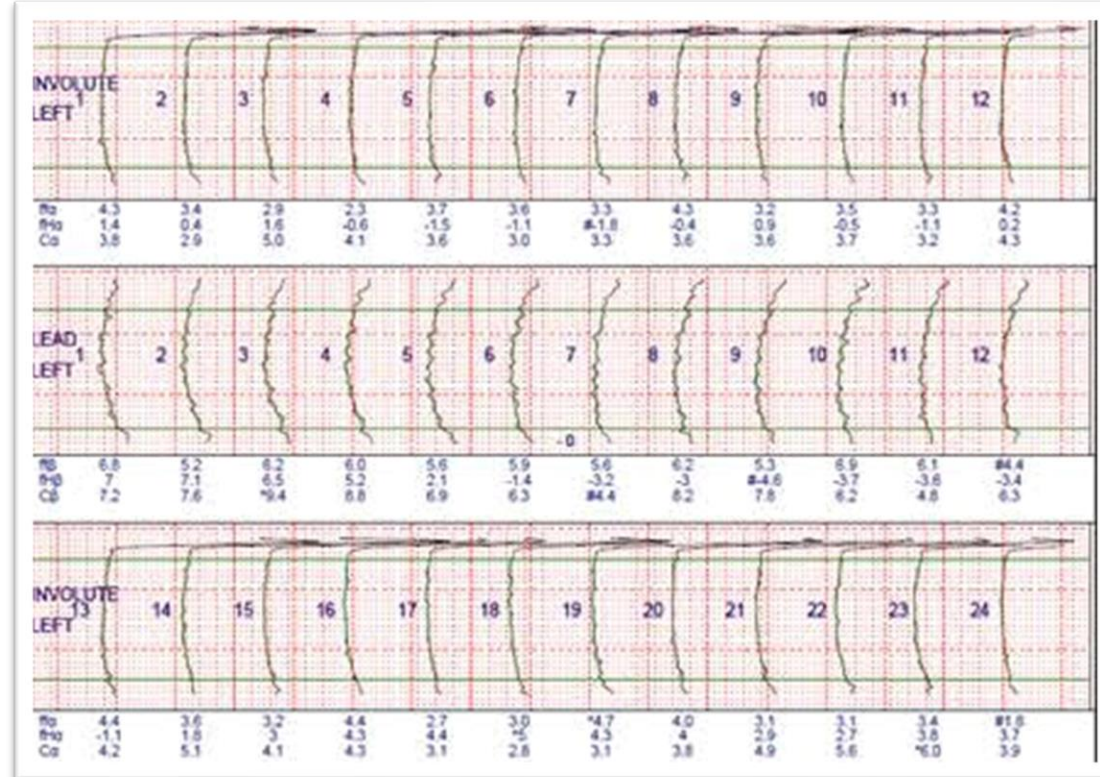
2. Si può importare la griglia media misurata dall'evolventimetro



# Ingranaggi cilindrici: Waviness

In KISSsoft

3. Si può importare la waviness misurata su ogni dente

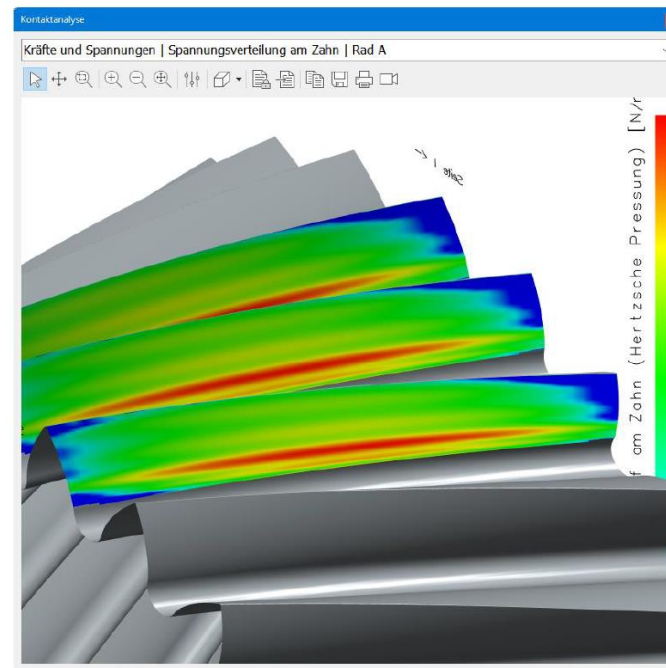
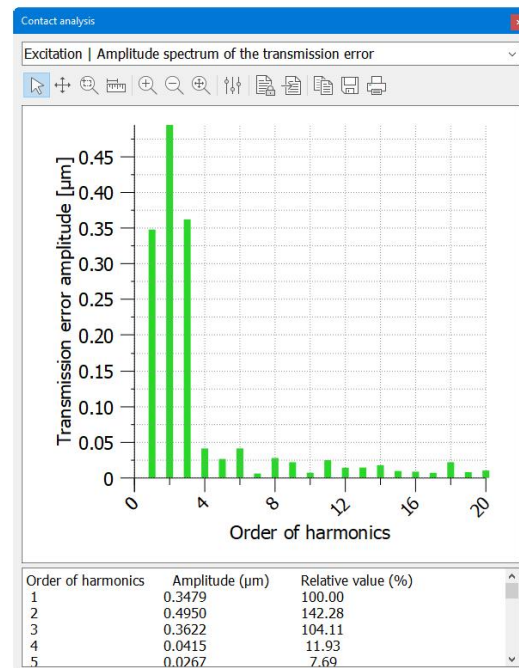




# Ingranaggi cilindrici: Waviness

In KISSsoft la LTCA può tenere conto di tre tipologie di waviness

1. Definita analiticamente
2. Misura media
3. Misura diversa per ciascun dente



# Ingranaggi cilindrici: Waviness

## **Closed loop è**

- **LTCA che tiene conto della waviness misurata**
- **Progettare tenendo già conto di una possibile waviness**

# Esempi

**Coppie coniche**

**Ingranaggi cilindrici: Waviness**

**Ingranaggi cilindrici: Twist**

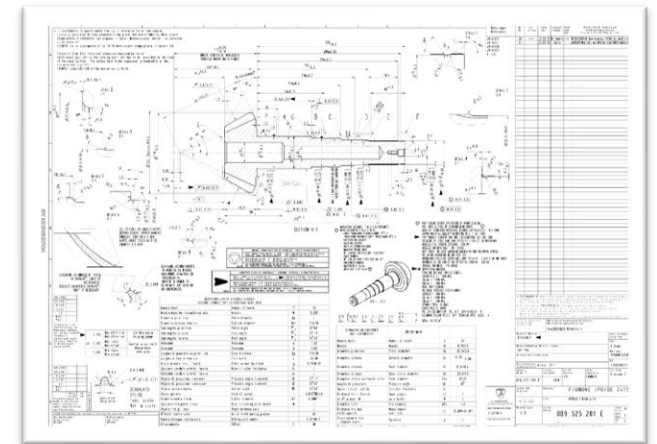
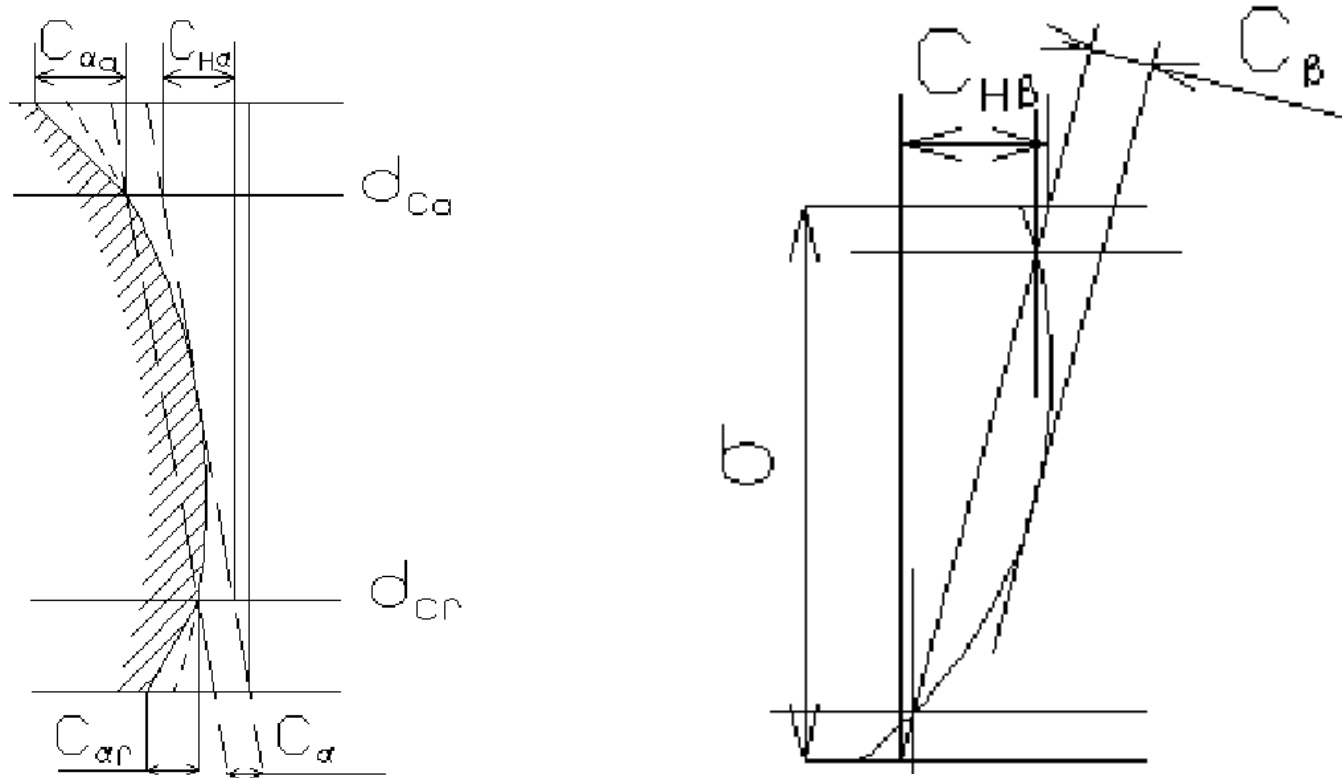
**Ingranaggi cilindrici: profilo K**

**Corone in bronzo per viti senza fine**

**Dalla telemetria al calcolo con spettro: Rainflow**

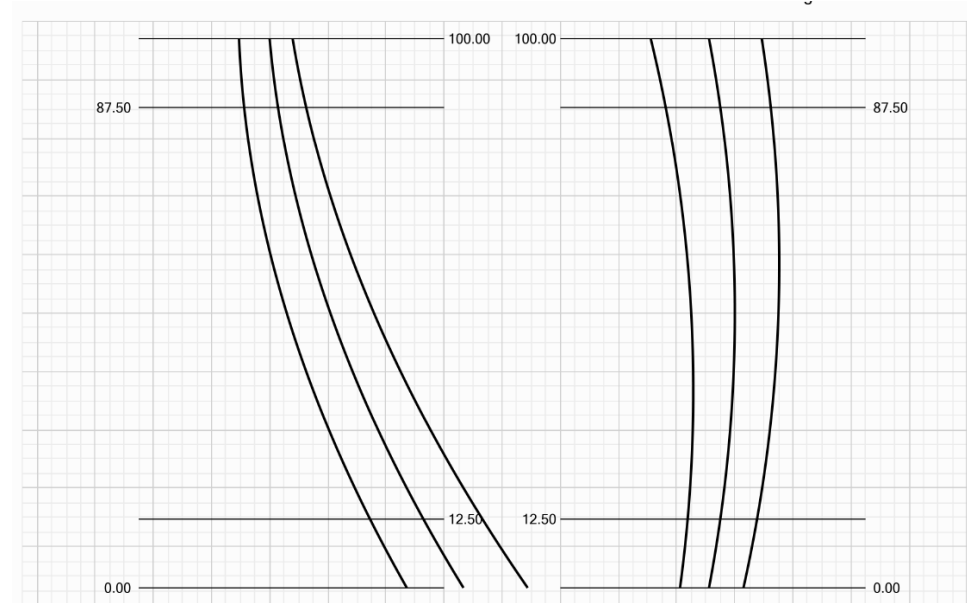
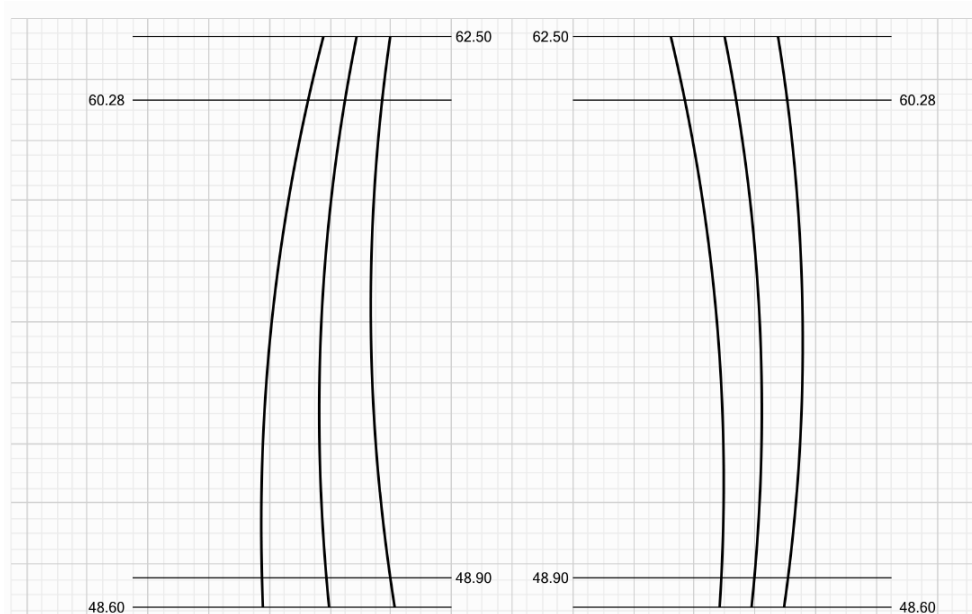
# Ingranaggi cilindrici: Twist

Nei disegni, I figurotti semplificati del profile K e della bombatura non tengono in consederazione il twist



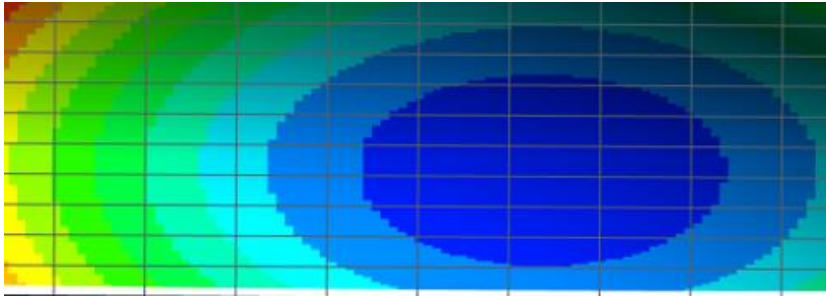
# Ingranaggi cilindrici: Twist

Il CNC della rettifica può prevedere la micro geometria finale:  
Bombatura di profile e elica insieme possono dare il twist

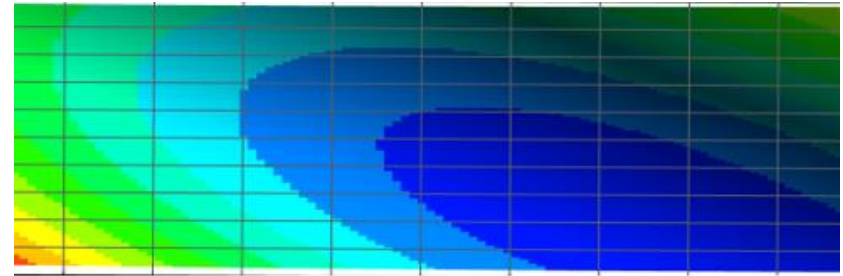


# Ingranaggi cilindrici: Twist

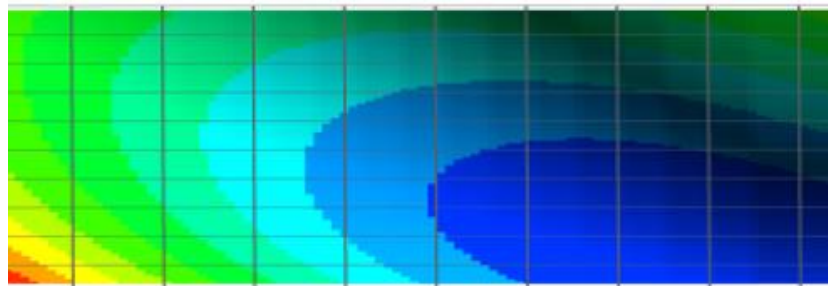
Micro-geometria del dente



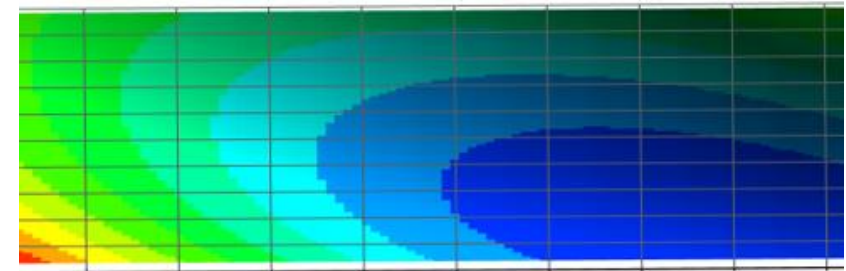
A disegno



Stimata senza compensazione



Stimata con compensazione



misurata

# Ingranaggi cilindrici: Twist

## **Closed loop è**

- **LTCA che tiene conto del twist misurato**
- **Progettare tenendo già conto di un possibile twist**

# Esempi

**Coppie coniche**

**Ingranaggi cilindrici: Waviness**

**Ingranaggi cilindrici: Twist**

**Ingranaggi cilindrici: profilo K**

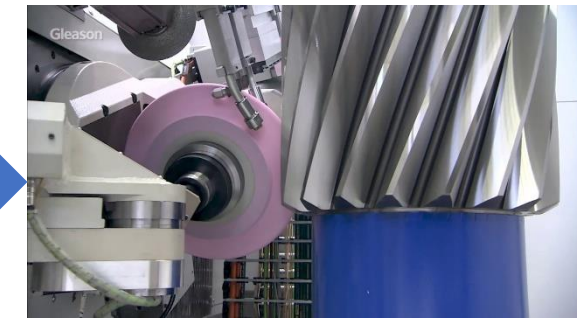
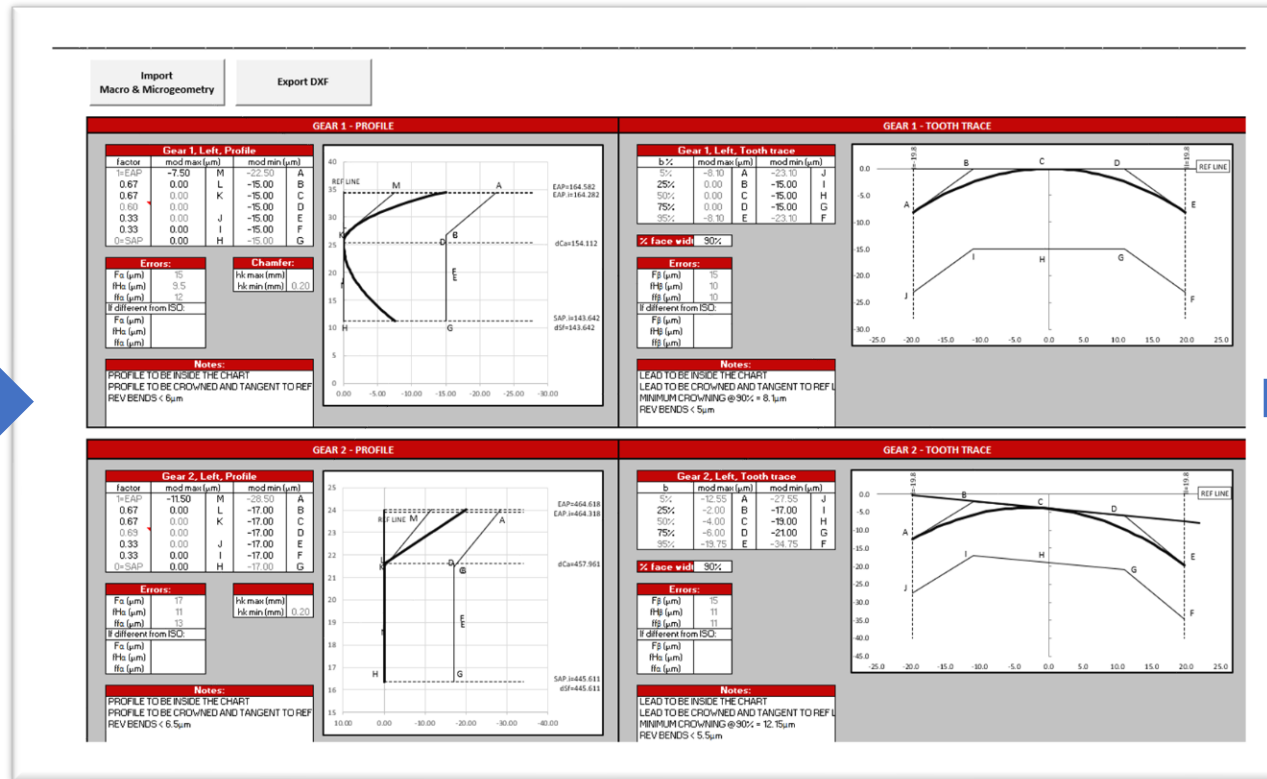
**Corone in bronzo per viti senza fine**

**Dalla telemetria al calcolo con spettro: Rainflow**



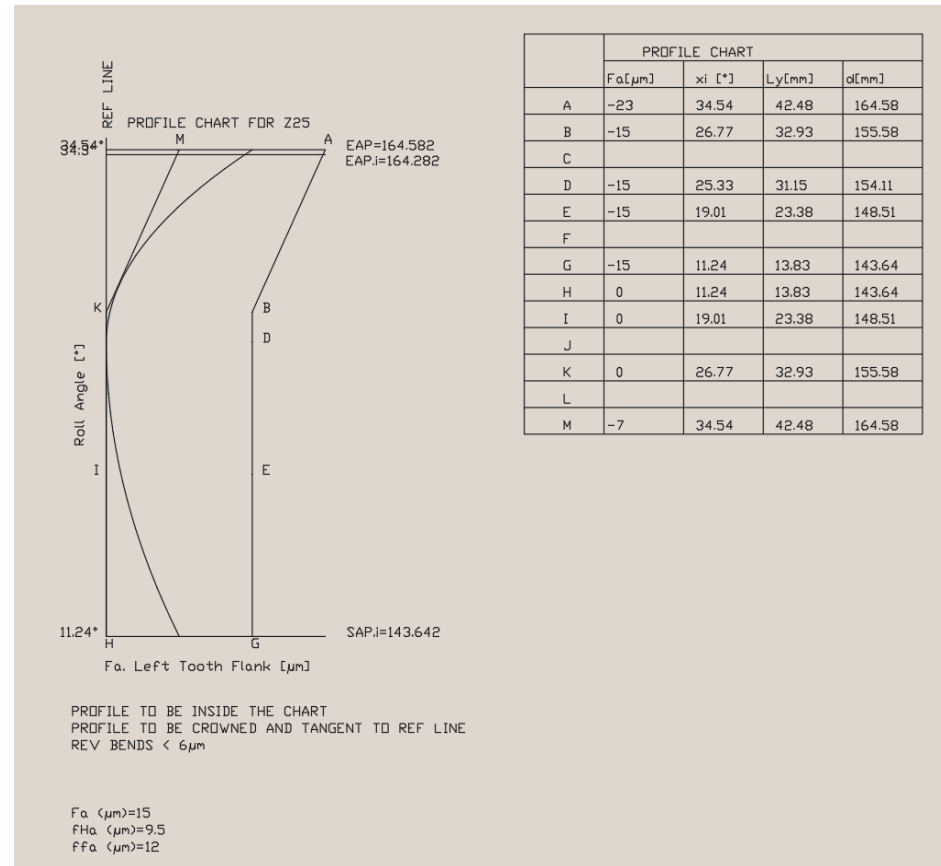
# Ingranaggi cilindrici: profilo K

Foglio di Excel collegato a KISSsoft per generare i profili K con tolleranze



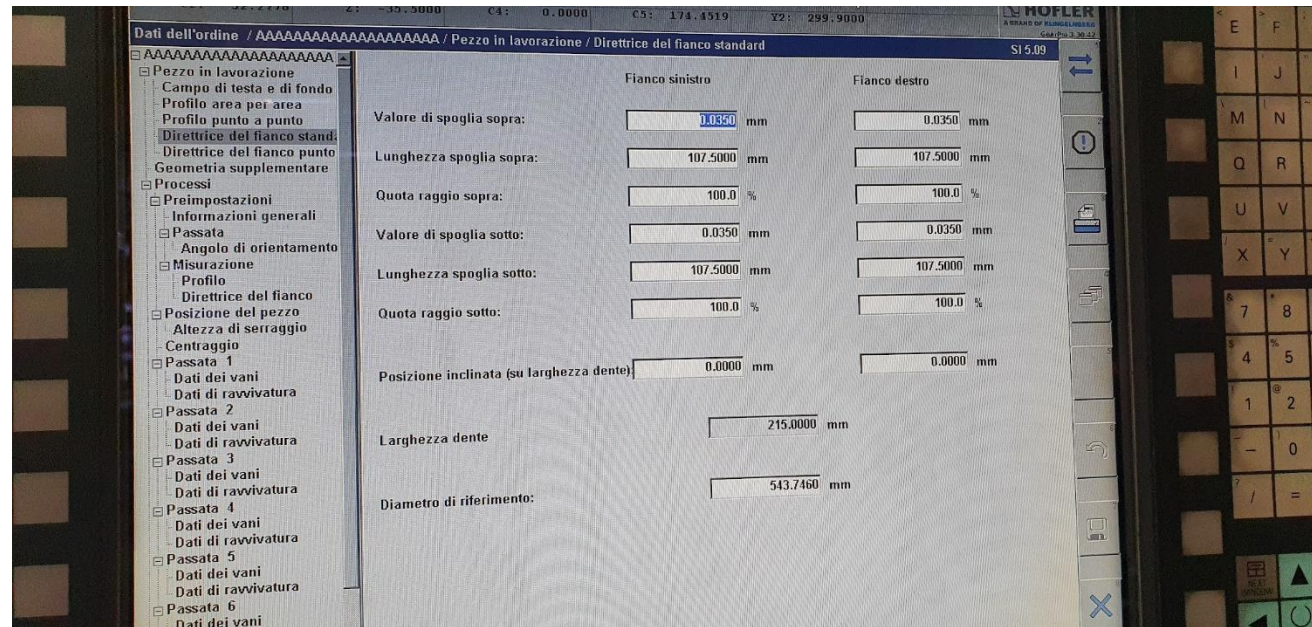
# Ingranaggi cilindrici: profilo K

Foglio di Excel collegato a KISSsoft  
per generare i profili K con tolleranze su DXF



# Ingranaggi cilindrici: profilo K

Foglio di Excel collegato a KISSsoft per generare i profili K con tolleranze su DXF come richiesto dalla macchina utensile



# Ingranaggi cilindrici: profilo K

**Closed loop è  
mettere a disegno il profilo K**

- **Come richiesto dal CNC**
- **Con le tolleranze che servono**

# Esempi

**Coppie coniche**

**Ingranaggi cilindrici: Waviness**

**Ingranaggi cilindrici: Twist**

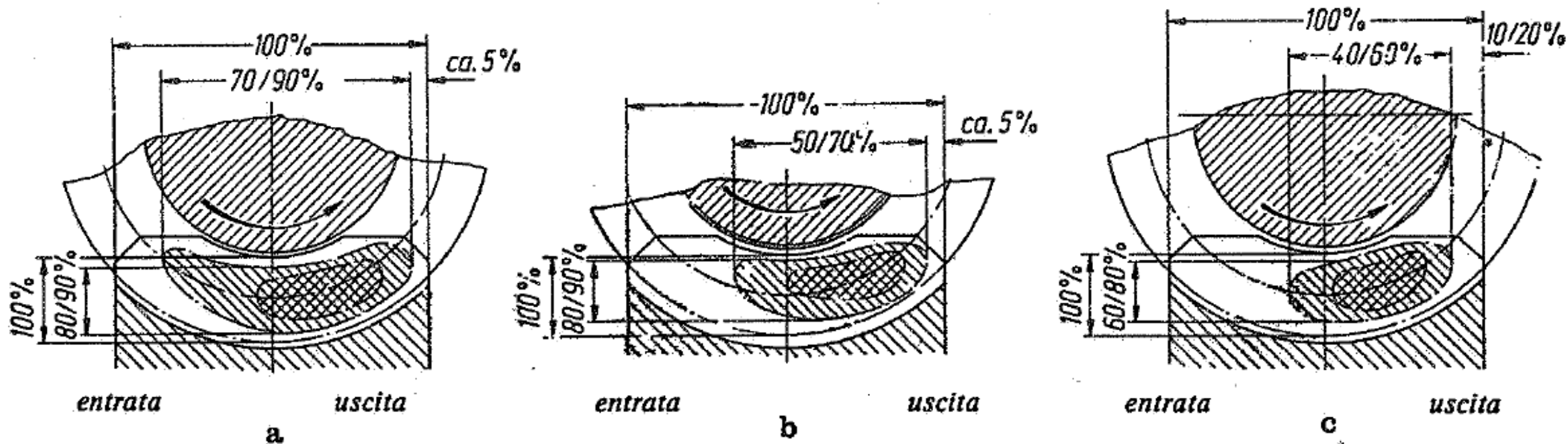
**Ingranaggi cilindrici: profilo K**

**Corone in bronzo per viti senza fine**

**Dalla telemetria al calcolo con spettro: Rainflow**

# Corone in bronzo per viti senza fine

Ottimizzazione del contatto su riduttori a vite [Niemann]



# Corone in bronzo per viti senza fine

Si usano creatori maggiorati per fare la bombatura sulla corona

$$d'_{m0} \cdot \sin \gamma'_0 = d_{m1} \cdot \sin \gamma_{m1}$$

$$\eta = \gamma'_0 - \gamma_{m1}$$

$$\tan \gamma''_0 = \frac{d'_{m0}}{d''_{m0}} \cdot \tan \gamma'_0$$

$d_{m1}$  is the worm reference diameter

$\gamma_{m1}$  is the reference lead angle of worm

$d'_{m0}$  is the oversized hobber reference diameter

$\gamma'_0$  is the oversized hobber reference lead angle

$d''_{m0}$  is the hobber reference diameter after resharpener

$\gamma''_0$  is the hobber reference lead angle after resharpener

$\eta$  is the backing angle of the hobber

# Corone in bronzo per viti senza fine

Il progettista di riduttori a vite

1. Può tener conto della maggiorazione del creatore e della sua affilatura

The screenshot displays the KISSsoft software interface for gear design. The main window shows the 'Basic data' tab with various parameters for a worm and worm wheel. A 'Script output' window is overlaid on the right, showing the results of a calculation script.

**Basic data parameters:**

- Geometry
- Axial or transverse module  $m_x, m_t$ : 2.0000 mm
- Normal pressure angle  $\alpha_n$ : 20.0000 °
- Worm: helix right hand
- Lead angle at reference diameter  $\gamma$ : 30.9639 °
- Center distance  $a$ : 40.0000 mm
- Shaft angle  $\Sigma$ : 90.0000 °
- Material and lubrication:
  - Worm: Case hardening steel, 20 MnCr 5, case-hardened, ISO 6336-5
  - Worm wheel: Bronze, CuSn12-C-GZ, untreated, DIN 3996:200
  - Lubrication: Oil bath lubrication, Own Input

**Script output:**

```
13.05.2022 17:16:04: Start run skript: directly
13.05.2022 17:16:04: gammam0: 29.96750368 °
13.05.2022 17:16:04: da0 [mm] | delta_gamma [°] | a0 [mm]
13.05.2022 17:16:04: 24.8874918 | 0.9963960785 | 40.30007578 | ok
13.05.2022 17:16:04: 24.7874918 | 0.8351117111 | 40.25007578 | ok
13.05.2022 17:16:04: 24.6874918 | 0.6719783066 | 40.20007578 | ok
13.05.2022 17:16:04: 24.5874918 | 0.5069618545 | 40.15007578 | ok
13.05.2022 17:16:04: 24.4874918 | 0.3400274509 | 40.10007578 | ok
13.05.2022 17:16:04: 24.3874918 | 0.1711392673 | 40.05007578 | ok
13.05.2022 17:16:04: 24.2874918 | 0.0002605176557 | 40.00007578 | ok
13.05.2022 17:16:04: 24.1874918 | -0.172646576 | 39.95007578 | non valido
```



# Corone in bronzo per viti senza fine

Il progettista di riduttori a vite

2. Può verificare il contatto su KISSsoft



# Corone in bronzo per viti senza fine

Il progettista di riduttori a vite

3. Può esportare la griglia da KISSsoft per l'evolventimetro (master digitale)

Release 2021-S

Basic data | Reference profile | Tolerances | Operating backlash | Script Editor | Utensili

Geometry

Axial or transverse module	$m_x, m_t$	2.0000 mm			
Normal pressure angle	$\alpha_n$	20.0000 °	Number of teeth	$z$	6
Worm		helix right hand	Facewidth	$b_1, b_{2R}$	32.0000
Lead angle at reference diameter $\gamma$		30.9639 °	Profile shift coefficient	$x$	0.0000
Center distance	$a$	40.0000 mm	Tooth thickness modification factor $x_s$		0.0000
Shaft angle	$\Sigma$	90.0000 °	Quality (DIN 3974)	$Q$	6

Material and lubrication

Worm	Case hardening steel	20 MnCr 5, case-hardened, ISO 6336-5 Figure 9/10 (MQ), Core hardness $\geq 25\text{HRC}$ Jominy J=12mm<HR
Worm wheel	Bronze	CuSn12-C-GZ, untreated, DIN 3996:2005
Lubrication	Oil bath lubrication	Own Input

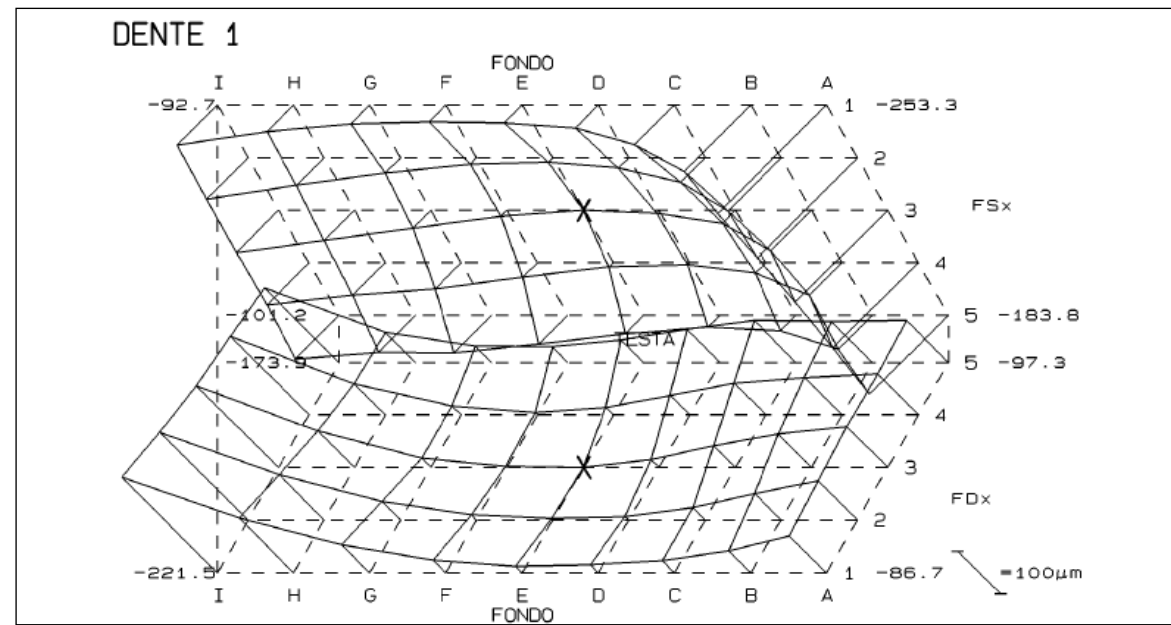
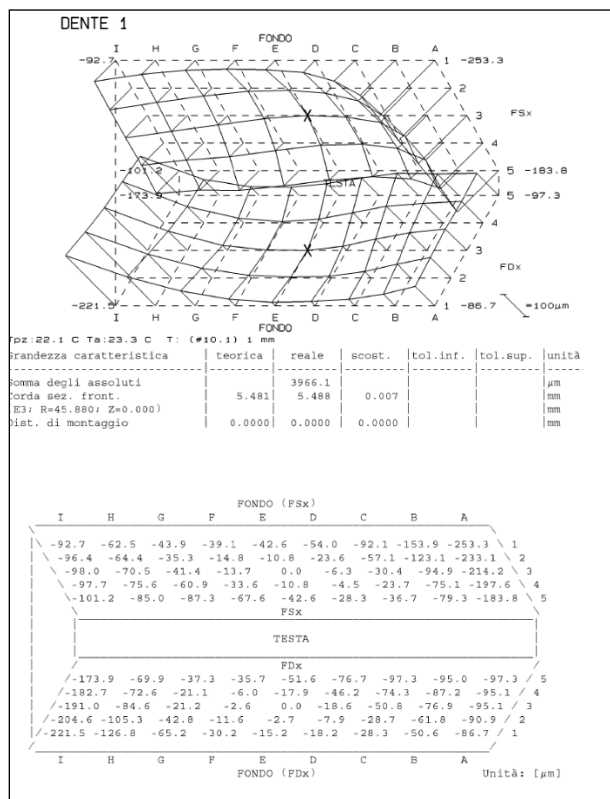
RECHNE FLANKE RAD  
DATUM / ZEIT : 13.05.2022 / 17:40

J	I	XP	YP	ZP	XN	YN	ZN
IN SPALTE 5 / ZEILE 3 : ZAHNDICKENWINKEL = 0.110788 rad							
1	1	-4.1914	-30.1962	-6.8000	-0.8223	-0.1224	.5556
1	2	-4.1537	-30.4238	-6.8000	-0.8197	-0.1392	.5555
1	3	-4.1137	-30.6481	-6.8000	-0.8142	-0.1643	.5567
1	4	-4.0672	-30.8741	-6.8000	-0.8130	-0.1688	.5572
1	5	-4.0175	-31.0994	-6.8000	-0.8068	-0.1938	.5580
2	1	-3.1680	-29.3931	-5.1000	-0.8399	-0.0948	.5343
2	2	-3.1064	-29.8530	-5.1000	-0.8292	-0.1288	.5438
2	3	-3.0258	-30.3099	-5.1000	-0.8195	-0.1617	.5496
2	4	-2.9250	-30.7710	-5.1000	-0.8100	-0.1941	.5533
2	5	-2.8050	-31.2316	-5.1000	-0.8003	-0.2252	.5556
3	1	-2.2105	-28.8575	-3.4000	-0.8556	-0.1509	.4950
3	2	-2.0920	-29.4744	-3.4000	-0.8386	-0.1747	.5158
3	3	-1.9534	-30.0872	-3.4000	-0.8223	-0.2016	.5320
3	4	-1.7894	-30.7031	-3.4000	-0.8065	-0.2325	.5435
3	5	-1.5979	-31.3158	-3.4000	-0.7910	-0.2667	.5505
4	1	-1.3340	-28.5676	-1.7000	-0.8649	-0.2227	.4497
4	2	-1.1467	-29.2305	-1.7000	-0.8426	-0.2515	.4713



# Corone in bronzo per viti senza fine

L'operatore può usare il master digitale per controllare bombatura e spessore dente



# Corone in bronzo per viti senza fine

## Closed loop è

- **Progettare tenente del creatore maggiorato**
- **Misurare per confronto con master digitale**

# Esempi

**Coppie coniche**

**Ingranaggi cilindrici: Waviness**

**Ingranaggi cilindrici: Twist**

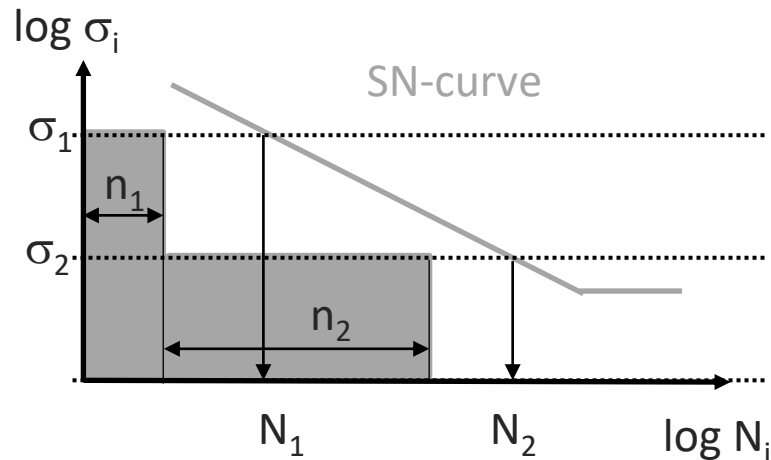
**Ingranaggi cilindrici: Profilo K**

**Corone in bronzo per viti senza fine**

**Dalla telemetria al calcolo con spettro: Rainflow**

# Serie Temporal

Il calcolo con spettro di carico  
usa la regola di Miner del danno accumulato



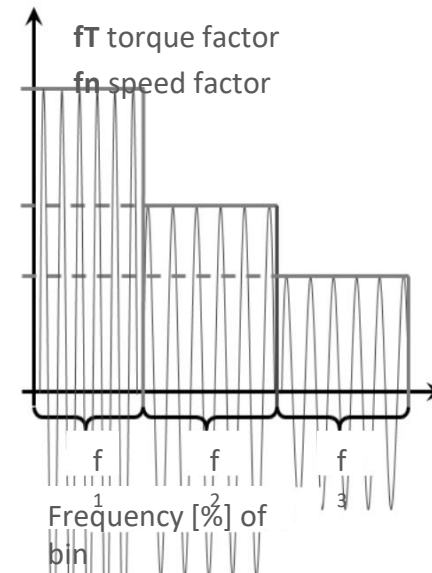
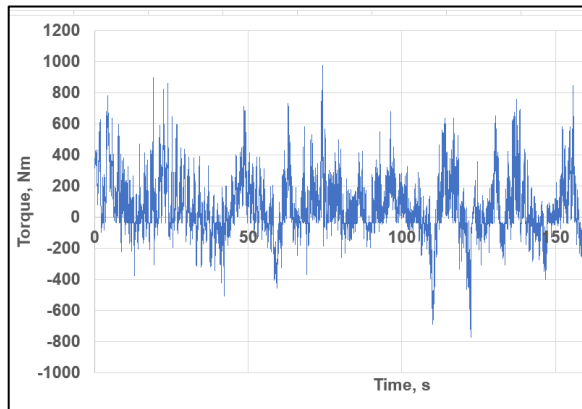
$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_i}{N_i}$$
$$= \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i}$$

La sicurezza è un rapporto fra verticali (tensioni)  
Il danno è un rapporto fra orizzontali (durate)

# Serie Temporali

Telemetria e acquisizione dati producono files di grosse dimensioni nel formato tempo – coppia – velocità

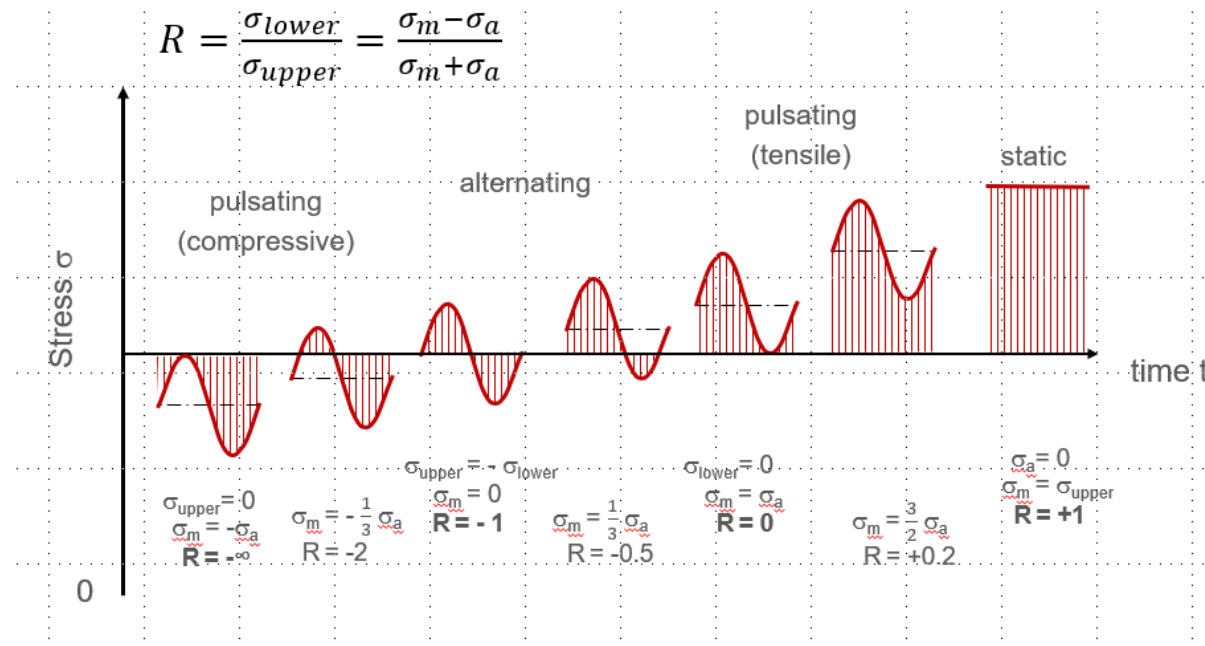
Il Metodo Rainflow li converte in spettri utilizzabili per il calcolo a resistenza degli ingranaggi



# Serie Temporal

Criticità della conversione:

- Grandi dimensioni del file (milioni di righe, una ogni 0.002 s)
- Picchi di coppia per intervalli di tempo molto piccolo
- Cambio del fianco di lavoro (flessione alternata, fattore YM)





# Corone in bronzo per viti senza fine

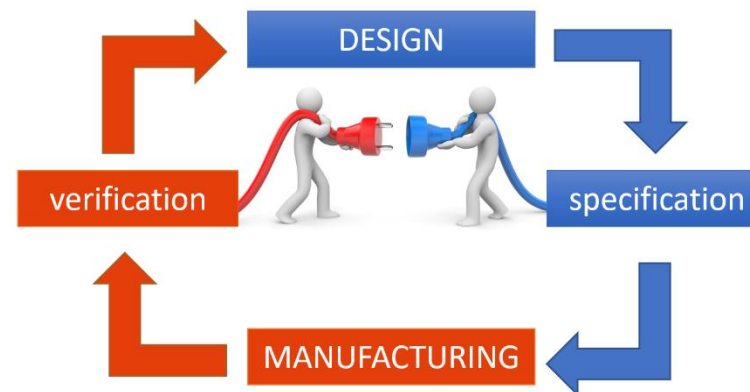
**Closed loop è**

- **Ri-progettare tenendo conto dei rilievi sul campo**

# Conclusioni

## Il **closed loop**

migliora il processo di realizzazione degli ingranaggi  
connettendo **progettazione** e **produzione**  
(e quindi **specifica** e **verifica**)  
in maniera bidirezionale





*Grazie per l'attenzione*

*Max Turci*

**KISSsoft**  
A Gleason Company



STUDIO TECNICO  
**Turci**  
massimiliano@turci.biz