UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA
Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria

DISMI 20

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA
Centro Interdipartimentale EN & TECH

# Verifica strutturale, calcolo della potenza e analisi del ciclo di vita di un ingranaggio per pompa oleodinamica: definizione di una relazione tra le caratteristiche meccaniche del materiale e il danno ambientale

**Anna Marchesi**

# INDICE

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

- Obiettivo dello studio e campo di applicazione
- Verifica strutturale e calcolo della potenza
- Inventario
- Analisi
- Correlazione tra caratteristiche meccaniche e danno ambientale
- Foglio di calcolo
- Indicatori che valorizzano la funzione dell'ingranaggio
- Costi esterni
- Conclusioni

# OBIETTIVO DELLO STUDIO E CAMPO DI APPLICAZIONE

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

| | |
|---|---|
| MOTIVAZIONE | Il territorio reggiano storicamente è ricco di numerose aziende meccaniche specializzate in vari ambiti, dimostrandosi essere un territorio all'avanguardia e di innovazione |
| SISTEMA STUDIATO | Ingranaggio della Ditta 'L.M.I' di Reggio Emilia |
| OBIETTIVO DELLO STUDIO | Valutazione ambientale dovuto a:<br>• la lavorazione;<br>• i trattamenti termici;<br>• l'uso;<br>• il fine vita di un ingranaggio. |
| UNITÀ FUNZIONALE | Peso dell'ingranaggio |
| CONFINI DEL SISTEMA | I confini del sistema vanno dalla produzione dei materiali componenti fino al fine vita dell'ingranaggio |
| QUALITÀ DEI DATI | Utilizzati i dati primari, altrimenti sono stati stimati o assunti da letteratura.<br>Il Metodo per il calcolo del danno è IMPACT 2002+ modificato dal gruppo di studio, EPS 2015 e IMPACT modificato allo scopo per il calcolo dei costi esterni.<br>Il codice usato è SimaPro 8.3.0 |

# VERIFICA STRUTTURALE E CALCOLO DELLA POTENZA

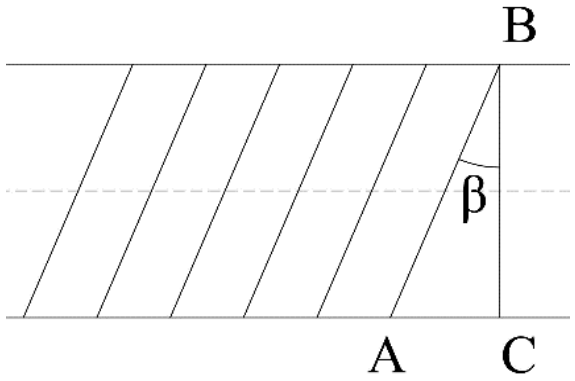
FORZA TRASVERSALE

NUMERO DI GIRI

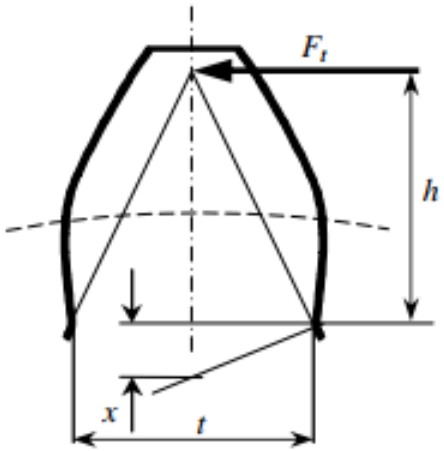
DIAMETRO PRIMITIVO

La potenza si calcola come: $P = \frac{F_t \cdot n \cdot d}{19{,}5 * 10^4} = 4{,}53\ kW$

FATTORE CORRETTIVO




La forza trasversale si calcola come: $F_t = F_n \cdot \cos\beta = 11451{,}78\ N$

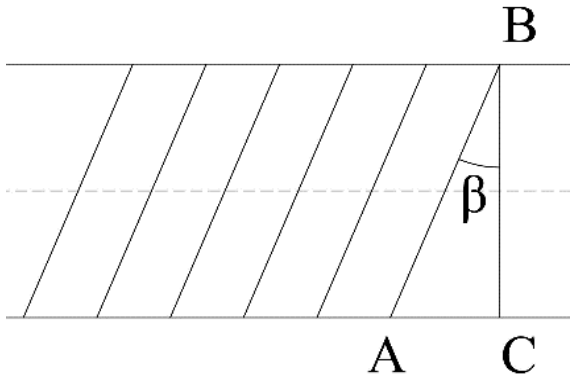



La forza normale si ricava da: $F_n = \frac{\sigma_{amm} \cdot t^2 \cdot b}{6 \cdot h}$

$$F_n = \frac{812\ \frac{N}{mm^2} * 5{,}157^2 mm^2 * 15{,}209\ mm}{6 * 4{,}4\ mm} = 12440{,}76\ N$$

# VERIFICA STRUTTURALE E CALCOLO DELLA POTENZA



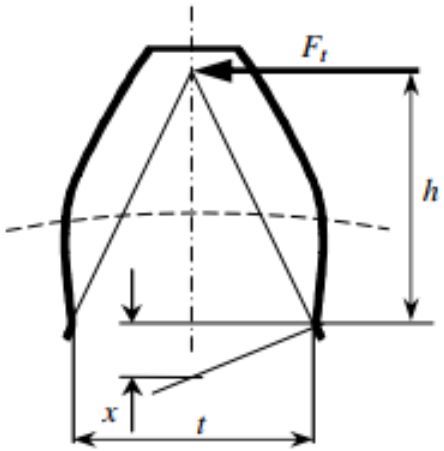



La potenza si calcola come: $P = \frac{F_t \cdot n \cdot d}{19{,}5 * 10^4} = 4{,}53\ kW$

FORZA NORMALE

INCLINAZIONE DEI DENTI

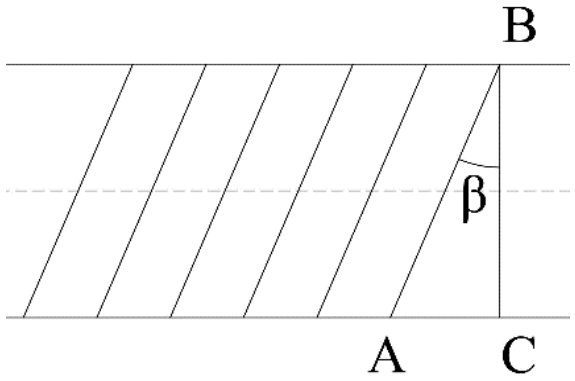
La forza trasversale si calcola come: $F_t = F_n \cdot \cos\beta = 11451{,}78\ N$




La forza normale si ricava da: $F_n = \frac{\sigma_{amm} \cdot t^2 \cdot b}{6 \cdot h}$

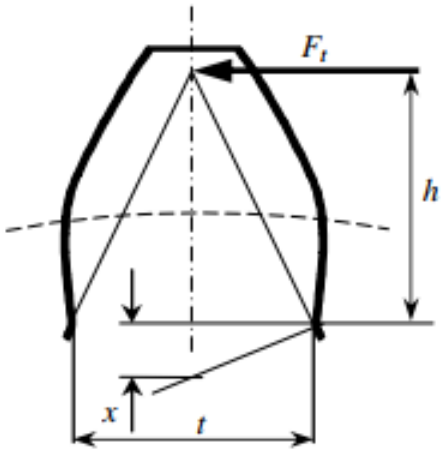
$$F_n = \frac{812\ \frac{N}{mm^2} * 5{,}157^2 mm^2 * 15{,}209\ mm}{6 * 4{,}4\ mm} = 12440{,}76\ N$$

# VERIFICA STRUTTURALE E CALCOLO DELLA POTENZA




La potenza si calcola come: $P = \frac{F_t \cdot n \cdot d}{19{,}5 * 10^4} = 4{,}53\ kW$

La forza trasversale si calcola come: $F_t = F_n \cdot \cos\beta = 11451{,}78\ N$




La forza normale si ricava da: $F_n = \frac{\sigma_{amm} \cdot t^2 \cdot b}{6 \cdot h}$

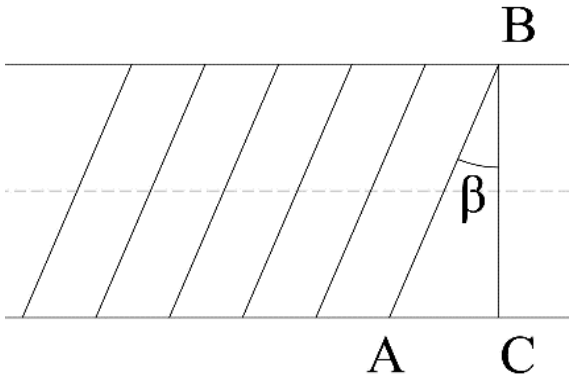
- $\sigma_{amm}$: TENSIONE AMMISSIBILE
- $t$: LARGHEZZA DEL DENTE
- $b$: LUNGHEZZA DEL DENTE
- $h$: ALTEZZA DEL DENTE

$$F_n = \frac{812\ \frac{N}{mm^2} * 5{,}157^2 mm^2 * 15{,}209\ mm}{6 * 4{,}4\ mm} = 12440{,}76\ N$$

# VERIFICA STRUTTURALE E CALCOLO DELLA POTENZA

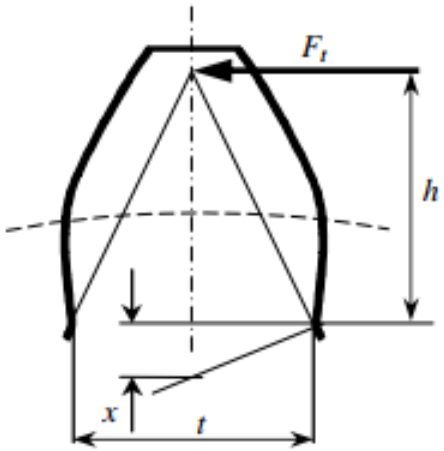
NUMERO DI GIRI

La potenza si calcola come: $P = \frac{F_t \cdot n \cdot d}{19{,}5 * 10^4} = 4{,}53\ kW$




La forza trasversale si calcola come: $F_t = F_n \cdot \cos\beta = 11451{,}78\ N$

La forza normale si ricava da: $F_n = \frac{\sigma_{amm} \cdot t^2 \cdot b}{6 \cdot h}$

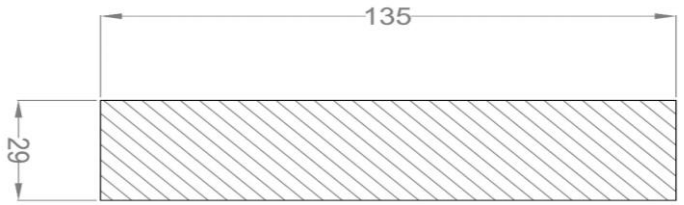



$$F_n = \frac{812\ \frac{N}{mm^2} * 5{,}157^2 mm^2 * 15{,}209\ mm}{6 * 4{,}4\ mm} = 12440{,}76\ N$$

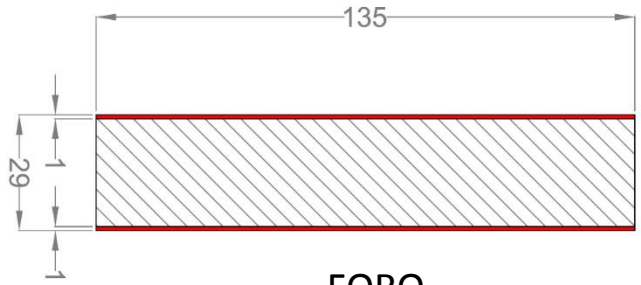
# INVENTARIO – LAVORAZIONE MECCANICA

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

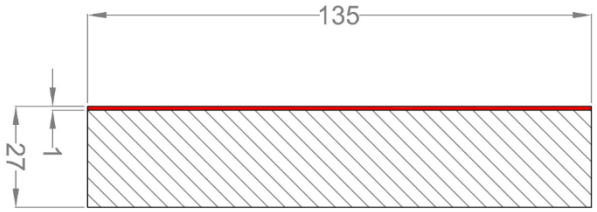
BILLETTA INIZIALE



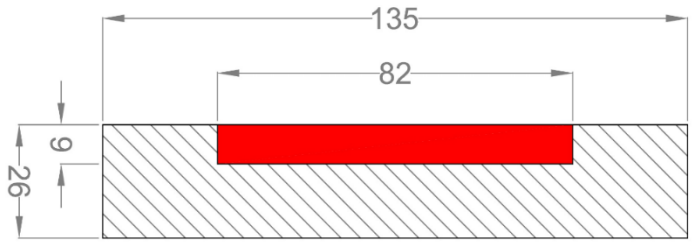

TAGLIO CON FRESA



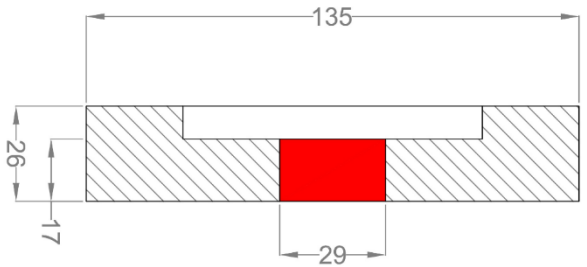

SPIANATURA
SUPERFICIE SINISTRA



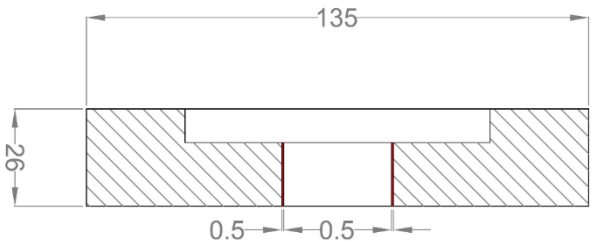

INCAVO



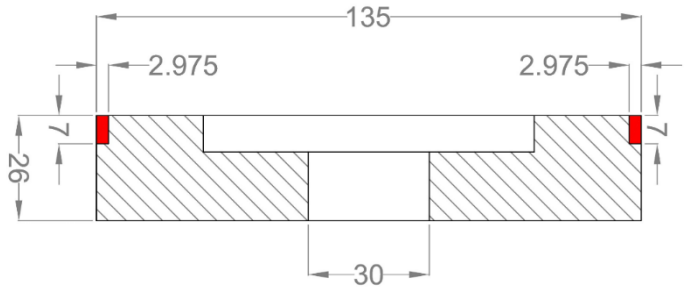

FORO



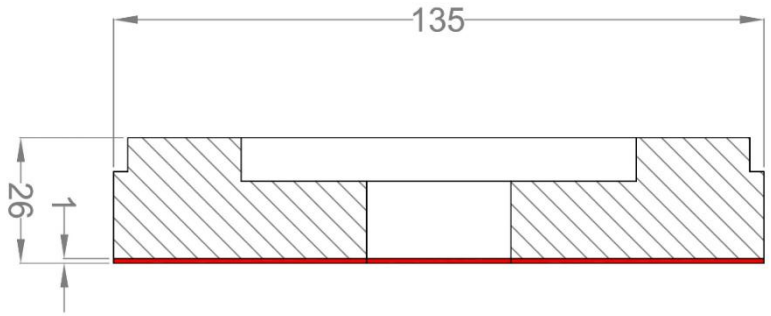

FINITURA FORO



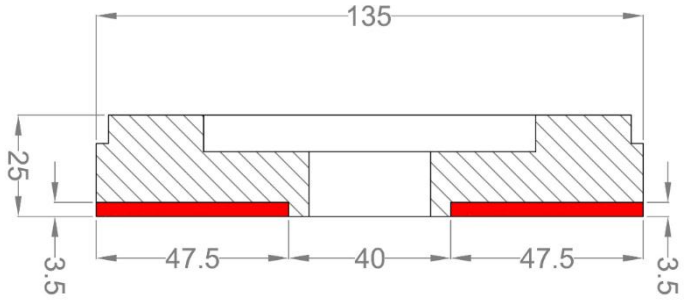

RIDUZIONE DIAMETRO
SUPERFICIE SINISTRA




SPIANATURA
SUPERFICIE DESTRA



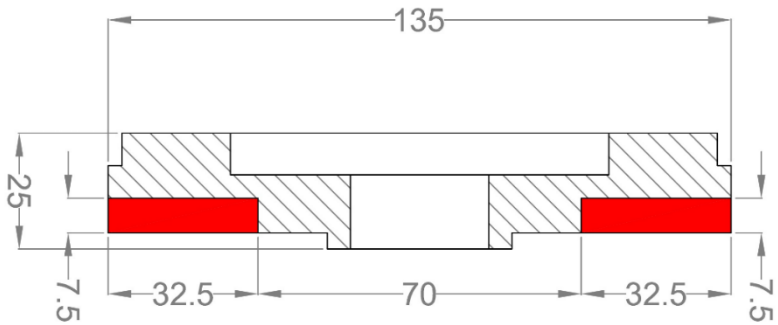

SECONDO INCAVO



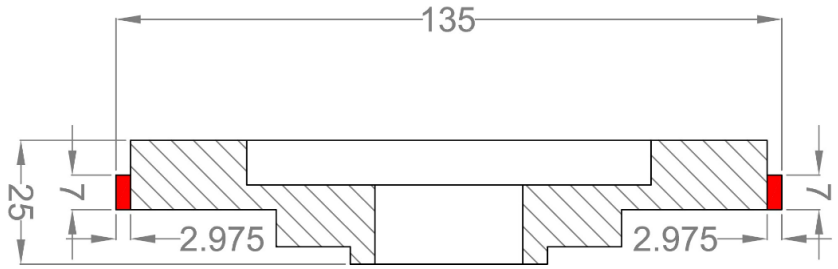
# INVENTARIO – LAVORAZIONE MECCANICA

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

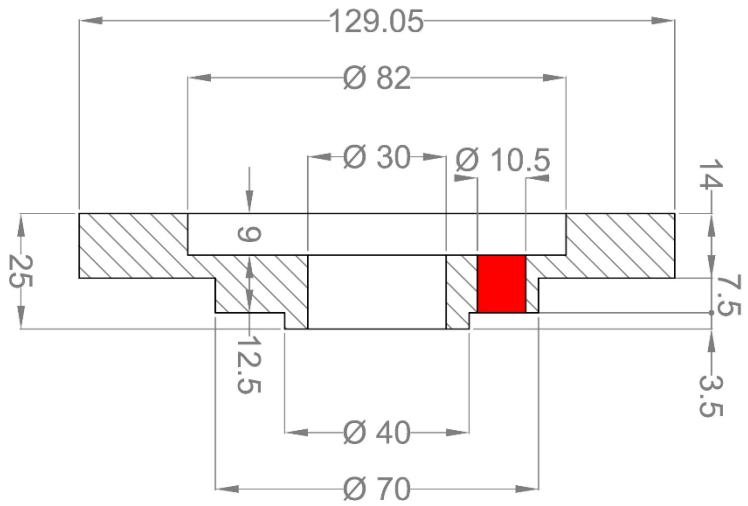
TERZO INCAVO



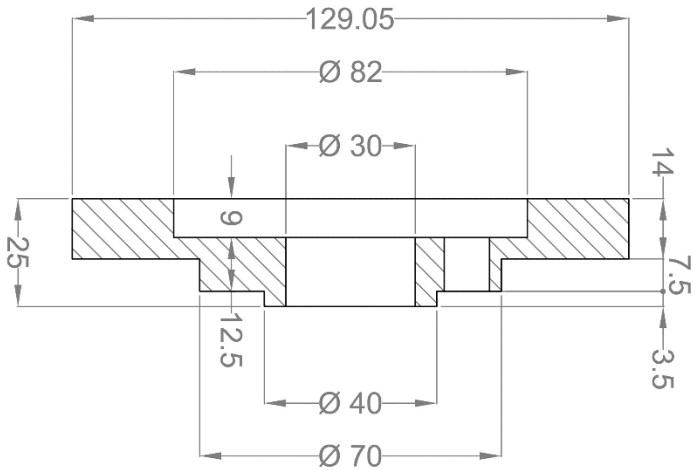

RIDUZIONE DIAMETRO SUPERFICIE DESTRA

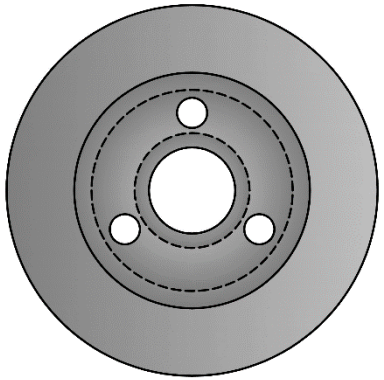



TRE FORI




INGRANAGGIO FINITO



# INVENTARIO – LAVORAZIONE MECCANICA

Durante le lavorazioni effettuate sul tornio viene utilizzata un'emulsione di olio refrigerante e acqua allo scopo di abbassare le temperature. La quantità di olio refrigerante presente nell'emulsione è il 3-5%, mentre la quantità di acqua è del 96%.
Durante le lavorazioni effettuate nella dentatrice, invece, viene utilizzato solo olio refrigerante.

$$consumo_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{Ingrtornan} = \frac{133{,}32\ kg}{14938} = 8{,}92 \cdot 10^{-3}\ kg$$

$$consumo_{olioemuls} = \frac{m_{olioemuls}}{Ingrtornan} = \frac{5{,}56\ kg}{14938} = 3{,}72 \cdot 10^{-4}\ kg$$

$$consumo_{oliodent} = \frac{m_{oliodent}}{Ingrdentan} = \frac{36\ kg}{22481} = 1{,}60 \cdot 10^{-3} kg$$

# INVENTARIO – LAVORAZIONE MECCANICA

Durante le lavorazioni effettuate sul tornio viene utilizzata un'emulsione di olio refrigerante e acqua allo scopo di abbassare le temperature. La quantità di olio refrigerante presente nell'emulsione è il 3-5%, mentre la quantità di acqua è del 96%.
Durante le lavorazioni effettuate nella dentatrice, invece, viene utilizzato solo olio refrigerante.

$$Ingrtornan = \frac{Ingrtottorn}{round\ (n_{ingrconttorn})} = \frac{59752}{4} = 14938$$

$$Ingrdentan = \frac{Ingrtotdent}{int(n_{ingrcontdent})} = \frac{67443}{3} = 22481$$

# INVENTARIO – TRATTAMENTI TERMICI

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

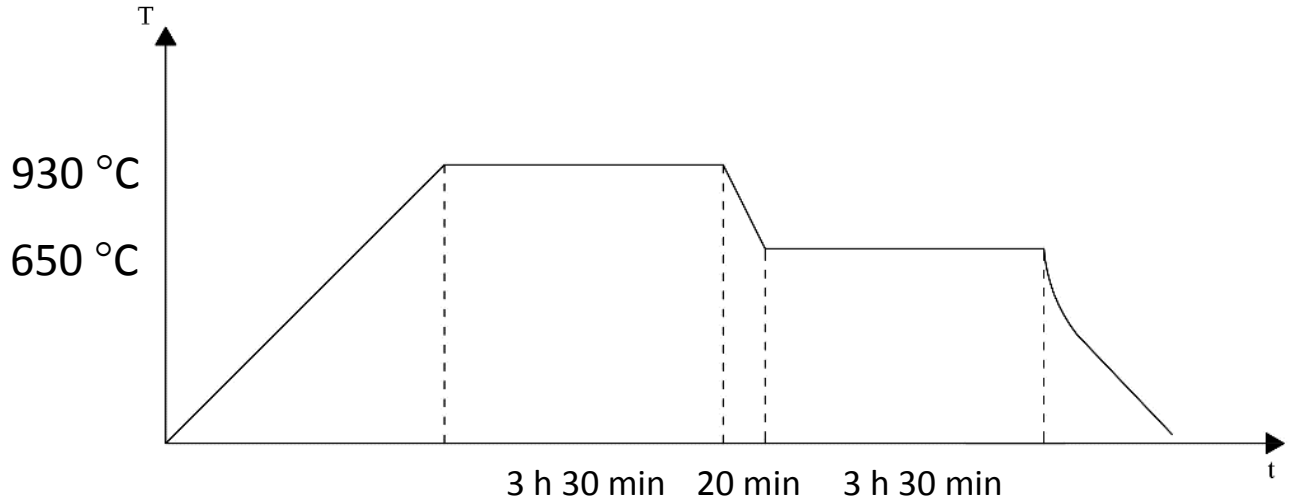
- RICOTTURA ISOTERMICA
- CEMENTAZIONE
- TEMPRA DIRETTA
- RINVENIMENTO

# INVENTARIO – TRATTAMENTI TERMICI

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

- RICOTTURA ISOTERMICA
- CEMENTAZIONE
- TEMPRA DIRETTA
- RINVENIMENTO

Scopo → addolcire l'acciaio al fine di facilitare le lavorazioni meccaniche

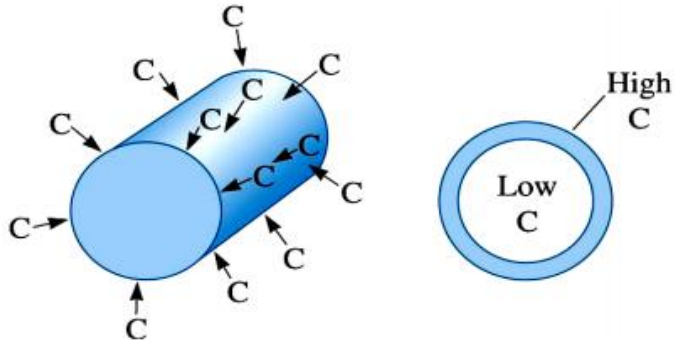



Riscaldamento alla temperatura austenitica di 930 °C per 3,5 ore, abbattimento a 650 °C in 20 minuti, temperatura a cui corrisponde la struttura perlitica e viene mantenuto in isotermia per 3,5 ore

# INVENTARIO – TRATTAMENTI TERMICI

- RICOTTURA ISOTERMICA
- CEMENTAZIONE
- TEMPRA DIRETTA
- RINVENIMENTO

Scopo → l'acciaio disponga di uno strato superficiale durissimo, resistente all'usura e alla fatica, con un cuore tenace e resistente agli urti



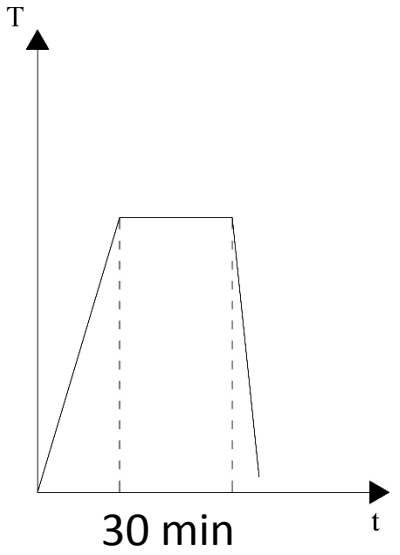

Il forno si trova alla temperatura austenitica di 905°C per 2,5 ore e si ottiene una penetrazione di carbonio pari a 3-4 decimi di millimetro

# INVENTARIO – TRATTAMENTI TERMICI

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

- RICOTTURA ISOTERMICA
- CEMENTAZIONE
- **TEMPRA DIRETTA**
- RINVENIMENTO

Scopo → elevato aumento della durezza

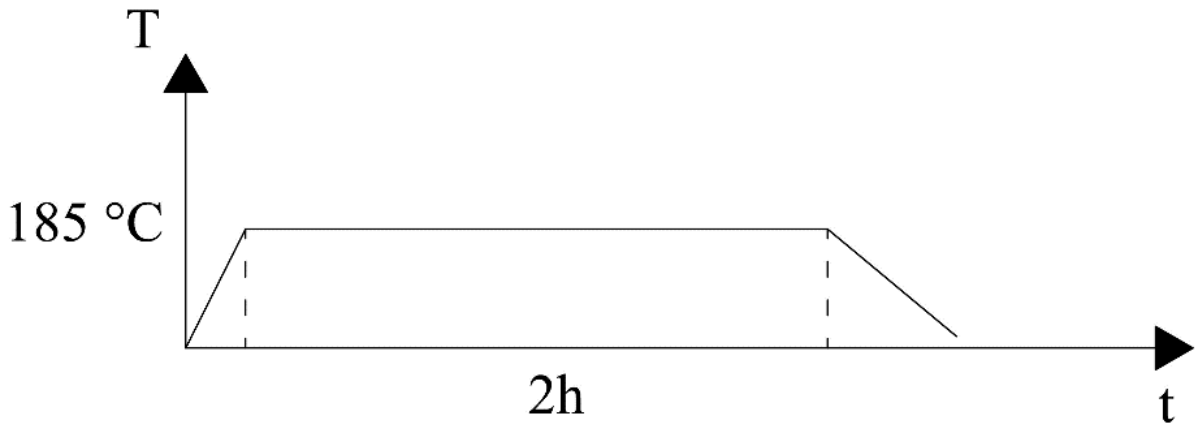



Riscaldamento alla temperatura austenitica di 825°C per 30 minuti, immersione nell'olio per 45 minuti in modo da ottenere la struttura martensitica

# INVENTARIO – TRATTAMENTI TERMICI

- RICOTTURA ISOTERMICA
- CEMENTAZIONE
- TEMPRA DIRETTA
- RINVENIMENTO

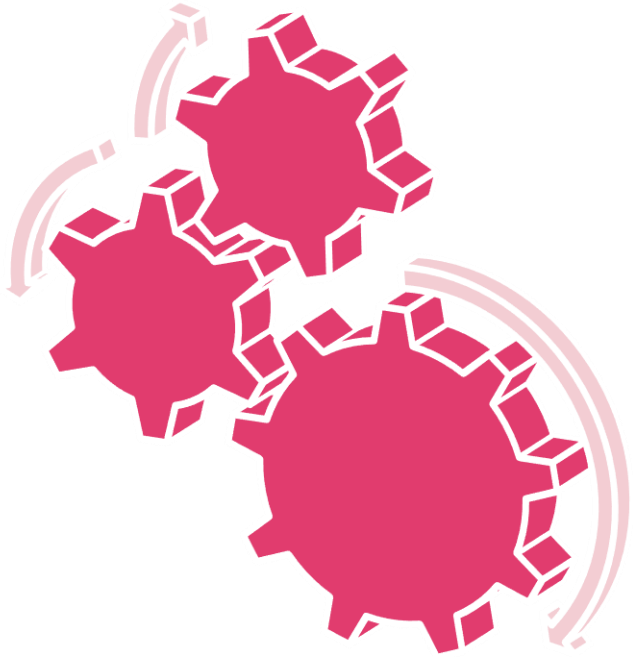
Scopo → rimuovere o diminuire le tensioni causate dalla tempra




Riscaldamento a 180-190 °C, inferiore ad $A_{C1}$ per 2 ore, segue un raffreddamento fino a temperatura ambiente

# INVENTARIO – USO E FINE VITA

L'**uso** comprende l'energia elettrica che l'ingranaggio consuma durante il suo ciclo di vita.

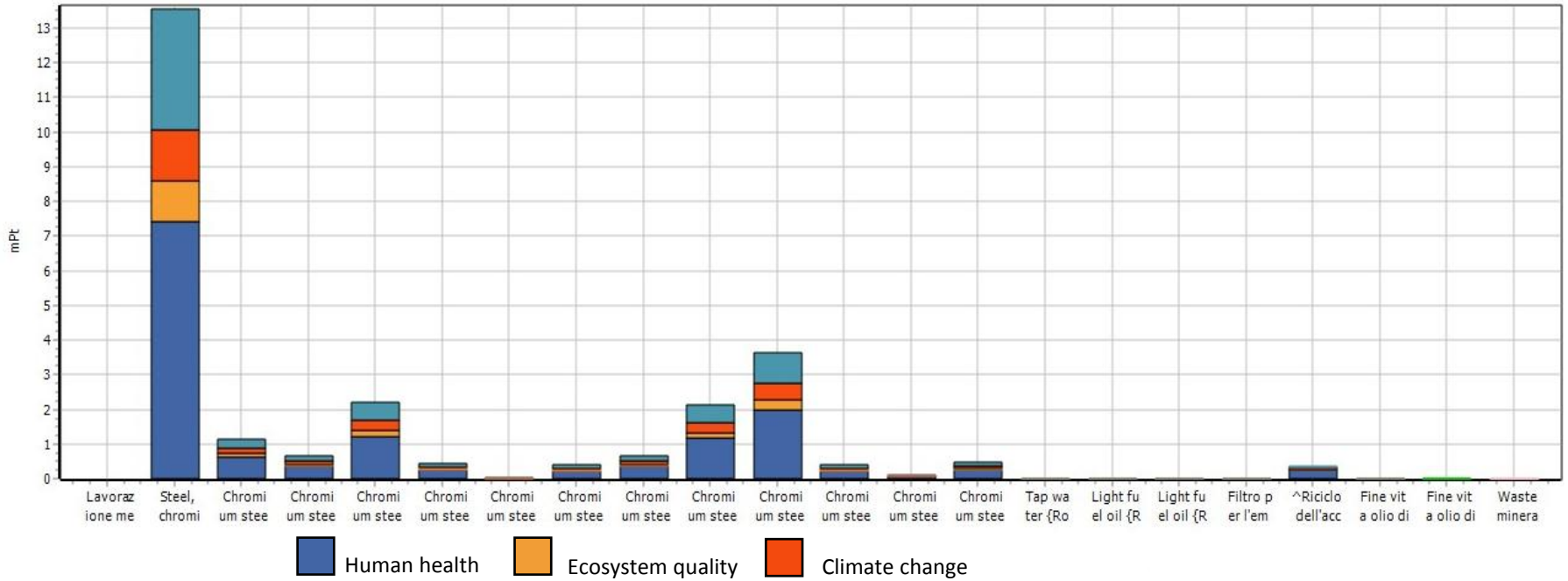


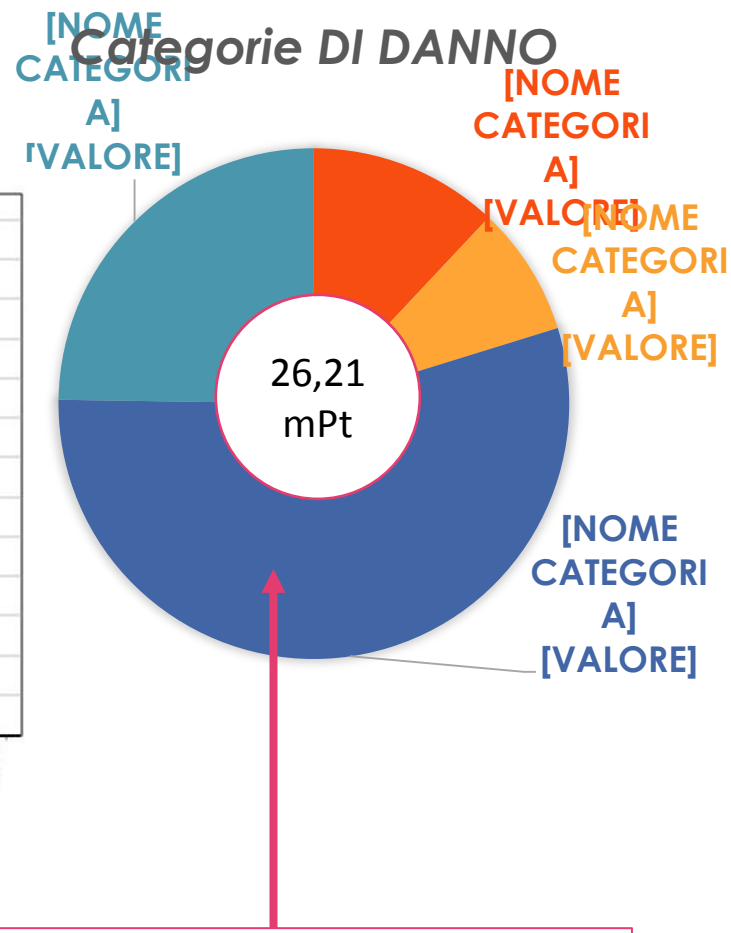
Il **fine vita** comprende il riciclo dell'acciaio che avrà un peso inferiore rispetto al peso dell'ingranaggio dopo il termine delle lavorazioni, in quanto si suppone che venga persa una piccola frazione dovuta all'usura.

# ANALISI – LAVORAZIONI MECCANICHE

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

***Diagramma della valutazione per single score e per damage category***



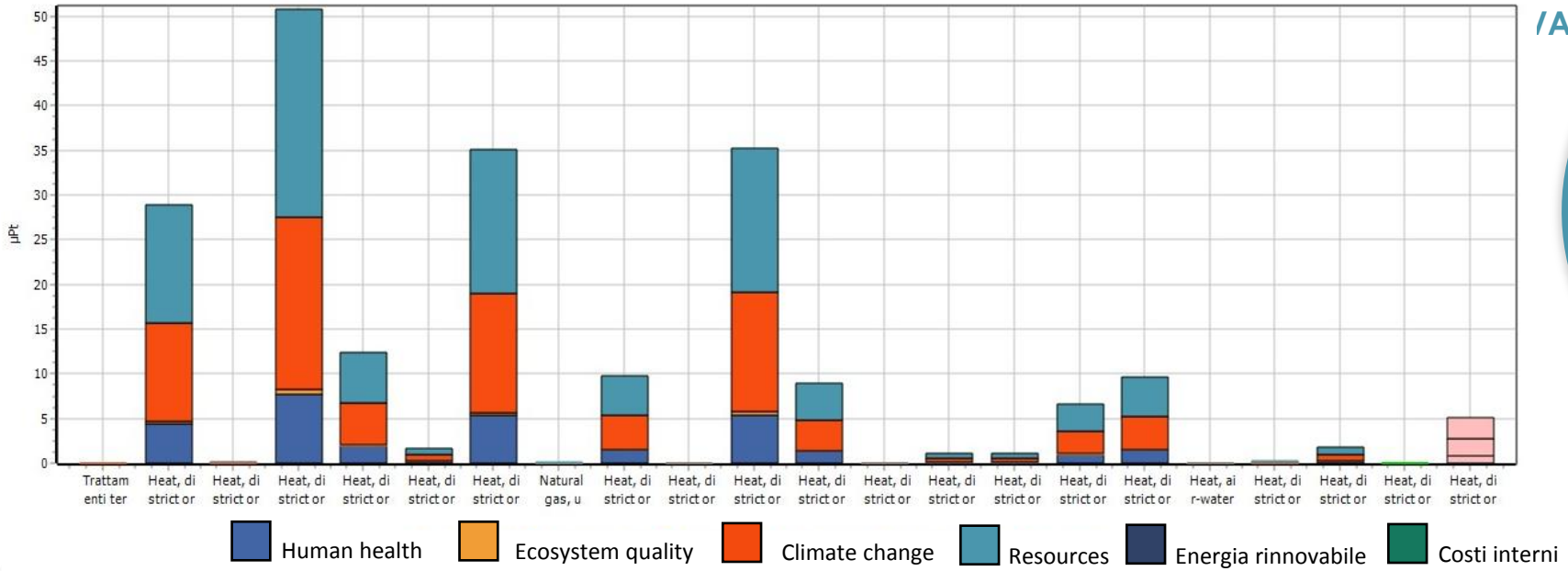

Il processo che produce il danno massimo è la produzione dell'acciaio

Dovuto soprattutto a *Particulates, < 2,5m* in aria

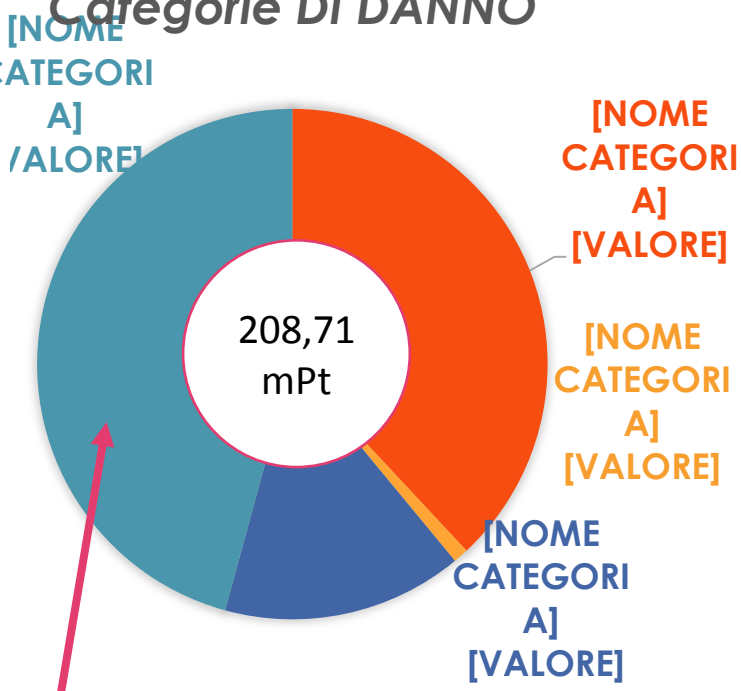
# ANALISI – LAVORAZIONI MECCANICHE

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

***Diagramma della valutazione per single score e per damage category***




*Categorie DI DANNO*



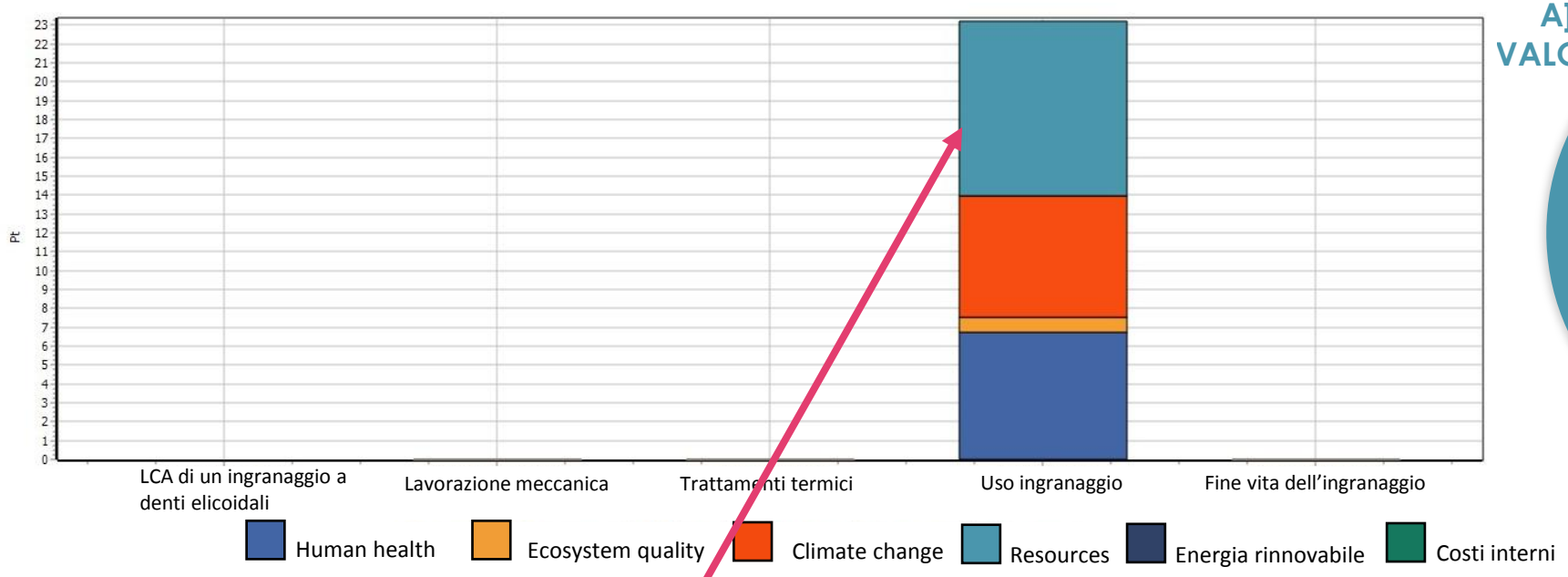

Il processo che produce il danno massimo è quello del mantenimento della ricottura isotermica soprattutto a causa degli elevati valori della temperatura (930°C) e del tempo (3,5h)

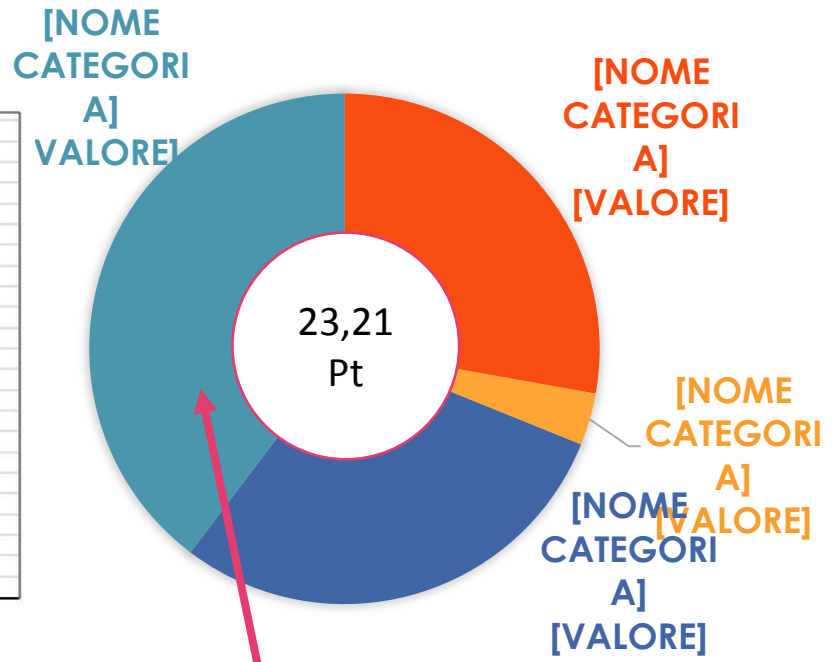
Dovuto soprattutto a *Gas, natural/m³* in risorse

# ANALISI – LCA DELL'INGRANAGGIO

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

***Diagramma della valutazione per single score e per damage category***




Il processo che produce il danno massimo è quello dell'uso a causa dell'energia che l'ingranaggio è in grado di trasmettere durante la sua vita

Dovuto soprattutto a *Gas, natural/m³* in risorse

# CORRELAZIONE TRA CARATTERISTICHE MECCANICHE E DANNO AMBIENTALE

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

| Materiale | Tensione di rottura σR [N/mm2] | Tensione di snervamento σy [N/mm2] |
|---|---|---|
| Acciaio da bonifica (C40) | 700-850 | 520-610 |

$$\sigma_{amm} = \frac{2}{3}\sigma_{sn} = 406{,}67\ \frac{N}{mm^2}$$

Si mantenga invariata la forza trasversale all'asse ($F_t$ = 11451,78 N), l'altezza ($h$ = 4,4 mm) e la larghezza del dente ($t$ = 5,157 mm) e si calcoli la lunghezza del dente ($b$ = incognita):

$$b = 6 \cdot \frac{h}{t^2} \cdot \frac{Ft}{\sigma} = 6 \cdot \frac{4{,}4\ \text{mm}}{5{,}157^2\ \text{mm}^2} \cdot \frac{11451{,}78\ \text{N}}{406{,}67\ \frac{N}{mm^2}} = 27{,}95\ mm$$

$$b = 15{,}21\ mm \rightarrow 27{,}95\ mm$$
$$\sigma_{amm} = 812\ \frac{N}{mm^2} \rightarrow 406{,}67\ \frac{N}{mm^2}$$

# FOGLIO DI CALCOLO

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

E' stato definito per le quattro categorie di danno, per le energie rinnovabili e per la valutazione. Sono stati riportati:

- i dati di input relativi alle **altezze dell'ingranaggio**
- i dati di input relativi ai **danni ambientali dei singoli sottoprocessi**
- i dati di input relativi al **danno ambientale totale dei singoli processi**
- **la variabile primaria** (lunghezza del dente)
- **le variabili secondarie**

i dati di input, le variabili e i valori di input del danno ambientale vengono uniti in una formula in modo da ottenere **il valore totale del danno totale variato**, che è la seguente:

$$Danno_{variato} = \frac{Danno_{input}}{Valore_{input}} \cdot Valore_{variato}$$

Nonostante lo spessore vari da **15,209 mm** a **27,95 mm** (1,8377 volte), il suo danno aumenta da **23,2335 mPt** a **23,2545 mPt**, questo è dovuto al fatto che il processo dell'uso dell'ingranaggio ha un peso del **99,80%** rispetto agli altri processi.

# FOGLIO DI CALCOLO

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

## *Lavorazioni meccaniche*

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Danni in Resources [MJ Primary]** | | | Prima | 986,1709824 | Dopo | 1736,08719 | | | | | |
| | Ing iniziale | Incavo sx | Foro1 | Finitura foro1 | Rid diametro | Incavo2 | Incavo3 | Rid diametro | 3 fori | Dentatura | Riciclo |
| | 530,89916 | 79,519286 | 16,885866 | 1,1078351 | 14,451184 | 76,459589 | 131,31996 | 14,451184 | 4,6575992 | 16,605371 | 8,9510932 |
| | Costanti | | | | | | | | | | |
| | | Taglio con fresa | Spianatura sx | Spianatura dx | Acqua raff | Olio emuls | Olio lubrific | Filtro | ne vita emu | Fine vita olio | Olio perso |
| | | 42,837444 | 23,94803 | 23,94803 | 5,95478E-05 | 0,021168 | 0,091150578 | 0,006760901 | 0,00547903 | 0,00467188 | 6,0949E-05 |
| **Danni in Energia rinnovabile [MJ]** | | | Prima | 78,81045565 | Dopo | 138,625966 | | | | | |
| | Ing iniziale | Incavo sx | Foro1 | Finitura foro1 | Rid diametro | Incavo2 | Incavo3 | Rid diametro | 3 fori | Dentatura | Riciclo |
| | 41,393546 | 6,5368076 | 1,364729 | 0,091774611 | 1,1879459 | 6,285288 | 10,795033 | 1,1879459 | 0,37325356 | 1,3650288 | 0,83104301 |
| | Costanti | | | | | | | | | | |
| | | Taglio con fresa | Spianatura sx | Spianatura dx | Acqua raff | Olio emuls | Olio lubrific | Filtro | ne vita emu | Fine vita olio | Olio perso |
| | | 3,4588266 | 1,9686251 | 1,9686251 | 5,34584E-06 | 5,1617E-05 | 0,000222265 | 0,000534797 | 0,00062984 | 0,00053706 | 2,5481E-06 |
| **Danni Totali in Pt (Weighting)** | | | Prima | 26,20590986 | Dopo | 46,085625 | | | | | |
| per damage category | | | | | | | | | | | |
| | Ing iniziale | Incavo sx | Foro1 | Finitura foro1 | Rid diametro | Incavo2 | Incavo3 | Rid diametro | 3 fori | Dentatura | Riciclo |
| | 13,548538 | 2,2005221 | 0,45215126 | 0,028748753 | 0,39990487 | 2,1158517 | 3,6339923 | 0,39990487 | 0,12319311 | 0,45951728 | 0,37162137 |

# FOGLIO DI CALCOLO

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

## *Trattamenti termici*

| Danni in Ecosystem quality [PDF*m2*yr] | | | Prima | 0,027417542 | Dopo | 5,04E-02 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tratt termici | Ric iso | Ric iso risc | Ric iso mant | Ric iso 1 grad | Ric iso 2 grad | Ric iso mant | CH4 | Cem | Cem risc | Cem mant | Tempra | Tempra risc | Tempra 1 grad | Tempra 2 grad | |
| 1,0446E-07 | 0,00379107 | 2,0773E-05 | 0,006665373 | 0,001622792 | 0,000219196 | 0,004603158 | 5,76295E-06 | 0,00128208 | 7,0251E-06 | 0,00462946 | 0,00116553 | 6,38646E-06 | 0,000147304 | 0,00014029 | |
| Tempra man | Tempra olio | Raff olio | Mant olio | Rinv | Rinv risc | Rinv mant | | | | | | | | | |
| 0,00086802 | 0,00126258 | 3,3418E-05 | 3,94556E-05 | 0,000233106 | 1,27729E-06 | 0,000673376 | | | | | | | | | |

| Danni in Climate change [kg CO2 eq] | | | Prima | 0,786218461 | Dopo | 1,44476042 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tratt termici | Ric iso | Ric iso risc | Ric iso mant | Ric iso 1 grad | Ric iso 2 grad | Ric iso mant | CH4 | Cem | Cem risc | Cem mant | Tempra | Tempra risc | Tempra 1 grad | Tempra 2 grad | |
| 4,3197E-08 | 0,10885574 | 0,00059647 | 0,19138793 | 0,046596475 | 0,006293936 | 0,13217398 | 3,50573E-05 | 0,03681341 | 0,00020172 | 0,13292926 | 0,03346674 | 0,000183379 | 0,004229652 | 0,00402824 | |
| Tempra man | Tempra olio | Raff olio | Mant olio | Rinv | Rinv risc | Rinv mant | | | | | | | | | |
| 0,02492424 | 0,03625344 | 5,0657E-05 | 0,00113292 | 0,006693347 | 3,66759E-05 | 0,019335165 | | | | | | | | | |

| Danni in Resources [MJ Primary] | | | Prima | 14,51335743 | Dopo | 26,66984484 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tratt termici | Ric iso | Ric iso risc | Ric iso mant | Ric iso 1 grad | Ric iso 2 grad | Ric iso mant | CH4 | Cem | Cem risc | Cem mant | Tempra | Tempra risc | Tempra 1 grad | Tempra 2 grad | |
| 0 | 2,0075138 | 0,01100008 | 3,5295693 | 0,85933053 | 0,11607255 | 2,4375479 | 0,011866795 | 0,67891158 | 0,00372006 | 2,4514767 | 0,61719235 | 0,003381876 | 0,078003092 | 0,074288659 | |
| Tempra man | Tempra olio | Raff olio | Mant olio | Rinv | Rinv risc | Rinv mant | | | | | | | | | |
| 0,45965189 | 0,66858456 | 0,00365916 | 0,020893268 | 0,12343847 | 0,000676375 | 0,35657843 | | | | | | | | | |

# INDICATORI CHE VALORIZZANO LA FUNZIONE DELL'INGRANAGGIO

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

E' stata creata la categoria di impatto **Utilità della funzione** a cui fanno riferimento le seguenti sostanze:

- *Funzione bellica:* 0,2
- *Funzione sportiva:* 0,4
- *Funzione civile:* 0,7
- *Funzione industriale:* 0,6
- *Religiosa:* 0,7
- *Funzione culturale:* 0,6
- *Alimentare:* 1
- *Alloggio:* 0,9

E' stata creata la categoria di impatto **Utilità funz prod. industriali** a cui fanno riferimento le seguenti sostanze:

- *Filtri di depurazione:* 1
- *Impianti di aspirazione:* 1
- *Impianti di raffrescamento:* 0,5
- *Impianti di riscaldamento:* 0,6
- *Lavorazioni meccaniche:* 0,9
- *Macchine agricole:* 0,8
- *Produzione di componenti elettronici:* 0,6
- *Trasmissione del moto:* 0,8
- *Trattamenti termici*: 0,6

Dall'analisi del risultati si ottiene che con l'introduzione degli indicatori funzionali il danno si riduce dello **0,47%**.

# COSTI ESTERNI

| Metodo | Human health [ELU] [€] | Ecosystem services [ELU] | Abiotic resource [ELU] | Biodiversity [ELU] | Climate change [€] | Access to water | Building technology | **Totale [€]** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Resources [€] | Ecosystem quality [€] | | | | |
| **EPS 2015** | 13,202562 | 0,068014923 | 96,050268 | 0,0003172697 | / | 0,0031519459 | 0,00051145962 | **109,32482** |
| **IMPACT 2002+** | 2,9491058 | / | 8,6467138 | 0,13656043 | 0,25117829 | / | / | **11,98355832** |

*I costi esterni con i metodi EPS 2015 e IMPACT 2002+ modificato*

# CONCLUSIONI

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

L'uso è il processo che produce il danno massimo a causa del consumo di energia

Cambiando la lunghezza del dente la variazione del danno dell'intero LCA è irrisoria. Analizzando il processo della lavorazione meccanica, dei trattamenti termici e del fine vita la variazione risulta essere apprezzabile

Prendendo in considerazione anche l'aspetto positivo e l'utilità dell'ingranaggio è possibile ridurre il danno

# GRAZIE PER L'ATTENZIONE

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA



**4° Seminario Tecnico LCA – Reggio Emilia, 11 Aprile 2018**