



 Studio delle lavorazioni di **sgrossatura trocoidale**, ormai ben note agli operatori del settore grazie ai vantaggi che comporta non solo nella lavorazione di materiali duri, ma anche in casi più comuni di sgrossatura

Potenza, energia e durata utensile in fresatura trocoidale

Questo articolo prosegue l'analisi energetica delle lavorazioni di fresatura già affrontato con l'articolo **“L'energia in tornitura e fresatura”**, pubblicato su Macchine Utensili di novembre 2024 e l'articolo **“Ottimizzare l'energia in fresatura”**, pubblicato su Macchine Utensili di dicembre 2024

■ Massimiliano Annoni



Per poter dimostrare la sensibile differenza nei tempi ciclo, sono state progettate due tasche di forma complessa, simmetriche rispetto alla diagonale del grezzo

Il seguito naturale degli articoli precedenti è lo studio delle lavorazioni di sgrossatura trocoidale (“Dynamic Milling” per Sandvik Coromant, “Adaptive Milling” per Siemens NX, ecc.), che ormai è ben noto agli operatori del settore grazie ai vantaggi che comporta non solo nella lavorazione di materiali duri, ma anche in casi più comuni di sgrossatura.

Viene riportato come esempio il caso affrontato in un workshop svoltosi nel 2021 presso il MADE Competence Center Industria 4.0 di Milano (partner dell’evento: laboratorio PoliMill del Politecnico di Milano, Third Wave Systems (TWS), Sandvik Coromant, R.F. Celada, ATS Team 3D) in cui si mostrava, attraverso un esempio concreto lavorato in macchina (una OKUMA Genos M460-5AX), come ridurre il tempo ciclo di sgrossatura anche del 50 % facendo uso della strategia di fresatura trocoidale (si

“Dynamic Milling”

“Adaptive Milling”

“Cavity Milling”

veda anche l’articolo “Strategie per la riduzione del tempo ciclo fino al 50 %, Macchine Utensili, Marzo 2022).

Nel workshop si era valutato l’utilizzo di due strategie di sgrossatura a 3 assi al fine di scegliere la più opportuna per ridurre il tempo ciclo di un componente in H13 (DIN 1.2344, HRC 22): la strategia tradizionale (nome in Siemens NX: “Cavity Milling”), basata sulla massima profondità di taglio radiale a_p e su una ridotta profondità di taglio assiale a_{p1} , e la strategia trocoidale, basata esattamente sulla scelta opposta (a_p ridotta e a_{p1} elevata). Per poter dimostrare la sensibile differenza nei tempi ciclo, sono state progettate due tasche di forma complessa, simmetriche rispetto alla diagonale del grezzo. Un lato del pezzo è stato fresato con la strategia tradizionale (Figura 1 e Figura 2) e l’altro con quella trocoidale (Figura 3 e Figura 4).

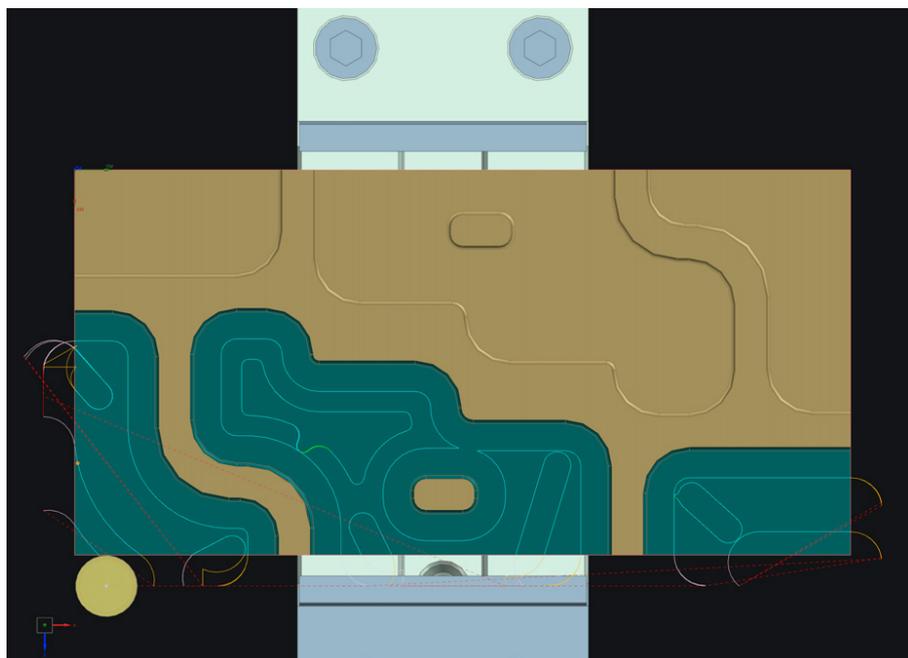


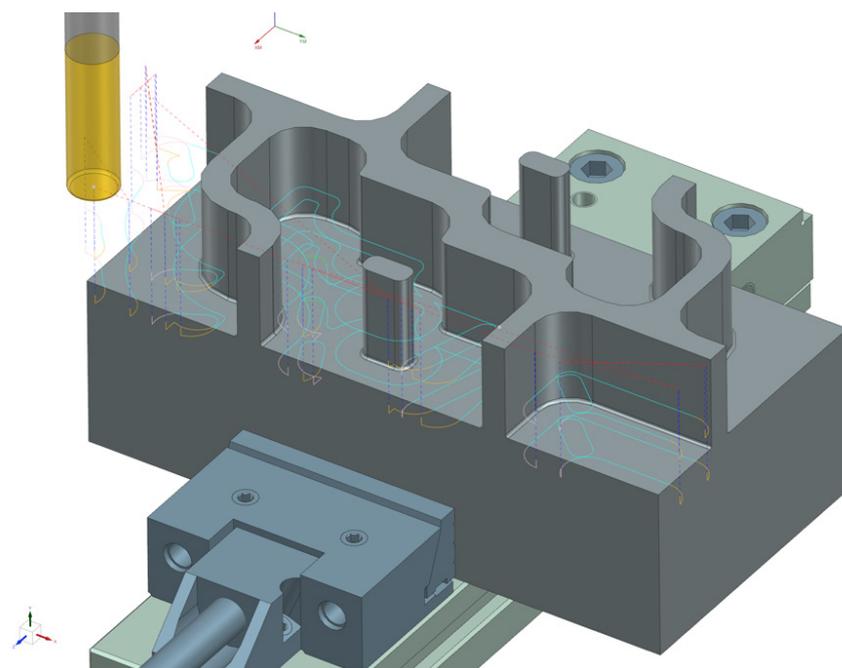
Figura 1: Traiettoria del centro fresa per la strategia di sgrossatura tradizionale (vista in pianta)

Figura 2: Traiettoria del centro fresa per la strategia di sgrossatura tradizionale (vista 3D)

La fresa scelta per la lavorazione era la CoroMill® Plura 2F342-1600-100-PC 1730 (diametro $D_c = 16$ mm), fresa a candela in metallo duro integrale a 5 taglienti per fresatura pesante, ora non più in produzione e sostituita dalla 2F342-1600-100-PD P2BM, che si differenzia dalla versione precedente solo per il tipo di attacco e per il materiale dell'utensile, ma non per la geometria. La stessa fresa era stata usata per entrambe le strategie.

Le profondità di taglio adottate per la strategia di sgrossatura tradizionale erano: $a_e = 100\%$ del diametro fresa e $a_p = 100\%$ del diametro fresa, richiedendo che il pezzo fosse realizzato in due passate. La strategia di sgrossatura ottimizzata invece si era caratterizzata per $a_e = 10\%$ del diametro fresa e $a_p = 200\%$ diametro fresa. Non era stata eseguita né la semifinitura né la finitura.

La strategia ottimizzata si basava su due fattori, ovvero l'effettivo percorso trocoidale ottenuto tramite il CAM e la modifica della velocità di avanzamento apportata in funzione di un profilo di forze ottimizzato usando il software Production Module sviluppato da TWS. La strategia ottimizzata prevedeva quindi l'utilizzo di bassi impegni radiali ma altissimi impegni assiali, permettendo di ottenere velocità di avanzamento molto maggiori e un aumento nella quantità di



materiale asportato. Questa strategia, che è conosciuta come trocoidale, è direttamente programmabile in Siemens NX, dove prende il nome di Adaptive Milling. Implementato l'approccio trocoidale, l'interfaccia di TWS XChange NX permette di esportare il percorso utensile prima di essere post processato in modo che si possano stimare le forze generate dall'operazione,

imporre soglie e ottimizzare di conseguenza la velocità di avanzamento.

Così operando, la velocità di avanzamento, che era stata mantenuta costante durante la lavorazione della tasca con il metodo tradizionale, diventava variabile durante la lavorazione trocoidale ottimizzata, permettendo velocità di avanzamento di punta più elevate. Una volta termi-

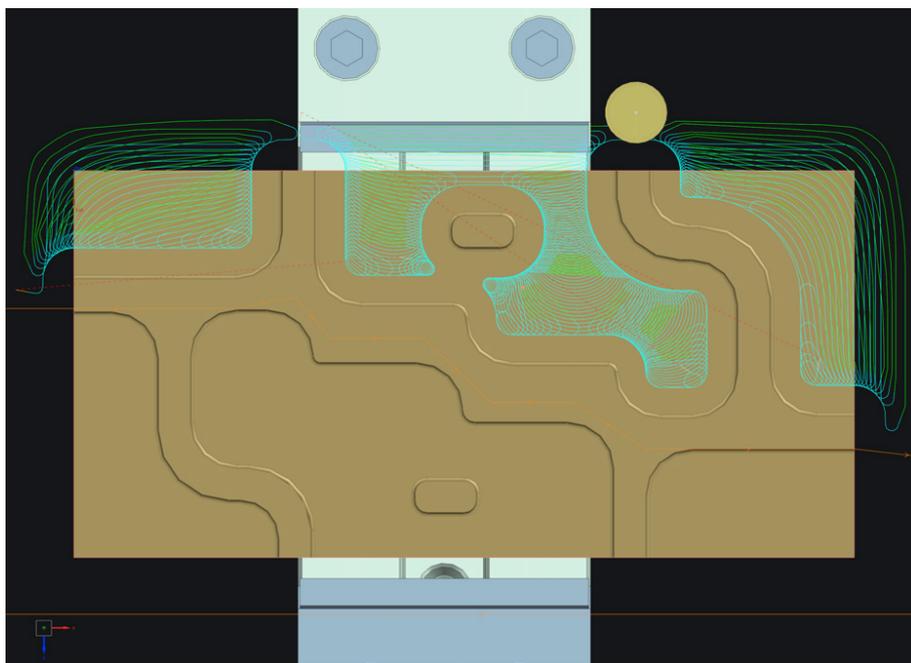


Figura 3: Traiettoria del centro fresa per la strategia di sgrossatura trocoidale (vista in pianta)

nato il processo di ottimizzazione in Production Module, è possibile riportare il percorso ottimizzato nuovamente all'interno di NX per procedere con il post processamento.

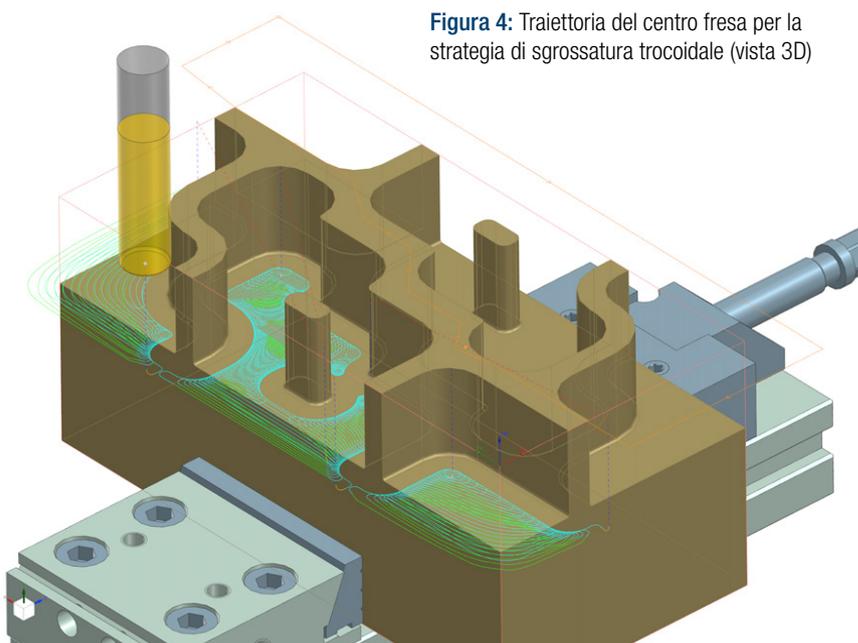
Come previsto, le prove in macchina dimostrano come il tempo di lavorazione della strategia tradizionale, pari a 18,5 minuti, potesse essere ottimizzato fino a un valore di 9,7 minuti, con una diminuzione del 48 % rispetto al tempo iniziale. Il pezzo fresato è rappresentato in Figura 5. Oltre al tempo di lavorazione, si può notare come la qualità del fondo prodotto dalla sgrossatura trocoidale sia molto più regolare, grazie al fatto che la fresa risulta più omogeneamente impegnata lungo il percorso rispetto alla fresatura tradizionale, che invece causa rallentamenti con conseguente rimozione variabile di materiale. Vediamo ora, in base alla teoria già riportata negli articoli di novembre e di dicembre 2024, come si possa spiegare questa performance e che effetti abbia sulla potenza e sull'energia richiesta per la lavorazione.

Il giusto criterio per massimizzare la produttività in fresatura prevede che si imponga lo spessore di truciolo massimo previsto dall'utensiliere per la fresa in esame. Questo porta la fresa a lavorare con un carico per unità di tagliente in presa (definito dalla formula seguente) pari al valore di progetto.

$$\frac{F_{c,m}}{b} = k_{c1} \cdot h_m^{1-x}$$

Nella formula, $F_{c,m}$ è la forza media di taglio, mentre k_{c1} è la pressione specifica di taglio e x è il coefficiente relativo al materiale dell'utensile, entrambi ottenibili dal catalogo dell'utensiliere. Dato che in questo articolo vogliamo operare

Figura 4: Traiettoria del centro fresa per la strategia di sgrossatura trocoidale (vista 3D)



un confronto tra la performance di una fresa in una sgrossatura tradizionale rispetto a una sgrossatura trocoidale (la fresa selezionata può effettuare entrambi i tipi di sgrossatura), dobbiamo mantenere lo stesso carico per unità di lunghezza di tagliente in presa nei due casi in modo che la fresa sia sfruttata a pari condizioni. Questo implica mantenere lo spessore medio di truciolo h_m uguale nei due casi. h_m si ot-



Figura 5: Pezzo fresato. A destra la strategia di sgrossatura tradizionale e a sinistra quella trocoidale

Figura 6: Parametri di taglio, potenza e energia per il caso di studio trattato nell'articolo

	v_c	f_z	a_e	a_p	v_f	Q	$\cos(\varphi)$	φ	φ
	m/min	mm	mm	mm	mm/min	mm ³ /min	-	gradi	rad
Tradizionale	175	0,0901	16	16	1570	401920	-1	180	3,14
Trocoidale	319	0,184	1,61	32	5840	300877	0,79875	37	0,65
	h_m	k_{c1}	x	$k_{c,m}$	P_c	Volume	Tempo	Energia	Energia
	mm	N/mm ²	-	N/mm ²	W	mm ³	min	MJ	kWh
Tradizionale	0,057	1950	0,25	3991	26734	960000	2,389	3,83	1,064
Trocoidale	0,057	1950	0,25	3991	20013	960000	3,191	3,83	1,064

tiene dalla formula seguente, valida per frese a candela:

$$h_m = \frac{2f_z a_e}{\varphi D_c}$$

Nella formula compare lo spessore medio di truciolo h_m , il diametro della fresa D_c , l'avanzamento al dente f_z , la profondità di passata radiale a_e e l'arco in presa φ .

Per ricavare i parametri di taglio, abbiamo usato CoroPlus® Tool Guide, il sito di Sandvik Coromant che permette il calcolo dei parametri di taglio delle frese del marchio svedese. La fresa è una CoroMill® Plura 2F342-1600-100-PD P2BM a 5 taglienti.

Il materiale lavorato è un H13 (DIN 1.2344, HRC 22).

Come nel caso trattato nel workshop descritto precedentemente, in cui si era usata la ver-

sione della fresa precedente rispetto a quella impostata attualmente nel sito Sandvik, la fresa ha diametro $D_c = 16$ mm e viene impegnata con a_e e a_p pari al diametro nel caso di fresatura tradizionale (per cui si devono eseguire due passate per completare il pezzo) e con $a_e = 10\%$ e $a_p = 200\%$ del diametro nel caso trocoidale (Figura 6).

Nella Figura 6 si può leggere anche il valore suggerito per la velocità di taglio v_c e per l'avanzamento al dente f_z nei due casi.

Le formule applicate per i calcoli sono riportate qui di seguito:

$$v_c = \frac{\pi D_c n}{1000}$$

$$v_f = n \cdot f_z \cdot Z$$

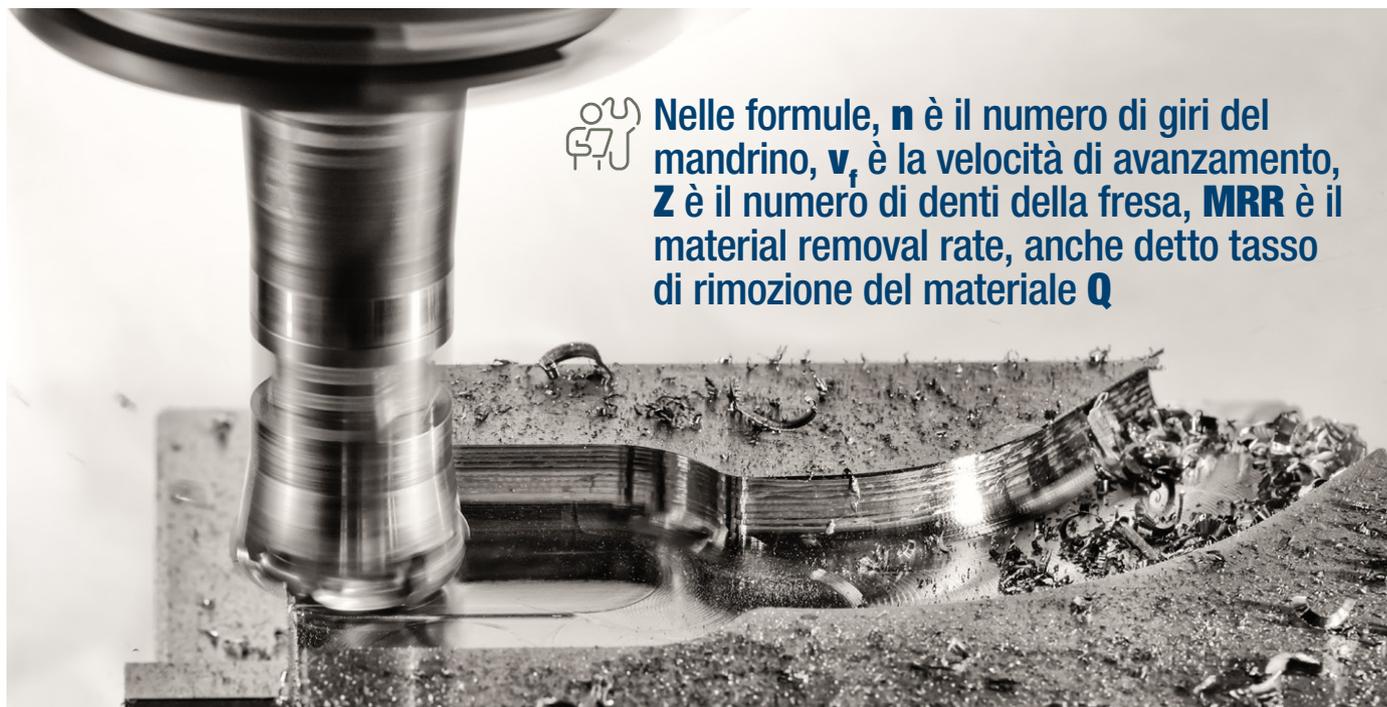
$$MRR = Q = a_p \cdot a_e \cdot v_f$$

Nelle formule, n è il numero di giri del mandrino, v_f è la velocità di avanzamento, Z è il numero di denti della fresa, MRR è il material removal rate, anche detto tasso di rimozione del materiale Q . L'arco in presa φ non è noto a priori, ma è calcolabile con la formula seguente:

$$\cos(\varphi) = \frac{\frac{D_c}{2} - a_e}{\frac{D_c}{2}} = \frac{D_c - 2a_e}{D_c} = 1 - \frac{2a_e}{D_c}$$

L'angolo in presa φ è necessario per calcolare lo spessore medio di truciolo h_m . Come si nota dalla Figura 6, la condizione che ci siamo posti di impegnare la fresa con lo stesso carico per unità di tagliente in presa è verificata grazie alla costanza di h_m .

Per calcolare la potenza di taglio, anch'essa costante nei due casi per via di h_m , prima è necessario calcolare la pressione di taglio $k_{c,m}$ secondo la formula seguente, dove troviamo parametri già citati in precedenza come la pressione specifica di taglio k_{c1} e il coefficiente x , rela-



Nelle formule, **n** è il numero di giri del mandrino, **v_f** è la velocità di avanzamento, **Z** è il numero di denti della fresa, **MRR** è il material removal rate, anche detto tasso di rimozione del materiale **Q**

tivo al materiale dell'utensile, che si ottengono dai cataloghi degli utensilieri:

$$k_{c,m} = k_{c1} h_m^{-x}$$

Non resta che calcolare la potenza di taglio grazie alla formula seguente, in cui per semplicità si considera un'efficienza meccanica η della macchina pari all'unità:

$$P_c = \frac{k_{c,m} \cdot v_f \cdot a_p \cdot a_e}{60 \cdot 1000 \cdot \eta}$$

Va detto che questo caso di studio non coincide con il caso mostrato nel workshop del 2021, dove i parametri erano stati adattati ai vincoli imposti dalla curva di coppia e potenza del mandrino dell'OKUMA Genos M460-5AX, ma ne eredita la scelta della fresa e le profondità di passata nei due casi di sgrassatura trattati. Il volume che appare nella Figura 6 è coerente con il caso mostrato in Figura 5 e il tempo di lavorazione è stato calcolato considerando i soli tempi attivi, dividendo il volume da asportare per il tasso di rimozione di materiale Q .

Ora vale la pena di fare alcune considerazioni importanti. Dato che il tasso di rimozione del materiale Q è inferiore nel caso trocoidale secondo i dati suggeriti da ToolGuide, la potenza richiesta è inferiore. Dato però che il tempo di lavorazione è superiore, si arriva allo stesso valore di energia consumata per la lavorazione. Del resto, ci si poteva aspettare questo risultato in quanto la pressione media di taglio, che rappresenta l'energia per asportare un'unità di volume di materiale, è uguale nei due casi.

In realtà si può meglio comprendere l'effetto della fresatura trocoidale sulla potenza e sull'energia richiesta per la lavorazione se si spinge ulteriormente sulla caratteristica principale della fresatura trocoidale, che è la possibilità di lavorare a profondità di passata assiale a_p ancora più elevate. Se per esempio usassimo un utensile identico a quello analizzato, ma con la possibilità di lavorare ad una a_p pari a tre volte il diametro (48 mm), otterremmo, a parità di tutti gli altri parametri, una potenza addirittura superiore a quella della strategia tradizionale, ma anche un tempo di lavorazione più breve, sempre per arrivare allo stesso valore di energia richiesta per la lavorazione, che rimane uguale al caso precedente, dipendendo dal $k_{c,m}$. La pressione media di taglio $k_{c,m}$ non dipende infatti da

a_p per cui la fresatura trocoidale, agendo su a_p , non altera l'energia richiesta per la lavorazione, ma la potenza e il tempo, che in queste condizioni sono inversamente proporzionali: più si aumenta a_p , più aumenta il tasso di rimozione di materiale Q e la potenza e più si riduce il tempo a pari energia. In altre parole, la strategia trocoidale, usata massimizzando il carico della fresa, non fa risparmiare energia, ma fa risparmiare tempo a pari energia. C'è però un altro aspetto rilevante. Dato che la fresatura trocoidale richiede un arco impresa ridotto, il singolo dente della fresa sviluppa una temperatura inferiore al caso tradizionale in quanto il tempo di contatto è ridotto. Dopo l'uscita del dente dall'arco in presa, il dente ha la possibilità di raffreddarsi per più tempo per cui la temperatura della fresa rimane mediamente inferiore, con un vantaggio in termini di durata dell'utensile. Con i dati usati in questo caso di studio, ToolGuide prevede che nel caso tradizionale la fresa riesca a lavorare 7,7 tasche, mentre nel caso trocoidale la performance sale a 16,3. ■

Riferimenti

"Tecnologia Meccanica",
M.P. Groover, Edizioni CittàStudi
"Tecnologia Meccanica", S. Kalpakjian,
S.R. Schmidt, Edizioni Pearson