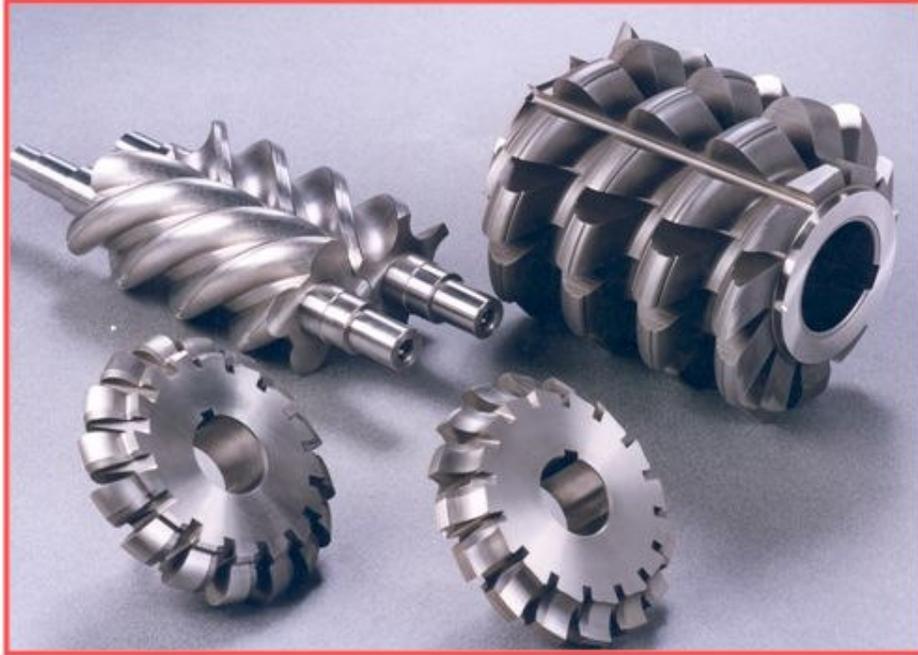


La costruzione dei rotori per compressori

Vengono qui fornite alcune notizie sulla costruzione dei rotori dei compressori. In linea generale questi rotori possono essere pensati come una coppia di viti a profilo speciale od a una coppia di ingranaggi a forte inclinazione di elica e con profili non ad evolvente ma coniugabili.

La loro costruzione richiede utensili del tutto speciali e macchine dedicate a questa produzione.



Per inquadrare i rotori, oggetto di questo scritto, nel vasto contesto dei vari tipi di compressori, facciamo, per prima cosa, una rapida carrellata sui diversi sistemi di compressione esistenti sul mercato.

Esistono infatti vari tipi di compressori che si distinguono per il sistema con cui viene generata una determinata pressione e per il sistema con cui vengono costruiti.

Compressori alternativi (a pistoni)

Sono i compressori più intuitivi e quelli utilizzati da maggior tempo ed infatti quando si pensa a questo tipo di compressore viene spesso in mente la comune pompa di bicicletta che è il classico compressore ad un pistone azionato manualmente.

Più in generale questo tipo di compressore ha uno o più pistoni che si occupano di aspirare e comprimere l'aria o un qualsiasi altro fluido. Ciò avviene grazie al funzionamento di due valvole: quella di mandata che impedisce all'aria già compressa di rientrare nel compressore durante la fase di aspirazione e quella di aspirazione che impedisce all'aria di uscire dal compressore dal condotto di aspirazione durante la fase di compressione.

E' lo stesso schema di funzionamento dei pistoni di un motore d'auto o, appunto, della pompa di bicicletta.

I compressori a pistoni possono essere a loro volta classificati secondo il tipo di costruzione.

- Ermetici: il compressore vero e proprio ed il motore elettrico sono racchiusi in un unico involucro saldato e non accessibile per la manutenzione. Qualora si rompa un singolo componente è necessario sostituire l'intero compressore. Questi compressori sono utilizzati nella refrigerazione civile: frigoriferi, congelatori, ecc. e negli impianti di piccole e medie potenzialità.

- Semi-ermetici: come per i compressori ermetici, il compressore ed il motore elettrico sono racchiusi in un unico involucro ma questo può essere aperto per le operazioni di manutenzione. Questi compressori sono utilizzati per le medie potenzialità e nei gruppi refrigeratori d'acqua.
- Aperti: il compressore ed il motore sono due entità completamente distinte tanto che, in molti casi, viene usato un motore a scoppio anziché un motore elettrico. Dal gruppo compressore esce un albero di trasmissione a cui collegare il motore tramite puleggia, cinghie, ingranaggi o altro. Sia il motore che il gruppo compressore sono completamente ispezionabili.

Compressori rotativi

Per compressori rotativi si intendono tutti quelli che effettuano la compressione dell'aria o di un altro fluido per mezzo di giranti, spirali, viti, ecc. ed effettuano tale compressione in modo continuo senza la sequenza di spinte tipica dei compressori a pistoni. La compressione può avvenire per mezzo di diversi *organi rotanti* e questo permette di classificare i compressori rotativi in:

A lama: il funzionamento di questi compressori sfrutta la rotazione di un rotore interno ad un cilindro in modo tale che il rotore si trovi sempre ad essere tangente ad una generatrice del cilindro. Secondo la tipologia del rotore utilizzato si suddividono in compressori a lama fissa e compressori a lame rotanti. La differenza consiste nella modalità di separazione fra l'aspirazione e la compressione. Nei compressori a lama fissa il punto di tangenza tra il rotore ed il cilindro si sposta continuamente sulla circonferenza del cilindro stesso. La lama fissa aderisce al rotore per effetto di una molla che lo fa avanzare ed arretrare all'interno della parete del cilindro, permettendole così di separare le zone di aspirazione e di compressione.

Nei compressori a lama fissa il centro di rotazione del rotore ed il centro del cilindro coincidono. Viceversa nei compressori a lame rotanti i due centri (cilindro e rotore) non coincidono permettendo così al punto di contatto fra cilindro e rotore di rimanere fisso lungo una generatrice del cilindro stesso.

Le lame sono incassate nel rotore e vengono mantenute a contatto con le pareti del cilindro tramite apposite molle.

La rotazione del rotore, unitamente all'azione delle molle, crea zone di aspirazione e compressione.

Scroll: nei compressori Scroll (detti anche a spirale orbitante) la compressione dell'aria o di un altro gas avviene grazie all'azione combinata di due spirali evolventi accoppiate tra loro. La prima spirale rimane fissa mentre la seconda compie un movimento orbitale (non una rotazione). Grazie a questa speciale configurazione fra le spire si vengono a creare delle sacche di aria che si spostano verso l'interno restringendosi e comprimendosi. La compressione ottenuta è estremamente uniforme evitando così le classiche pulsazioni dei compressori a pistoni.

A vite: la compressione dell'aria avviene tramite l'azione combinata di due viti ingranate l'una con l'altra. L'aria viene aspirata da una parte e viene poi compressa tra le spire delle due viti fino ad uscire dal lato opposto alla pressione richiesta. E' possibile l'utilizzo di una sola vite accoppiata con due rotori autonomi, ma l'uso prevalente è per i compressori a due viti.

Centrifughi: questo genere di compressori viene utilizzato unicamente per le grandi e grandissime potenze. Il principio di funzionamento è molto semplice: l'aria od il gas, affluisce in una camera dove è presente una girante dotata di palette (una specie di grande ventilatore) che imprime una grande velocità all'aria, aria che viene sospinta verso una ristretta luce d'uscita che ne causa l'aumento di pressione. La caratteristica di questi compressori è quella di trattare grandi quantità di aria o di gas senza però aumentare di molto la pressione (il differenziale di pressione fra aspirazione e mandata è molto minore rispetto ad altri tipi di compressore). Per aumentare la pressione di uscita è possibile aumentare il numero delle giranti; in questo caso si parlerà di compressori mono-stadio (1

girante), bi-stadio (2 giranti), e pluri-stadio (più di 2 giranti). Come per i compressori alternativi possiamo distinguere in compressori semi-ermetici o aperti in relazione alla tipologia costruttiva ed alla possibilità di svolgere la manutenzione sugli organi interni.

I rotori dei compressori a vite

Questo tipo di compressore si sta diffondendo sempre di più grazie alle sue doti di efficienza e di scarsa rumorosità.

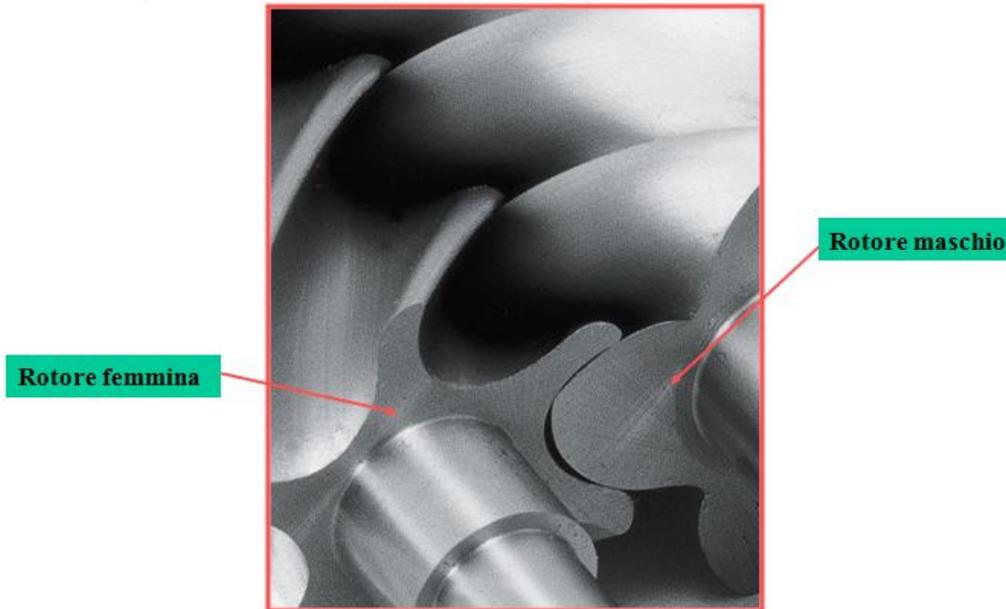


Figura N°1- Una coppia di rotori maschio e femmina ingranati tra loro

Il gruppo dei rotori racchiuso nella sua scatola di contenimento e di supporto è detto gruppo Air End.

I rotori che costituiscono una coppia (maschio e femmina) hanno un profilo studiato in modo da spostare l'aria in senso longitudinale. I punti critici dei rotori sono il profilo, che a volte è oggetto di brevetti, e l'interasse. I due rotori ruotano a contatto ma senza pressione radiale. Un rotore trascina l'altro in modo che non c'è gioco tra le due superfici in contatto e ciò permette di avere efficienze maggiori. Per limitare il danno dell'attrito, lo sviluppo del calore ed aumentare l'efficienza i rotori lavorano immersi nell'olio. I due rotori sono racchiusi in una scatola a tenuta e sono supportati da due coppie di cuscinetti che hanno, tra l'altro il compito di assorbire le spinte longitudinali che si generano durante la rotazione. I rotori normalmente sono rettificati, solo quelli di grandi dimensioni, cioè per compressori di potenza maggiore a 200 KW vengono finiti con fresa singola.

Esiste anche un tipo di Air End in cui i rotori non sono in contatto e vengono trascinati in rotazione da un sistema di ingranaggi che garantisce la rotazione sincronizzata dei rotori stessi. Poiché non c'è contatto tra le superfici, i rotori lavorano a secco, ma l'efficienza è molto ridotta.

I profili dei rotori maschio e femmina sono molto diversi tra loro, ma sono tra loro coniugati in modo che durante la rotazione non ci siano interferenze.

In pratica ogni grande costruttore di compressori studia un proprio profilo per i rotori e talvolta lo brevetta e, comunque, sempre, lo tiene segreto in modo che altri non lo copino. Lo scopo di questi profili speciali è quello di conferire alla coppia la maggiore efficienza possibile.

La costruzione dei rotori prevede, dopo le normali operazioni di preparazione del pezzo con la tornitura, la fase delicata della dentatura.

A questo scopo si usa, fino ad altezze dei denti di circa 30 mm, il metodo di generazione con creatore, mentre per altezze dente superiori si usa il metodo di fresatura con frese di forma.

Successivamente a queste operazioni di sgrossatura i profili normalmente dovrebbero essere finiti o con la rettifica, se si vogliono ottenere i migliori risultati, oppure con una ulteriore passata di finitura con fresa.

E' evidente che la finitura con un'operazione di rettifica genera un profilo più preciso, minori errori di elica e di passo ed una superficie dei denti molto migliore.

Tutto ciò migliora di molto l'efficienza della coppia di rotori.

Spesso sono richiesti dei prototipi o per nuovi modelli di compressore o per verificare l'efficienza di determinati progetti che coinvolgono i profili, il numero di denti, l'elica e la lunghezza del rotore. In questi casi è conveniente ricavare il profilo dei denti direttamente dal pieno con un'operazione di rettifica, naturalmente usando mole in ceramica.

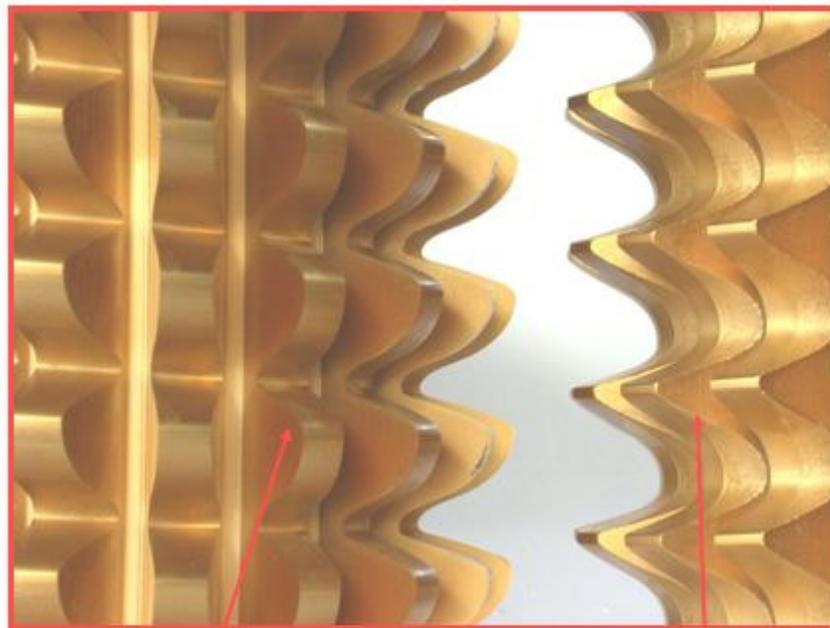
In questo modo, pur essendo l'operazione abbastanza lunga, è molto conveniente in quanto non si costruiscono né frese né creatori il cui costo inciderebbe in maniera molto forte sul prototipo.

Inoltre si saltano completamente i tempi per la costruzione di frese e creatori che sono sempre dell'ordine di alcune settimane e quindi si può disporre del prototipo in tempi molto brevi: solo alcuni giorni.

I creatori per rotori

Sono utensili con un profilo del tutto particolare, perché devono generare dei denti che non sono i classici denti degli ingranaggi con profilo ad evolvente.

Il profilo della cremagliera di questi creatori deve coniugare il profilo dei denti da generare e la sua definizione, oggi, è resa agevole da appositi software che trasformano le coordinate cartesiane del profilo del pezzo nelle corrispondenti coordinate cartesiane del profilo del creatore. Nella figura N°2 sono rappresentati due creatori di questo tipo.



**Creatore per
rotore femmina**

**Creatore per
rotore maschio**

Figura N°2- Esempio di creatori maschio e femmina

Questi creatori normalmente sono ad un principio in quanto devono dentare pezzi con un limitato numero di denti (4 – 6) e vengono ricoperti con TIN.

La precisione di questi creatori può anche non essere elevata perché in genere si lascia un buon soprametallo per le operazioni di finitura.

Anche se una comparazione con i corrispondenti creatori a modulo non è esatta, si può dire che si adotta una classe di precisione B secondo DIN.

I creatori devono asportare una considerevole quantità di materiale e quindi sono sottoposti a sollecitazioni che in linea di massima sono superiori a quelli dei creatori usati nella dentatura di ingranaggi.

Questa è una ragione per cui le condizioni di lavoro sono tenute piuttosto basse; un'altra ragione è quella di non sollecitare troppo la macchina dentatrice, infine bisogna tener conto che si lavora un materiale del tipo C40 – C45 con una durezza di 180 – 220 HB.

Il ciclo di dentatura dipende dalla dimensione del rotore, ed essenzialmente dall'altezza dei denti, che in un certo senso permette di paragonare la dimensione del rotore a quella di una dentatura a modulo, inoltre dipende anche dalla rigidità della macchina disponibile.

Come esempio si può considerare che per rotori con altezza dente di 25 – 30 mm, che corrispondono grosso modo ad ingranaggi con $m = 10 - 13$ mm, si possono usare le seguenti caratteristiche di lavoro:

- Sgrossatura = velocità di taglio = 40 m/min; avanzamento = 1,5 mm/giro pezzo
- Finitura : velocità di taglio = 60 m/min ; avanzamento = 2 mm/giro pezzo

Con il creatore la Samputensili S.p.A di Bologna denta rotori con altezza massima dei denti di 30 mm, per dimensioni superiori vengono usate le frese di forma come indicato nella figura N°3.

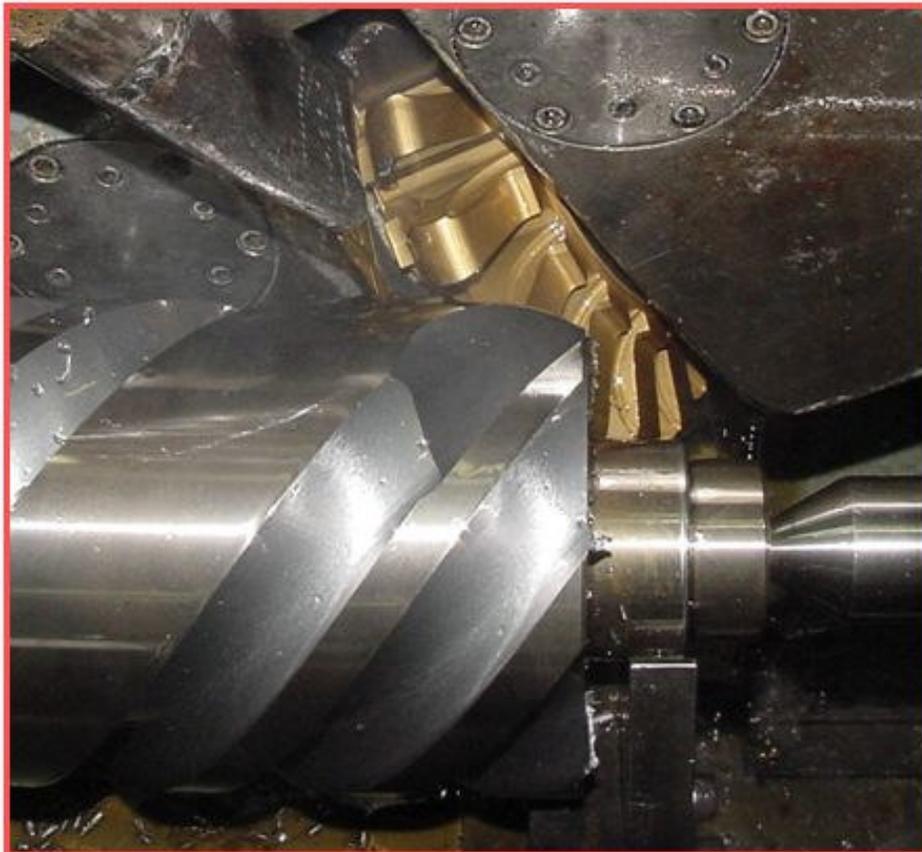


Figura N°3- Fresatura di un rotore

Come esempio di dentatura di un rotore si possono considerare i dati riportati nella tabella seguente.

Caratteristiche rotore	Valori	Note
Tipo rotore	maschio	<i>La dentatura del rotore femmina è più difficoltosa</i>
Diametro esterno (mm)	133	
Numero di denti	5	
Altezza dente	24,2	
Larghezza fascia (mm)	220	
Caratteristiche di lavoro		
Diametro del creatore (mm)	150	<i>Creatore ad un principio</i>
<i>Sgrossatura:</i>		
Velocità di taglio (m/min)	40	<i>Lunghezza totale della corsa del creatore = 320 mm</i>
Avanzamento (mm/giro pezzo)	1,50	
Avanzamento (mm/min)	25,50	
Tempo di sgrossatura (min)	12,54	
<i>Finitura:</i>		
Velocità di taglio (m/min)	60	<i>Lunghezza totale della corsa del creatore = 320 mm</i>
Avanzamento (mm/giro pezzo)	2,0	
Avanzamento (mm/min)	50,8	
Tempo di finitura (min)	6,30	
Tempo totale di dentatura (min)	18,84	<i>Non considerato il tempo di set up</i>

La finitura dei rotori con l'operazione di rettifica è quella che qualifica il prodotto elevandone la precisione e l'efficienza in fase di impiego.

La precisione standard può essere considerata la seguente:

- ❖ *Deviazione del profilo* : $\pm 0,003\text{mm}$
- ❖ *Deviazione sull'elica* : $\pm 0,006\text{mm}$ (su una lunghezza di 100 mm)
- ❖ *Stato della superficie* : $R_a = 0,6 \div 0,8\mu\text{m}$

Il gioco tra il rotore maschio e quello femmina è 0,03 – 0,05 mm se si lavora con olio, mentre per i compressori *oil free*, il gioco dovrebbe essere zero.

Bisogna tener presente però che questi tipi di rotori si riscaldano fortemente e per effetto della dilatazione termica subiscono una notevole variazione dimensionale.

Per questa ragione i rotori freddi non possono avere gioco zero, perché in fase di lavorazione si bloccherebbero. Essi vengono perciò costruiti con un gioco di 0,1 – 0,2 mm che si riduce quasi a zero in fase di lavoro.

La deviazione ammessa del profilo dal diametro di riferimento è di $\pm 0,01$ mm.

La rettifica dei rotori è eseguita con il metodo di forma utilizzando mole in ceramica o mole in CBN elettrodeposto.

Si usano mole in ceramica quando si devono eseguire basse produzioni (meno di 500 pezzi in totale), mentre si usano mole in CBN quando la produzione totale è maggiore di 500 pezzi, in quanto in questo modo si ammortizza bene il costo più elevato della mola.

Nella figura N°4 sono illustrate le mole in ceramica e in CBN.



Mole in ceramica



Mola in CBN E.D.

Figura N°4- Esempi di mole di forma in ceramica ed in CBN elettrodeposto

Le condizioni di lavoro in rettifica dipendono dal tipo di mola impiegato e dal soprametallo lasciato dalla precedente operazione di sgrossatura, ma esiste un'ampia discrezionalità nella scelta del numero di passate, della velocità della tavola, del soprametallo asportato per ogni passata.

Il soprametallo varia da 0,15 mm per i rotori più piccoli a 0,25 mm per i rotori di maggiori dimensioni.

Considerando un soprametallo di circa 0,25 mm per fianco, che mette a riparo da ogni possibile errore di forma e di elica lasciato in sgrossatura, si possono, per esempio, adottare i seguenti parametri di lavoro.

Bisogna precisare che di seguito per passata si intende una corsa di andata ed una di ritorno.

Anche se normalmente nel corso di una passatale condizioni di lavoro restano uguali per le due corse, nulla vieta che si potrebbero anche cambiare.

Con mole in ceramica:

- *N°1 passata di sgrossatura, lavorando sia all'andata che al ritorno, con asportazione di 0,075 mm per ogni corsa.*
- *N1 passata di prefinitura, lavorando sia all'andata che al ritorno, con asportazione di 0,03 mm per corsa.*
- *N°2 passate di finitura, lavorando sia all'andata che al ritorno, con asportazione di 0,01 mm per corsa.*
- *N°2 passate di finitura, lavorando sia all'andata che al ritorno, con asportazione di 0,02 mm in totale.*
- *Velocità di taglio: 33 – 36 m/sec.*
- *Avanzamento in sgrossatura e finitura: 2500 mm/min*
- *Avanzamento in prefinitura: 3000 mm/min*

Con mole in CBN elettrodeposto

- *N°1 passata di sgrossatura con asportazione di 0,20 mm*
- *N°1 passata di finitura con asportazione di 0,05 mm*
- *Velocità di taglio: 33 – 36 m/sec.*
- *Avanzamento in sgrossatura ed in finitura: 500 -1000 mm/min*

Si può osservare immediatamente la grande convenienza che si ottiene, in termini di tempo di lavoro, usando le mole al CBN; normalmente il risparmio di tempo è dell'ordine

del 30 – 40 %. Come si è già detto questo minor costo del tempo di rettifica compensa il maggior costo della mola a partire da circa 500 pezzi rettificati.

Nella tabella seguente sono riepilogati i dati di lavoro possibili per un determinato tipo di rotore.

Caratteristiche rotore	Valori	Note
Tipo rotore	maschio	<i>Soprametallo costante sul profilo 0,25 mm per fianco</i>
Diametro esterno (mm)	133	
Numero di denti	5	
Altezza dente	24,2	
Larghezza fascia (mm)	220	
Caratteristiche di lavoro		
Velocità di taglio (m/sec)	36	<i>Valida per tutte le passate</i>
<u>Sgrossatura:</u>		
N° passate	1	<i>Andata e ritorno (2 corse)</i>
Asportazione per corsa (mm)	0,075	
Avanzamento (mm/min)	2500	
<u>Prefinitura:</u>		
N° passate	1	<i>Andata e ritorno (2 corse)</i>
Asportazione per corsa (mm)	0,03	
Avanzamento (mm/min)	3000	
<u>1^a Finitura:</u>		
N° passate	1	<i>Andata e ritorno (2 corse)</i>
Asportazione per corsa (mm)	0,01	
Avanzamento (mm/min)	3000	
<u>2^a Finitura:</u>		
N° passate	1	<i>Andata e ritorno (2 corse)- Non si diamanta</i>
Asportazione per corsa (mm)	0,02	
Avanzamento (mm/min)	3000	
Tempo totale incluse le diamantature (min)	21	

Nell'ipotesi di dover eseguire questo rotore come prototipo e di ricavare la dentatura dal pieno con l'operazione di rettifica, il tempo necessario sarebbe di circa 5 – 6 ore.

La macchina rettificatrice usata dalla Samputensili S.p.A di Bologna è la rettifica di forma completamente CNC mod. S375G che utilizza un diamantatore gestito dal CNC che permette l'esecuzione di qualsiasi profilo sulla mola.

Uno speciale software permette di inserire o le coordinate cartesiane oppure le coordinate polari del profilo del pezzo ottenendo automaticamente il profilo voluto sulla mola.

In figura N° 5 è indicato un rotore durante l'operazione di rettifica. Si può osservare che la macchina è dotata di uno speciale dispositivo di fasatura che orienta automaticamente il pezzo sulla mola suddividendo in maniera ottimale il soprametallo dei due fianchi. Inoltre il sensore determina l'eventuale eccentricità del rotore e modifica la posizione della mola per evitare eccessive asportazioni in alcune zone del rotore.



Figura N°5- *Controllo del rotore e trasmissione dei dati al CNC della macchina per l'eventuale correzione automatica degli errori*

Uno dei punti critici dell'operazione di rettifica è evidentemente la precisione del profilo ottenuto sul pezzo.

Quando si inizia a rettificare un nuovo rotore è necessario controllare il primo pezzo eseguito prima di proseguire a rettificare regolarmente la produzione e questo controllo deve essere effettuato ogni volta che si sostituisce la mola e periodicamente durante la regolare produzione.

Se si riscontrano scostamenti di profilo o di elica superiori alla tolleranza fissata, l'operatore deve modificare i dati di impostazione del profilo con una perdita di tempo non trascurabile.

La soluzione per ovviare a questo inconveniente è quella di collegare l'apparecchio di controllo con il CN della macchina e trasmettere i dati di scostamento rispetto alle dimensioni teoriche. Il CN della macchina apporterà le dovute correzioni al profilo o all'impostazione della macchina senza alcun intervento dell'operatore ed in un tempo molto breve. La figura N°6 mostra appunto uno di questi apparecchi di controllo collegati alla macchina rettificatrice.



Figura N°6- *Rotore prodotta da Samputensili SpA*

Il ciclo di lavorazione prevede anche un'operazione di bilanciamento del rotore allo scopo di evitare vibrazioni in fase di funzionamento che potrebbero danneggiare in breve tempo i cuscinetti di supporto.

Il bilanciamento viene eseguito praticando delle tacche con una fresa a dito sul corpo del rotore stesso. Anche in questo caso operazione viene eseguita su un bilanciatore gestito da un controllo numerico.

La Samputensili S.p.A. produce rotori per conto terzi nella seguente gamma dimensionale.

- *Rotori per compressori d'aria ad iniezione d'olio*
- *Rotori per compressori d'aria oil free*
- *Rotori per compressori per impianti di refrigerazione*
- *Diametro esterno fino a 370 mm*
- *Lunghezza totale fino a 1000 mm*
- *Lunghezza rettificata fino a 500 mm*
- *Massimo peso 150 Kg*