

Ingranaggi di grandissime dimensioni

In questo articolo si espongono alcune notizie relative alla produzione di ruote dentate di grandissime dimensioni. E' questo un settore poco conosciuto in quanto solo pochissime ditte al mondo sono attrezzate per questo tipo di produzione, ma è interessante anche solo accostarsi a questa tecnologia che si distacca nettamente da quella più conosciuta degli ingranaggi dell'automotive.

La stragrande maggioranza dei tecnici che operano nel settore delle trasmissioni ha a che fare con ingranaggi che vengono impiegati su automobili, motociclette, camion, trattori, macchine per movimento terra o su riduttori per le più disparate utilizzazioni, ma tutti di dimensioni relativamente modeste, cioè con moduli che vanno da 1 a 8 -10 mm e diametri raramente superiori a 800 – 1.000 mm.

Pochi tra questi tecnici sono venuti in contatto con produzioni di ingranaggi “*giganteschi*”, cioè con corone di diametro 10 – 11 metri, moduli 25 – 30 e 40 mm, fasce dentate che oltrepassano il mezzo metro.

Quando ci si avvicina per la prima volta ad uno di questi ingranaggi si resta sorpresi e senza parole, ma dopo un primo momento, la mente di un tecnico che ha vissuto una vita in mezzo agli ingranaggi, si mette in moto e scatena una serie di domande sulle difficoltà tecniche che si devono superare nella lavorazione di questi “*colossi dentati*”.

E' esattamente quello che è successo a me durante la visita all'unica ditta in Italia che può produrre ingranaggi con diametri fino a 11 metri : la Darimec (Segrate – Milano).

La Darimec è nata nel 1961 su iniziativa di Mario Dagnoni (un tempo la ditta si chiamava appunto **Dagnoni Riduttori Meccanici**).

Attualmente Mario Dagnoni è il presidente della società, ma ha passato tutta l'operatività ai suoi tre figli: Cordiano alla direzione, Christian alle forniture, Sergio alla produzione.

Vale la pena dire due parole su questa famiglia che è costituita da vere e proprie personalità dello sport, specie Mario Dagnoni che è diventato praticamente una leggenda avendo partecipato a ben 39 campionati del mondo di ciclismo dietro motori su pista, prima come corridore e poi come *stayer* (conduttore di moto). Ha vinto praticamente tutto, tra cui 28 maglie tricolori e stabilito 3 record mondiali. Poi anche qui ha passato la mano ai tre figli ed anch'essi hanno inanellato una serie impressionante di vittorie a livello mondiale nella stessa specialità.

Questa grande passione per il ciclismo però non è stata d'ostacolo alla realizzazione di un'azienda d'avanguardia che produce appunto ingranaggi di grandissime dimensioni.

I settori in cui vengono impiegate queste grandi ruote dentate sono i più disparati e nell'elenco riportato nella tabella seguente vi sono alcuni campi di applicazione in cui Darimec opera.

Settore merceologico	Componenti
Zuccherifici	Riduttori fino a 60.000 Kg
Telecomunicazioni	Riduttori comando assi elevazione ed orientamento
Ittico	Riduttori fino a 50.000 Kg
Cementifici	Riduttori con potenza fino a 5.000 Kw
Ecologia	Riduttori, pignone-corona comando cilindri biostabilizzatori
Alimentare	Gruppi di comando coclee per conca (industria cioccolato)
Gomma e plastica	Riduttori Pluriuscite-Bambury
Siderurgia	Gruppo di comando per convertitore fino a 350 tonn. composto da 1 riduttore secondario e 4 primari con coppia in uscita di 400.000 da Nm e peso 130.000 Kg.
Trasporti terrestri	Riduttori comando assile treno
Centrali elettriche	Riduttore comando Turbina-Pompe
Impianti di risalita	Riduttori comando funicolare
Ceramica	Riduttori e gruppi di comando, pignone-corona
Porti	Riduttori per sollevamento-scorrimento- traslazione
Offshore	Riduttori sollevamento da 1.000 tonn.
Navale	Gruppi di comando propulsione
Messa a parco carbone	Riduttori comando ruota a tazze e riduttori comando orientamento-nastri
Chimica e farmaceutica	Riduttori di comando pressofiltri /essicatoi

Le caratteristiche di un ingranaggio con diametro dai 4 ai 11 metri ovviamente sono diverse da un ingranaggio di piccole dimensioni.

Il grezzo viene ottenuto per forgiatura e laminazione a caldo ed il materiale, che è un acciaio da bonifica, viene fornito appunto bonificato con un successivo trattamento di distensione per eliminare, o per lo meno ridurre, le tensioni interne che provocherebbero, dopo le varie lavorazioni meccaniche, deformazioni intollerabili.

La resistenza del materiale è di circa 800 – 1000 N/mm² e quindi perfettamente lavorabile con ogni tipo di utensile.

Una prima domanda è: come si trasportano questi semilavorati e poi queste ruote dentate?

Una corona di 11 metri di diametro non può essere movimentata per strada così com'è, sia pur utilizzando mezzi speciali di trasporto.

Viene quindi fornita in due pezzi, cioè due semicorone.

Dopo la saldatura della costola interna che costituirà la parte di bloccaggio sulla testata molino oppure attacco balestre forno, le prime lavorazioni prevedono la spianatura e la preparazione delle zone di giunzione.

Le sezioni di unione devono essere eseguite tenendo conto dell'inclinazione dei denti ed anche del numero di denti. In poche parole si deve fare in modo che la linea di giunzione passi sul fondo di due vani esattamente contrapposti.

Le due semicorone vengono poi unite e bloccate attraverso una serie di bulloni con gambo calibrato, che servono anche come spine di riferimento. Questo è importante in quanto dopo che la ruota è finita, deve venire nuovamente divisa in due per essere trasportata alla sua destinazione finale, dove sarà nuovamente rimontata.

L'esecuzione della dentatura avviene su macchine che possono svolgere diversi tipi di lavorazione, in modo da non dover movimentare la corona da dentare.

Esse sono costituite essenzialmente da una grande piattaforma su cui viene posizionata la ruota da lavorare. Questa piattaforma girevole deve essere in grado di sopportare pesi notevoli, (basta pensare che un ingranaggio di 11 metri può raggiungere un peso di 30 o 40 tonnellate e oltre), ed inoltre deve avere una serie di supporti regolabili in modo da permettere una uniforme distribuzione del peso ed una accurata centratura della corona.

In presenza di pesi così ingenti, se essi non sono uniformemente distribuiti, si possono generare delle flessioni che compromettono la precisione finale.

Separata da questa piattaforma è posizionata una struttura che può ospitare diverse unità operatrici, come per esempio una testa a fresare, o una testa su cui viene montato un creatore.

La figura N°1 fa vedere appunto una di queste grandi corone in fase di dentatura con creatore. Si può osservare la serie di numerosi supporti, regolabili, che consentono sia la messa in piano, sia la centratura della corona.



Fig.N°1- Grande corona in fase di dentatura

Nonostante le varie precauzioni, le deformazioni, in misura più o meno grande, sono però sempre presenti.

Esse sono originate per esempio dalle tensioni residue nella massa di acciaio dopo la fucinatura o laminazione e i successivi trattamenti di bonifica e di distensione, ma anche dalle operazioni di saldatura che, pur essendo eseguite con una tecnica particolare, dopo un preriscaldamento della corona a 350 °C, qualche tensione la producono.

C'è poi il grande problema della dilatazione termica.

Un Δt di soli 10 °C per esempio, su un diametro di 8 metri può far variare il diametro o indurre una ovalizzazione dell'ordine del millimetro.

Infine c'è l'influenza della diversa disposizione della corona in fase di lavorazione (ad asse verticale) e di impiego (normalmente ad asse orizzontale).

La precisione richiesta per ingranaggi di questo tipo, con diametri superiori a 3 metri, è normalmente una classe DIN 8 – 9.

Gli errori ammessi possono sembrare grandi, ed in valore assoluto infatti sono almeno 4 volte superiori ad un ingranaggio di tipo automobilistico, come si può vedere nella tabella che raffronta le tolleranze su profilo e passo, ma qui tutto va rapportato alla dimensione del dente e all'ampiezza del diametro. Ottenere queste tolleranze è già un ottimo risultato.

Tolleranze secondo DIN 3962 (valori in micrometri)

	Mod.2,5–Diam.100–Fascia 25 mm		Mod.30–Diam.8040–Fascia 500 mm	
	Classe 8	Classe 9	Classe 8	Classe 9
Deviazione della forma del profilo f_f	16	22	63	80
Deviazione angolare del profilo $F_{H\alpha}$	12	18	40	56
Deviazione totale del profilo F_f	20	28	71	100
Errore di passo f_u	18	25	71	100

In genere non si eseguono correzioni di profilo ed elica sulle corone.

L'allineamento dell'asse della corona con quello del pignone deve essere molto accurato, altrimenti il contatto avviene solo ad un'estremità della fascia dentata, ma con queste dimensioni e specialmente con questi pesi e con le forze che agiscono sul dente, si è sicuramente in presenza di situazioni di contatto non ideale.

Per limitare i possibili inconvenienti, la Darimec ha adottato due soluzioni.

La prima consiste nella particolare forma a T della struttura della ruota dentata. In pratica la corona dentata è unita alla flangia interna in modo da consentire una certa flessione della corona rispetto l'asse della ruota.

Questo sistema, che è stato brevettato dalla Darimec con il nome di *Monoflex*, permette di assorbire le deformazioni dovute agli sforzi, agli sbalzi termici, ai possibili disallineamenti degli assi ed alle tolleranze, consentendo alle due dentature di avere un contatto su un'area più estesa, ed una più uniforme distribuzione dei carichi.

Vale la pena approfondire un poco questo argomento per rendersi conto dei vantaggi che questa soluzione permette di avere.

Nella figura N°2 è illustrata in sezione una corona tradizionale con nervature saldate fino in prossimità del diametro interno; questa soluzione rende rigida la struttura.

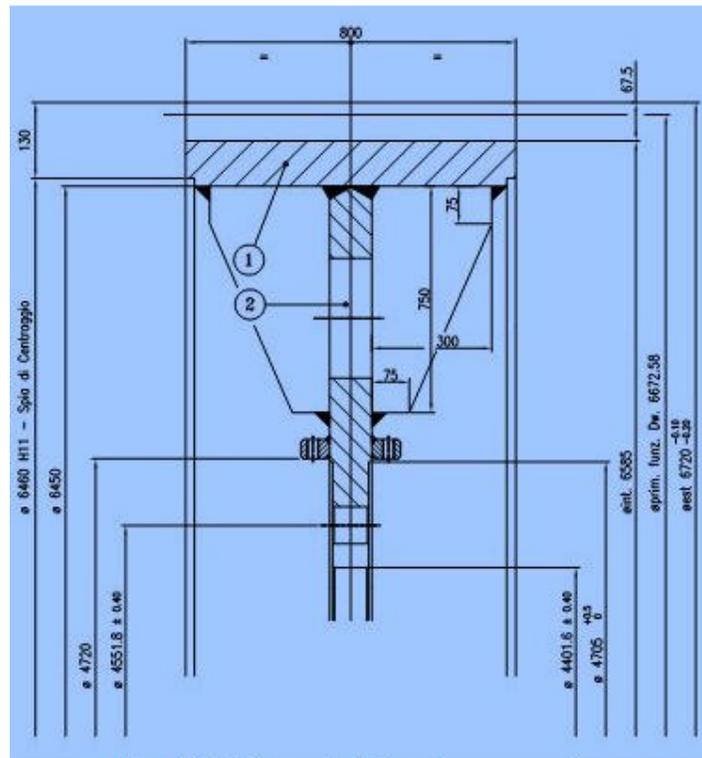


Fig. N°2- Corona tradizionale con nervature

Nella figura N°3 è illustrata invece una corona del tipo Monoflex in cui si può vedere che la saldatura è limitata nella zona centrale; questa struttura è più flessibile.

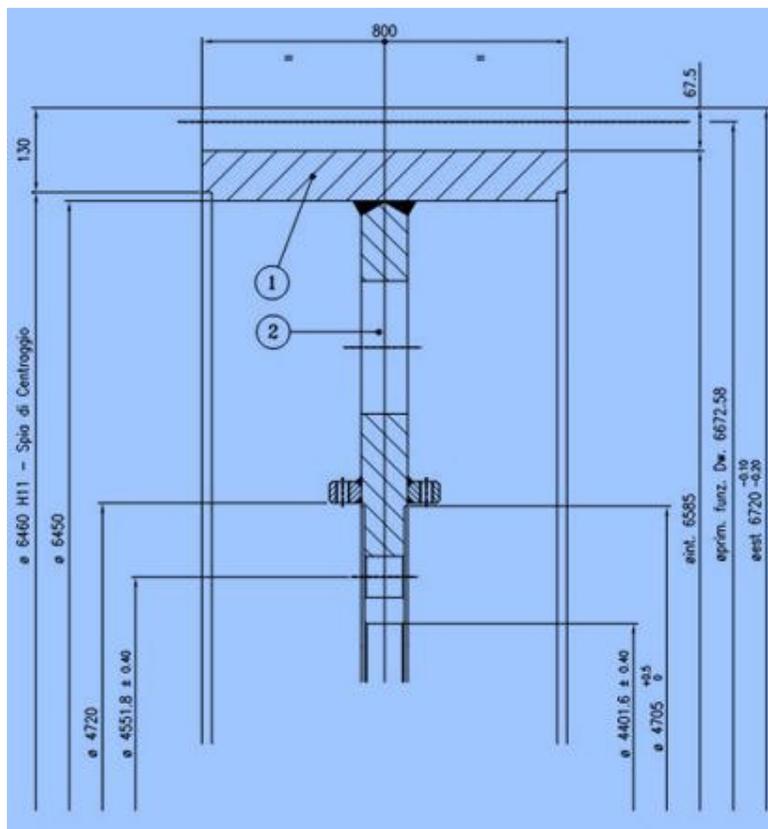


Fig. N°3- Corona tipo Monoflex

Lo studio per elementi finiti mette in mostra che nella corona tradizionale i carichi sono concentrati in prossimità della saldatura, prevalentemente verso l'interno, come si può vedere nella figura N°4.

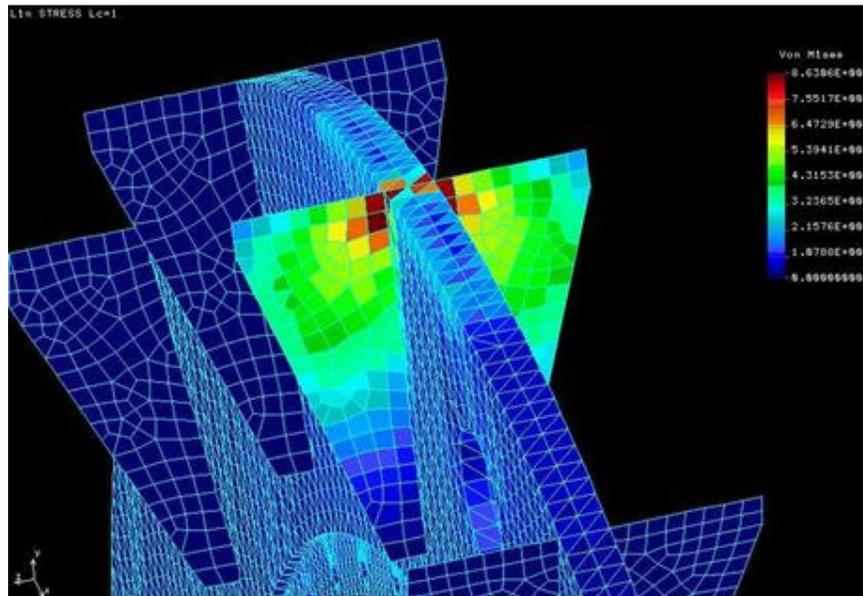


Figura N°4- Rappresentazione grafica dei punti di stress in una corona tradizionale

Nella figura N°5 invece si può vedere che nelle corone del tipo Monoflex le zone di stress sono molto meglio distribuite con minor pericolo di cedimenti.

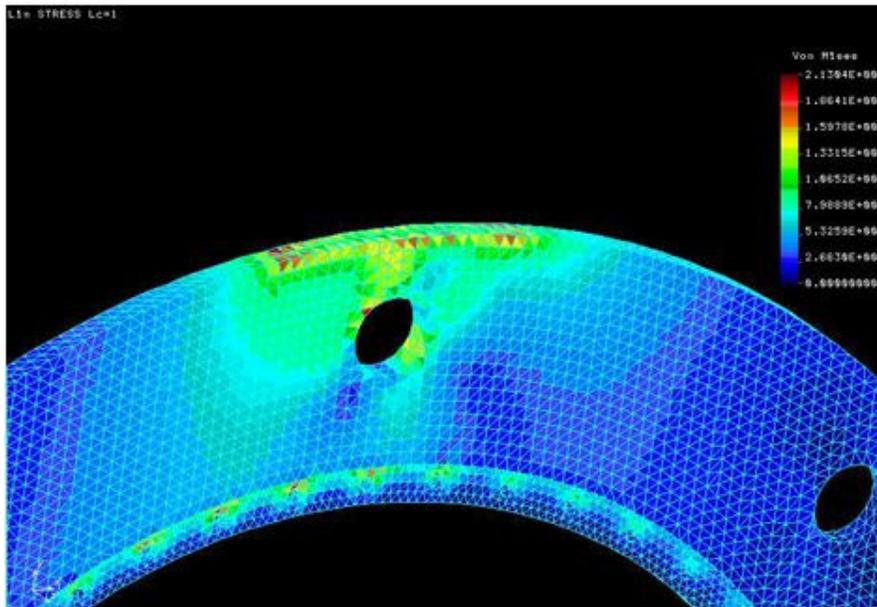


Figura N°5- Rappresentazione grafica dei punti di stress in una corona Monoflex

La seconda soluzione è oggetto di un altro brevetto della Darimec ed è costituita dal cosiddetto "Pinion Tool".

Si tratta in sostanza di un pignone che ha una durezza ed una resistenza dei denti molto superiore a quella della corona e funziona quindi come un rullatore.

Normalmente il profilo è corretto con una spoglia di testa che parte dal diametro che viene in contatto con l'inizio del profilo attivo della corona. Questo rende più graduale l'inizio del contatto tra i denti e facilita l'azione di rullatura.

Esso è stato concepito in realtà per riadattare il profilo dei denti usurati della corona, con un'azione di rullatura ma che ha un suo effetto positivo anche per annullare gli errori di profilo, di elica, ed anche quelli di allineamento, naturalmente entro certi limiti.

Poiché una trasmissione di un grande molino ruota sempre nello stesso senso, l'usura della ruota è concentrata su un fianco.

E' prassi comune, quando l'usura raggiunge limiti non più tollerati, di invertire la posizione della corona (che è simmetrica) facendo lavorare l'altro fianco dei denti e quindi raddoppiando la sua vita.

Con il Pinion Tool questa operazione, che richiede un tempo lungo, è praticamente inutile.

Nella tabella seguente sono confrontate le caratteristiche di un pignone tradizionale con quelle di un Pinion Tool.



Fig. N°6 – Grande corona e pignone in funzione in un cementificio

Confronto delle caratteristiche di un pignone tradizionale e di un Pinion Tool

<i>Caratteristiche tecniche</i>	<i>Unita di misura</i>	<i>Pignone tradizionale</i>	<i>Pinion Tool</i>
<i>Durezza</i>	--	<i>HB 290</i>	<i>HRC 58</i>
<i>Pressione di contatto δ_H</i>	<i>N/mm²</i>	<i>1000</i>	<i>1500</i>
<i>Carico di rottura</i>	<i>N/mm²</i>	<i>955</i>	<i>1040</i>
<i>Carico di snervamento</i>	<i>N/mm²</i>	<i>680</i>	<i>710</i>
<i>Durata media</i>	<i>ore</i>	<i>30.000</i>	<i>70.000</i>

Considerazioni sulle caratteristiche di lavoro in dentatura

Bisogna mettere in evidenza subito che dati gli altissimi costi di lavorazione di queste corone dentate bisogna essere assolutamente certi che non vi siano difetti strutturali all'interno della massa d'acciaio e tanto meno nelle zone di saldatura, che sono molto estese e profonde, in modo da non avere amare sorprese a lavorazioni avanzate o, peggio, durante l'utilizzazione.

A questo scopo, prima di iniziare qualsiasi lavorazione meccanica, si sottopone la corona ad un *esame ultrasonico* sia in senso assiale che radiale, per verificare l'assenza di irregolarità nella struttura, che ne potrebbero compromettere la resistenza,

Si pensi per esempio al danno provocato dal cedimento di uno o più denti durante l'impiego, causato da una soffiatura, da un'inclusione o altro. In questa circostanza la corona non può essere riparata e andrebbe sostituita.

Il cordone di saldatura viene controllato con un *esame ultrasonoro (UT) e magnetoscopico (MT)* (secondo la norma DIN 54120-54130). Il controllo (MT) è eseguito effettuando la magnetizzazione con inondazione di corrente e procedimento ad umido controllando l'intero cordone di giunzione anello-costola al 100% su entrambi i lati prima e dopo la ricottura di distensione.

Salvo casi eccezionali, le coppie corona-pignone hanno una dentatura standard con un angolo di pressione di 20° e con un'altezza dente pari a $h = 2,25 \cdot m$, cioè con addendum uguale al modulo e dedendum $1,25 \cdot m$.

Il taglio dei denti di queste grosse ruote avviene in tre operazioni.

La sgrossatura si esegue generalmente con una fresa biconica ad inserti in metallo duro (carbide) ricoperti con TiN, bloccati meccanicamente, che ha un angolo sui fianchi uguale all'angolo di pressione (generalmente A.P. 20°).

Il know how di Darimec nel taglio delle corone di grandi dimensioni ha portato a sviluppare un sistema di sgrossatura in due fasi con doppio ciclo al fine di prevenire deformazioni sul dente e sulle testate di unione.

Ogni corona viene controllata prima della dentatura a creatore per verificare che la geometria della stessa, rientri nelle tolleranze di forma richieste dal cliente.

La sgrossatura con creatore potrebbe avere dei tempi inferiori perché si tratta di un taglio continuo e quindi non ci sono i tempi delle corse di ritorno della fresa ed i tempi di divisione, ma bisogna disporre di un creatore specifico per ogni modulo, sgrossatore e finitore, e questo accresce i costi dell'utensile e quelli di stoccaggio.

In ogni caso bisogna sempre tener presente che lo spessore del truciolo non superi i limiti consigliati, che sono intorno ai 0,15 mm.

I creatori di queste dimensioni hanno costi rilevanti e, poiché non si eseguono dentature ripetitive, il magazzino utensili ha un valore non trascurabile.

La scelta di sgrossare con fresa o con creatore dipende comunque dalle specifiche realtà aziendali e dalla situazione contingente della produzione.

In ogni caso il soprametallo da lasciare per la successiva operazione di semifinitura è di circa 2,5 – 3 mm per fianco, sufficiente per compensare le inevitabili approssimazioni di profilo che si ottengono con la fresa.

La semifinitura delle grandi corone si esegue con il creatore, sulla stessa macchina dopo aver cambiato la testa a sgrossare di potenza.

Il cambio della testa operatrice richiede un tempo lungo, approssimativamente una giornata di lavoro.

Il creatore è di tipo standard, senza semitopping e, di norma, senza protuberanza che sarebbe del tutto inutile visto che l'ingranaggio non viene ne rettificato ne tanto meno rasato.

Per moduli così grandi (sopra i 20 mm) il creatore è ad un principio. L'acciaio che si usa è del tipo ad alto contenuto di cobalto (es. M35) e ricoperto con TiN per limitare l'usura. Il creatore infatti è fortemente sollecitato perché il volume di materiale da asportare è molto grande, ma lavora ad una velocità di taglio relativamente bassa (intorno ai 15-30 m/min).

Come si può osservare la velocità di taglio è distante anni luce da quelle che si possono oggi adottare per ingranaggi del tipo automobilistico, ma bisogna considerare che in primo luogo si tagliano ingranaggi di acciaio bonificato e non ricotti isotermicamente come nel caso di produzioni di grandi serie, in secondo luogo nel taglio di ingranaggi molto grandi non è il caso di usare creatori costruiti in acciai superlegati che permetterebbero prestazioni più elevate ma con costi estremamente alti.

Infine con creatori di modulo molto grande gli sforzi di taglio sono più elevati e potrebbero provocare vibrazioni e sollecitazioni dannose anche per la struttura della macchina.

L'avanzamento per giro resta nei limiti abbastanza prudenziali, cioè intorno ai 2 mm/giro pezzo; si preferisce non forzare troppo in quanto usure eccessive o rotture dei denti del creatore possono produrre danni sul pezzo ed avere conseguenze economiche molto gravose.

Si lascia un soprametallo di 0,6 – 0,8 mm per fianco per la successiva finitura.

In questa ottica, si preferisce inoltre affilare il creatore prima che l'usura diventi eccessiva anche se non si è finito il pezzo. Vale anche qui la regola che si adotta nel taglio di ingranaggi più piccoli, cioè quella di considerare un buon rendimento del creatore se si arriva a dentare 4 -5 metri di dente del pezzo per ogni dente del creatore.

Una eventuale irregolarità sulle caratteristiche geometriche dei dente generate dall'affilatura e dal rimontaggio del creatore in macchina, sono facilmente riassorbibili senza conseguenze nell'operazione di finitura.

La finitura viene eseguita con il creatore finitore in classe di precisione "A", il quale lavora anche il fondo del vano., perché viene usato lo stesso creatore della semifinitura.

Si finiscono con la rettifica solo le ruote che hanno diametri fino a 2 metri.

L'avanzamento per giro che, come si è già detto, in semifinitura può essere di 1,5-2 mm/giro pezzo, in finitura può essere leggermente superiore e arrivare a 2-2,5 mm/giro pezzo, questo può essere fatto a motivo del ridotto soprametallo da asportare. In questo modo si riesce a finire la ruota senza affilature intermedie del creatore (si parla qui di ruote con diametri superiori a 5 – 6m) e di ottenere sia una buona precisione che una ottima finitura superficiale.

La superficie così ottenuta ha una rugosità che mediamente è $R_a = 3 - 3,2$ micrometri.



Fig. N°7- Grande creatore di modulo 40mm

Darimec in sintesi

- Anno di fondazione = 1961
- Numero di dipendenti = 40
- Fatturato annuo = 8 – 10 milioni di Euro
- Prodotti esportati = 70%

Attività

- Produzione di ingranaggi, pignoni e corone dentate con diametro max 11.200 mm e modulo max 42 mm.
- Produzione di pignoni speciali "Pinion Tool" che raddoppiano la vita della corona.
- Possibilità di rettifica ingranaggi fino a diametro 2.000 mm.
- Produzione di riduttori speciali ad ingranaggi di medie e grandi dimensioni fino a potenze di 10.000 Kw.
- Produzione di riduttori di grandi dimensioni a vite senza fine.
- Produzione di giunti anche speciali e di grandi dimensioni.
- Lavorazioni per conto terzi: tornitura, alesatura, foratura e dentatura (tornitura fino a diam. 12.000 mm ed altezza 3.000 mm) (alesatura CNC con X=8.000 mm, Y=2.500 mm, Z=1.500 mm).
- Progettazione di ogni prodotto di cui sopra.