

Ottimizzazione di lavorazioni per asportazione di truciolo

La funzione di ottimizzazione di lavorazioni per asportazione di truciolo contiene vincoli tecnologici e numerosi parametri da impostare sulla macchina e relativi all'utensile, in funzione dell'operazione da svolgere e del materiale da lavorare. Tale ottimizzazione multidimensionale ammette soluzioni numeriche (ad esempio basate su intelligenza artificiale) ancora poco impiegate industrialmente. Questo articolo esamina gli effetti economici (costo, produttività e profitto) della scelta di velocità di taglio e durata dell'utensile basandosi sul modello dell'usura descritto dalla legge di Taylor

Maurizio Barbuti, Marco Mancino, Matteo Pani, Michele Lanzetta

La funzione di ottimizzazione di lavorazioni per asportazione di truciolo contiene vincoli tecnologici e numerosi parametri da impostare sulla macchina e relativi all'utensile in funzione dell'operazione da svolgere e del materiale da lavorare. Tale ottimizzazione multidimensionale ammette soluzioni numeriche (ad esempio basate su intelligenza artificiale) ancora poco impiegate industrialmente. Questo articolo esamina gli effetti economici (costo, produttività e profitto) della scelta di velocità di taglio e durata dell'utensile

basandosi sul modello dell'usura descritto dalla legge di Taylor. Questi criteri permettono di determinare i parametri di taglio (velocità di taglio ed avanzamento) tali da minimizzare rispettivamente il costo (€/pezzo) o il tempo dell'intera lavorazione (min./pezzo) e quindi massimizzare la produttività (pezzi/min.), o ancora la redditività della lavorazione (€/min.). Possono però verificarsi situazioni particolari nelle quali possono prevalere altri criteri quali, ad esempio, quello di assicurare il pieno impiego del personale, la saturazione

di un macchinario, oppure rispondere a particolari richieste del mercato, ecc. Tali analisi forniscono valori numerici che non tengono conto delle *condizioni limite*, vale a dire vincoli di vario tipo, come per esempio quelli tecnologici (potenza dei macchinari, numero massimo di giri del mandrino, rugosità superficiale del pezzo ottenuto, ecc.). In generale la scelta dei parametri di taglio è legata strettamente ai seguenti aspetti: durata del tagliente, materiale dell'inserto, materiale del pezzo, condizioni

di taglio, geometria dell'inserto, stabilità della lavorazione, vibrazioni, sovrametalli da asportare. Quello che tuttavia vincola maggiormente i parametri di taglio, in particolare nelle operazioni di finitura, è la rugosità superficiale desiderata a fine lavorazione, che come è noto risulta ad essi legata e può anche essere stimata tramite modelli analitici accurati. Quale che sia la strategia di scelta dei parametri, occorre in ogni caso verificare che non siano violati i vincoli tecnologici, con parametri troppo elevati che possono causare: insorgenza di vibrazioni, eccessive deformazioni del pezzo e dell'utensile, problemi di controllo del truciolo, superamento rugosità ammissibile, massima potenza disponibile al mandrino, massima velocità angolare del mandrino e massimo avanzamento disponibile. Esistono anche limiti inferiori, in particolare per quanto riguarda la velocità di taglio (fenomeno del cosiddetto tagliente di riporto) e l'avanzamento (fenomeno del rifiuto del tagliente da parte della superficie da lavorare).

Le fonti di informazione principalmente

usate per questa scelta sono i dati forniti dai produttori di utensili o quelli disponibili in base a dati resi disponibili da utilizzatori o ricercatori.

Viene riportata una bibliografia essenziale su testi universitari in italiano. La teoria dell'ottimizzazione delle lavorazioni per asportazione di truciolo ha avuto un rapido sviluppo nella letteratura scientifica fino agli anni '80, in cui sono state poste le basi per una formalizzazione del problema. Sono state determinate le principali espressioni analitiche che legano i parametri economici ai parametri di lavorazioni e i vincoli tecnologici esistenti. Alcune tali espressioni sono descritte in dettaglio in questo articolo. Questo articolo si limita a richiamare le basi teoriche principali e propone un metodo analitico che, seppur approssimato, è di immediata applicazione in ambito industriale. Un esempio del metodo trattato è stato illustrato nel numero di *Utensili e attrezzature* di marzo.

A titolo di esempio si farà riferimento ad una lavorazione di tornitura per la quale sono fissati a priori i valori di avanzamento e

profondità di passata, per i motivi tecnologici suddetti: per avere una trattazione che includa la variazione anche di questi due ultimi parametri si dovrebbero introdurre ulteriori relazioni.

Il metodo risulta applicabile anche ad altre lavorazioni alle macchine utensili per asportazione di truciolo, prestando la dovuta attenzione alle unità di misura per la velocità di taglio (m/min., m/s) ed avanzamento (mm/giro, mm/min.) ed alle espressioni che regolano il calcolo dei tempi attivi di lavorazione, corrispondenti alla tipologia di lavorazione o macchina in esame.

Criteri per l'ottimizzazione dei processi per asportazione di truciolo presenti in letteratura

Criterio del minimo costo

Le grandezze considerate e i simboli ad esse associati sono elencati in **tabella**.

Alla base di questo criterio vi è l'espressione analitica del costo di lavorazione alle macchine utensili riportata di seguito:

$$C_T = C_p \cdot \left(t_p + t_i + \frac{t_{cu}}{N_r} \right) + \left(\frac{C_{ut}}{N_r} \right)$$

per esprimere il tempo di lavorazione nel caso di tornitura viene usata la relazione:

$$t_i = \frac{L}{a \cdot n}$$

dove si può esprimere il numero di giri del mandrino come:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{v \cdot 1000}{\pi \cdot D}$$

da cui sostituendo il numero di giri del mandrino nell'espressione del tempo di lavorazione si ottiene:

$$t_i = \frac{L \cdot \pi \cdot D}{a \cdot 1000 \cdot v}$$

ora, come è noto, si può legare la durata del tagliente dell'utensile alla velocità di taglio utilizzando la nota relazione di F.W. Taylor (1907):

$$v \cdot (T)^n = V_1$$

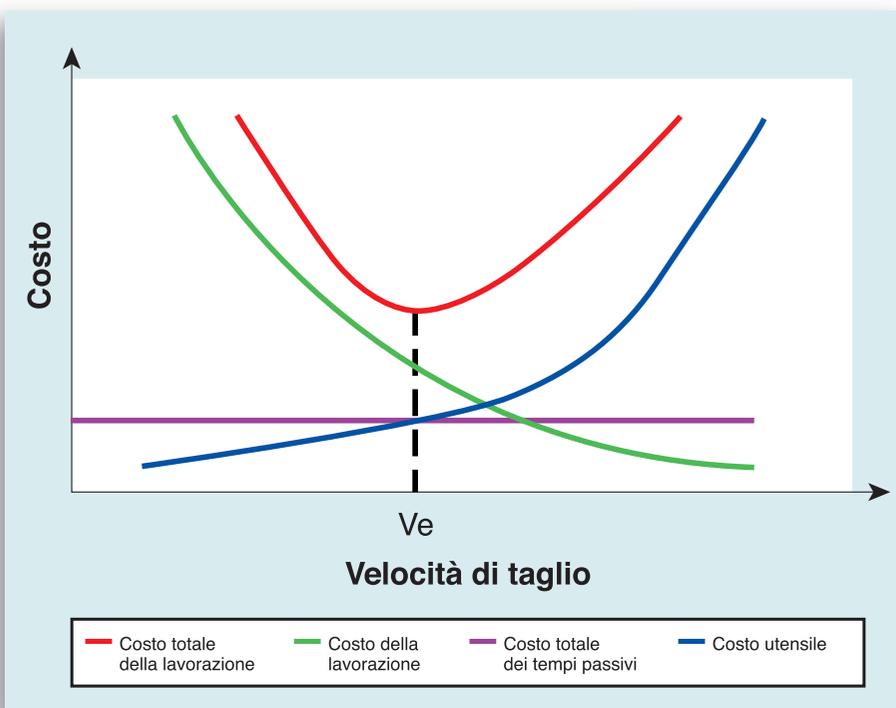


Figura 1 - separazione tra velocità di taglio economica, di massimo profitto e produttiva.

in questo modo l'espressione del tempo di lavorazione diventa:

$$t_i = \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot (T)^\alpha}{a \cdot 1000 \cdot V_i}$$

risulta anche che il numero di pezzi che si può effettuare con un tagliente (nell'arco della durata "T" dell'utensile od inserto) vale:

$$N_t = \frac{T}{t_i}$$

si ricorda che la durata di un inserto è proporzionale al numero di taglienti.

Da cui sostituendo l'espressione del tempo di lavorazione nell'espressione del numero di pezzi lavorabili con un tagliente si ottiene:

$$N_t = \left[\frac{a \cdot 1000 \cdot V_i}{L \cdot \pi \cdot D} \right] \cdot (T)^{1-\alpha}$$

sostituendo le formule sopra citate nell'espressione del costo, si ottiene l'espressione riportata di seguito:

$$C_T = [C_p \cdot t_p] + \left[C_p \cdot \left(\frac{L \cdot \pi \cdot D}{a \cdot 1000 \cdot V_i} \right) \right] \cdot$$

$$(T)^\alpha + \left[(C_p \cdot t_{cu} + C_{ut}) \cdot \left(\frac{L \cdot \pi \cdot D}{a \cdot 1000 \cdot V_i} \right) \right] \cdot (T)^{\alpha-1}$$

si conclude che il costo della lavorazione risulta funzione della durata del tagliente "T" dell'utensile, e quindi, in via analitica, al

numero di pezzi lavorato da un inserto.

Nella costruzione dell'espressione sono stati considerati quattro contributi dominanti in un processo di asportazione di truciolo:

il costo orario della postazione di lavoro (cioè della macchina utensile nelle sue innumerevoli varianti esistenti in commercio) per effetto dei tempi passivi legati al pezzo (es. carico/scarico, montaggio di eventuali attrezzature);

il costo orario della medesima postazione per effetto delle lavorazioni (tempi attivi);

il costo orario della postazione per effetto dei tempi passivi legati all'utensile (es. le operazioni di sostituzione nel magazzino della macchina);

il costo degli utensili, che rappresentano la voce di gran lunga dominante tra le componenti soggette ad usura per effetto della lavorazione stessa.

Osservando l'espressione si può osservare come tali termini influenzano il costo totale.

Il primo termine esprime il costo passivo: esso non dipende dai parametri di taglio, questo implica che anche variando la velocità di taglio, tale voce di costo risulta

costante, cambiando soltanto al variare dei tempi passivi e del costo orario della postazione.

Il secondo termine esprime il costo cosiddetto "attivo" della lavorazione: questo aumenta all'aumentare della durata del tagliente in quanto

$$\text{Costo } \alpha [T]^a = [T]^{0,122}$$

nel caso di utensili in acciaio rapido che lavorano acciaio; $\alpha=0,083$ per acciaio rapido su ghisa, con evidente aumento di velocità di taglio e durata del tagliente.

La durata consigliata di un tagliente è intorno a 15 min., quindi essendo T solitamente maggiore di 1 min., il contributo del termine in questione è maggiorativo per il costo. Volendo esplicitare la dipendenza con la legge di Taylor, dalla quale si evince che ad un aumento della durata dell'inserto o tagliente deve corrispondere una diminuzione

della velocità di taglio, si conclude che il secondo termine dell'espressione sopra riportata diminuisce all'aumentare della velocità di taglio.

Il terzo e quarto termine esprimono il costo relativo alla sostituzione dell'utensile o, meglio, dell'inserto e quello relativo all'acquisto dello stesso. In questo caso, all'aumentare della durata del tagliente si ha una diminuzione del costo in quanto:

$$\text{Costo } \alpha [T]^{a-1} = [T]^{-0,878}$$

Ripetendo il ragionamento fatto precedentemente si osserva che ad una diminuzione della velocità di taglio corrisponde una diminuzione del costo della lavorazione.

L'espressione del costo totale di produzione presenta allora una condizione di minimo, che si ottiene analiticamente eguagliando a zero la derivata del costo rispetto

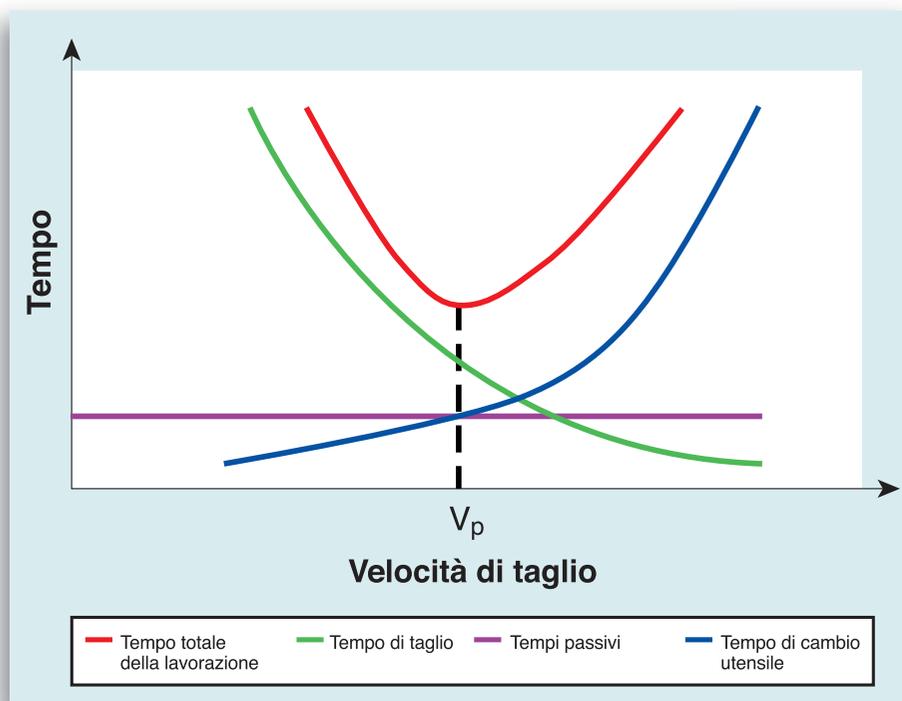


Figura 2 - separazione tra velocità di taglio economica e produttiva.

alla durata T dell'insero:

$$\frac{dC_T}{dT} = 0$$

Questo risultato porta a determinare un valore T_e , definito durata economica, per il quale si ottiene un valore minimo del costo unitario di lavorazione. L'espressione di T_e ricavata risulta:

$$T_e = \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) \cdot \left(t_{cu} + \frac{C_{ut}}{C_p}\right)$$

Poiché il coefficiente di durata α , in prima approssimazione, può essere preso costante si conclude che la durata economica risulta una quantità invariante rispetto ad avanzamento e profondità di passata, in quanto come è noto tale coefficiente è funzione dei parametri di taglio.

Si può a questo punto ricavare la cosiddetta velocità economica V_e inserendo nella relazione di Taylor l'espressione della durata economica T_e .

$$V_e = \left[\frac{V_1}{(T_e)^\alpha}\right] = \frac{V_1}{\left[\left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) \cdot \left(t_{cu} + \frac{C_{ut}}{C_p}\right)\right]^\alpha}$$

Volendo rappresentare graficamente l'andamento delle espressioni ricavate fino ad ora si ottiene il diagramma in **fig. 1**.

Analizzando il grafico si vede che per una velocità di taglio pari a V_e si verifica la condizione di minimo costo, in quanto se si lavora a velocità inferiori questo porta in parte ad una diminuzione del costo degli utensili (si usurano meno) ed in parte ad un aumento del costo della lavorazione, in quanto occorrerà un tempo maggiore per effettuarla; analogamente lavorando a velocità superiori avremo l'aumento dei costi degli utensili contrapposto ad una diminuzione del costo relativo ai tempi attivi di lavorazione.

Si conclude quindi che il minimo costo totale unitario è il risultato di un compromesso fra le due voci di costo variabili (quelle dovute all'utensile ed alla lavorazione attiva) e ogni scostamento della velocità di taglio da quella economica risulterà controproducente

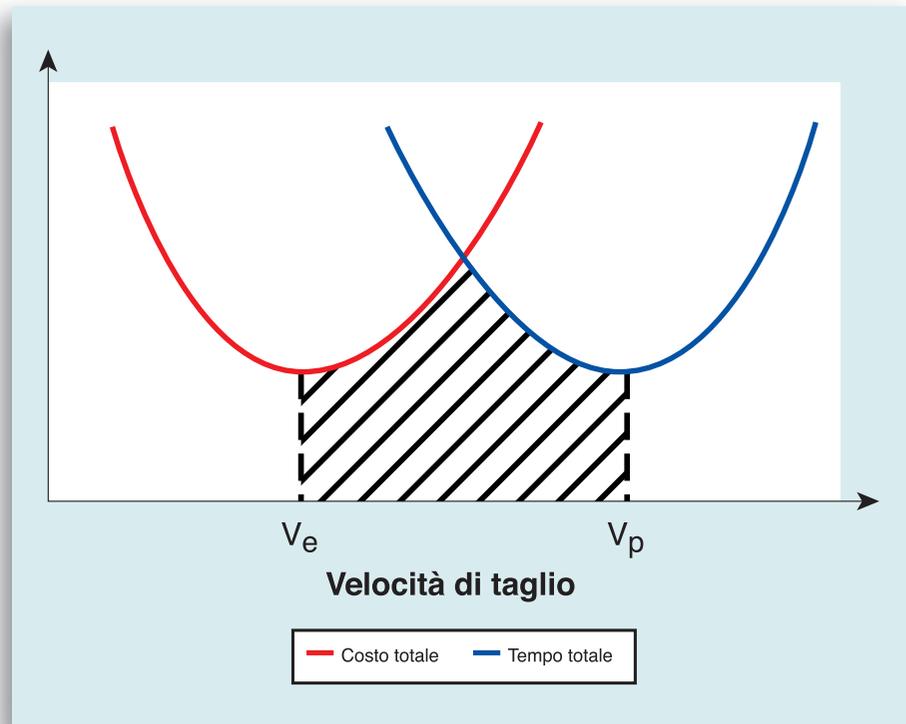


Figura 3 - componenti del tempo di lavorazione in funzione della velocità di taglio.

facendo aumentare il costo di produzione.

Questo compromesso giustifica l'economicità di aumentare la velocità di taglio su macchine costose e viceversa di ridurla su macchine semplici.

L'effetto dei costi passivi, essendo costante, è semplicemente quello di aumentare o diminuire il costo totale di una lavorazione in funzione dei tempi passivi. Questo effetto dà una giustificazione economica della tendenza verso sistemi di attrezzaggio e cambio utensile automatico e ad incrementare la massima velocità degli assi della macchina in rapido.

2.2 Criterio della massima produttività

Il criterio della massima produttività mira a raggiungere il maggior volume produttivo, volume che viene raggiunto nel momento in cui il tempo di lavorazione risulta minimo. Come nel caso dei costi totali si può quindi descrivere il tempo totale di lavorazione come somma di tre contributi: tempi passivi, tempi effettivi di lavorazione dell'utensile e

tempi di sostituzione o cambio dell'insero usurato.

La relazione risultante può essere espressa da:

$$t_T = \left(t_p + t_i + \frac{t_{cu}}{N_T}\right)$$

Dove i termini dovuti al tempo attivo di lavorazione ed al numero di pezzi che si possono lavorare con un tagliente attivo sono analoghi a quelli già calcolati nel caso del criterio del minimo costo.

Si arriva quindi a stabilire che il tempo totale di lavorazione è espresso da:

$$t_T = t_p + \left(\frac{L \cdot \pi \cdot D}{a \cdot 1000 \cdot V_i}\right) \cdot$$

$$(T)^\alpha + \left[t_{cu} \cdot \left(\frac{L \cdot \pi \cdot D}{a \cdot 1000 \cdot V_i}\right)\right] \cdot (T)^{\alpha-1}$$

Anche in questo caso possiamo individuare i contributi che concorrono a determinare il tempo totale analogamente a quanto già fatto per i costi. L'andamento dei vari termini è molto simile al caso del costo totale di lavorazione, per cui sono valide tutte le considerazioni fatte nel caso precedente. Ne consegue che anche l'andamento del

$$\frac{dP_r}{dv} = 0$$

Sviluppando i calcoli si ottiene:

$$\frac{dP_r}{dv} = \left[(R_v - C_r) \cdot \frac{d\left(\frac{1}{t_r}\right)}{dv} \right] - \left[\frac{1}{t_r} \cdot \frac{dC_r}{dv} \right] = 0$$

Come già esposto, non essendo possibile risolvere analiticamente questa relazione (a causa della sua forma implicita) si ricorre a metodi numerici. Dato che questa trattazione esula dagli scopi di questo articolo, si limita l'analisi ad una stima qualitativa.

Se si valuta la pendenza della curva del profitto in prossimità della velocità di taglio economica e in quella di massima produzione, si dimostra che la velocità di massimo profitto (a ricavo costante) è compresa fra la velocità economica e la velocità di massima produzione.

La condizione di minimo costo si ottiene quando la derivata del costo rispetto alla velocità si annulla:

$$\frac{dC_r}{dv} = 0$$

Imponendo questa condizione si ottiene:

$$\frac{dP_r}{dv} = \left[(R_v - C_r) \cdot \frac{d\left(\frac{1}{t_r}\right)}{dv} \right]$$

Si osserva che il segno della derivata risulta positivo in quanto si presume che i ricavi siano sempre maggiori dei costi di lavorazione.

La condizione di velocità di massima produzione si ottiene quando:

$$\frac{d\left(\frac{1}{t_r}\right)}{dv} = 0$$

Imponendo questa condizione si ottiene:

$$\frac{dP_r}{dv} = -\frac{1}{t_r} \cdot \frac{dC_r}{dv}$$

Si osserva che il segno della derivata risulta negativo.

Pertanto, essendo la velocità di massima produzione sempre superiore alla velocità di minimo costo, si conclude che la curva del profitto deve presentare il massimo per un

TABELLA – SIMBOLI IMPIEGATI NELLA TRATTAZIONE ANALITICA DELLA STIMA DEI COSTI DI LAVORAZIONE

Lista dei simboli
C_r = Costo totale della lavorazione espresso in €
C_p = Costo unitario del posto di lavoro espresso in €/min. (Costo postazione). Questo costo comprende, oltre al costo unitario della macchina operatrice, tutti i costi relativi al posto di lavoro: ammortamenti, forza motrice, materiali di consumo, attrezzature, retribuzioni dell'operatore, manutenzione, quota parte delle spese generali del centro di costo, ecc.
t_p = tempi passivi in min. per lo scarico di un elemento finito e il montaggio sulla macchina di un altro elemento greggio, per appostamenti dell'utensile e ritorni rapidi, per soste diverse. Questi tempi non tengono conto del tempo di cambio inserto usurato, ma fanno riferimento alla sostituzione dell'inserto con uno di tipo diverso
t_e = tempo effettivo (tempo attivo) di lavorazione dell'inserto espressa in min. escluse le extra corse e i movimenti in rapido (truciolo - truciolo)
t_{tot} = tempi attivi totali relativi alla lavorazione di un pezzo in min.
t_{cu} = tempo di arresto della macchina in min. per il cambio di un inserto usurato con un altro nuovo dello stesso tipo
t_s = tempi di sostituzione inserto diviso il numero di pezzi che posso lavorare con quell'inserto espressa in min./pezzo
t_{set-up} = tempo di set-up macchina per un lotto espressa in min.
C_{ut} = costo dell'inserto espresso in €
T = durata dell'inserto o del tagliente attivo dell'utensile espressa in min.
T_c = durata dell'inserto che viene fatto lavorare a velocità consigliata espressa in min.
T_e = durata economica espressa in min.
t_r = tempo totale espresso in min.
N_i = Numero di pezzi che si possono lavorare corrispondenti ad una determinata durata "T"
V_e = Velocità specifica di taglio espressa in m/min. (costante di Taylor = velocità tale per cui il tagliente attivo dell'inserto ha una durata T=1 min.)
α = Coefficiente di durata, funzione della coppia materiale dell'inserto - materiale del pezzo da lavorare. In questo testo si fa riferimento al valore di α fornito da Taylor, che per lavorazioni con utensili in acciaio rapido su acciaio vale: $\alpha=0.122$
L = lunghezza del pezzo da lavorare (Corsa) espressa in min.
D = diametro della superficie lavorata espresso in mm
a = velocità di avanzamento espresso in mm/giro
n = numero di giri del pezzo in lavorazione espresso in giri/min.
v = Velocità di taglio espressa in m/min.
V_e = Velocità di taglio economica espressa in m/min.
V_p = Velocità di taglio di massima produzione espressa in m/min.
P_r = profitto "utile" espresso in €/min.
R_v = Ricavi in €

valore della velocità di taglio compreso tra i due valori V_e e V_p . Si riportano gli andamenti descritti nel grafico di **fig. 4**.

6. Conclusioni

Lungi dal perseguire un ottimo assoluto nelle lavorazioni, sono state presentate alcune relazioni che legano fattori economici e parametri di lavorazione per asportazione di truciolo. L'implementazione di tali espressioni in un foglio di calcolo che tracci graficamente gli andamenti attraverso la quantificazione dei parametri in **tabella** tramite dati aziendali è certamente agevole. Consente di ricavare una soluzione ottima nel caso di singole operazioni, affinabile a piacere in base all'intervallo di scansione impostato nel folio di calcolo. Tali analisi consentono di stimare preliminarmente ad esempio, la convenienza di investimenti in nuovi macchinari o utensili e gli eventuali effetti dovuti alle scelte di tempi e parametri di lavorazione (analisi di sensitività).

Ringraziamenti

Progetto sviluppato dagli studenti Barbuti, Mancino e Pani nell'ambito dell'insegnamento di Studi di Fabbricazione del Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica anno accademico 2007-08, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, con il supporto della Società Piaggio & C. S.p.A. (Sig. Raffaello Fontanini). Gli autori tengono ad esprimere i più sentiti ringraziamenti agli ingegneri del Manufacturing Guido Batoni, Maurizio Mancuso e al Direttore Carlo Coppola che hanno portato l'esperienza di una grande azienda metalmeccanica.

Bibliografia

- M. Santochi, F. Giusti: Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione, 2° ed., 2000, Casa Editrice Ambrosiana Milano, pp. 674, ISBN 88-408-1028-5.
- G. F. Micheletti: Tecnologia Meccanica, Vol. I e II, 2° ed., 1979, Edizioni UTET, pp. XXIV-1044, ISBN: 8802034141.
- A. Bugini, R. Pacagnella, C. Giardini, G. Restelli, Tecnologia meccanica 2, Lavorazioni per asportazione di truciolo, 1996, Citta studi, pp. 500, ISBN: 9788825171297.
- F. Gabrielli, R. Ippolito, F. Micari: Analisi e tecnologie delle lavorazioni meccaniche, 2008, McGraw-Hill, pp. 465, ISBN: 978 88 386 64038.